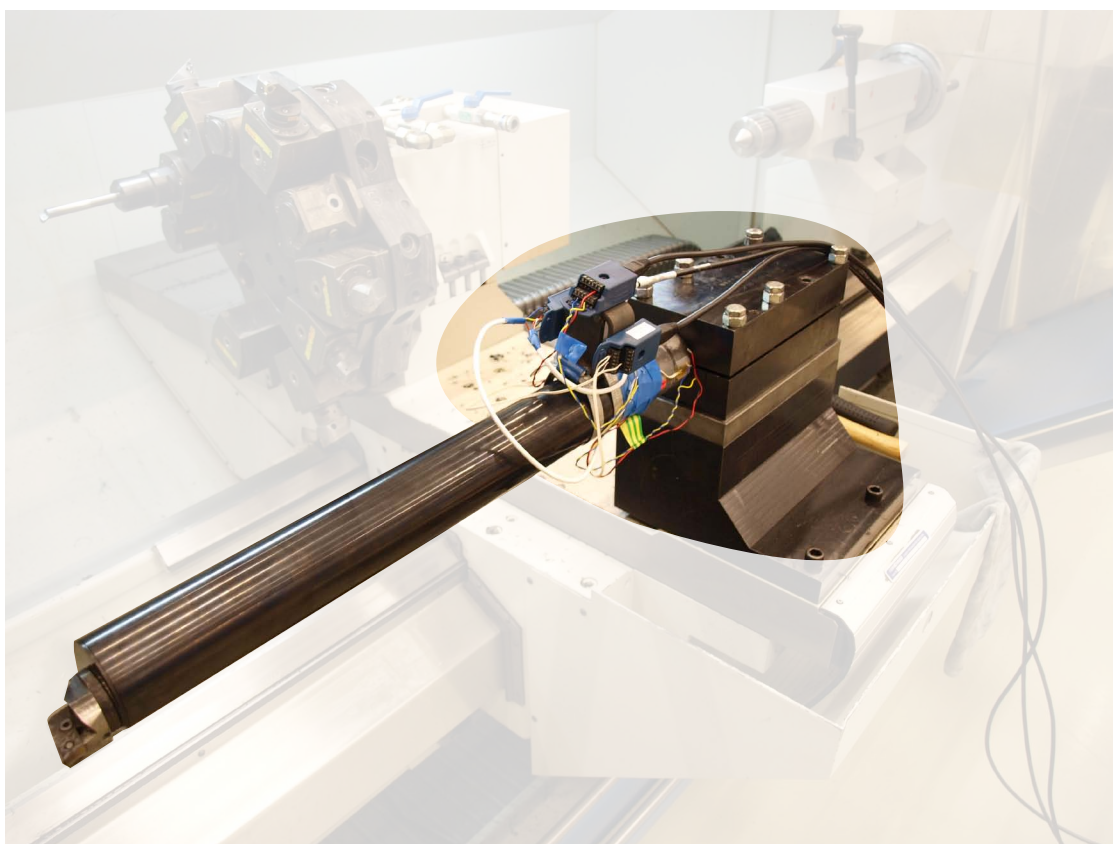


# Instrumentering av dempede borstenger

Stud.techn. Vegard Brøtan

14. juni 2010



 **NTNU**  
100 skapende år

Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi  
Institutt for produksjon- og kvalitetsteknikk

**MASTEROPPGAVE**  
**Våren 2010**  
**stud. techn. Vegard Brøtan**

**INSTRUMENTERING AV VIBRASJONSDEMPEDE BORSTENGER**  
**(Instrumentation of damped boring bars)**

Moderne verktøymaskinsystemer benytter i økende grad sensorer og målesystemer for å overvåke og styre bearbeidingsprosessene. I slike systemer er det utfordringer knyttet til sensorenes robusthet, kommunikasjon med styresystemet og analyse av sensorsignaler. Teeness AS ønsker å utvikle et verktøy for innvendig dreining, med avansert funksjonalitet med hensyn til overvåking og adaptivitet. Denne oppgaven går ut på å utvikle deler av et slikt verktøy.

Arbeidet skal omfatte følgende:

1. Det skal gjøres et studium av systemer der sensorinformasjon benyttes av maskinstyringer for å gjøre justeringer underveis i maskineringsoperasjoner. Det skal gjøres en undersøkelse av muligheter for å kommunisere med noen utvalgte typer maskinstyringer.
2. Det skal gjøres praktiske forsøk for å demonstrere måling av bøye- og torsjonssvingninger ved hjelp av strekkklapper. Det skal vurderes hvordan et målesystem basert på strekkklapper kan implementeres i en praktisk produksjonssituasjon der det stilles spesielle krav til robusthet og integrasjon med annet utstyr.
3. Det skal gjøres en undersøkelse av prinsipper for radiell justering av skjæret underveis i en "bottle bore"-prosess. I denne sammenhengen skal systemer for posisjonsmåling av skjæret også vurderes. Det skal gjøres praktiske forsøk med posisjonsmåling, med spesiell fokus på nøyaktigheten av målesystemet.
4. Et system for tilbakekobling av sensorinformasjon til bearbeidingsprosessen skal utvikles og testes.

Oppgaveløsningen skal basere seg på eventuelle standarder og praktiske retningslinjer som foreligger og anbefales. Dette skal skje i nært samarbeid med veiledere og fagansvarlig. For øvrig skal det være et aktivt samspill med veiledere.

Innen tre uker etter at oppgaveteksten er utlevert, skal det leveres en forstudierapport som skal inneholde følgende:

- En analyse av oppgavens problemstillinger.
- En beskrivelse av de arbeidsoppgaver som skal gjennomføres for løsning av oppgaven. Denne beskrivelsen skal munne ut i en klar definisjon av arbeidsoppgavens innhold og omfang.
- En tidsplan for fremdriften av prosjektet. Planen skal utformes som et Gantt-skjema med angivelse av de enkelte arbeidsoppgavens terminer, samt med angivelse av milepæler i arbeidet.

Forstudierapporten er en del av oppgavebesvarelsen og skal innarbeides i denne. Det samme skal senere fremdrifts- og avviksrappporter. Ved bedømmelsen av arbeidet legges det vekt på at gjennomføringen er godt dokumentert.

Besvarelsen redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag både på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse etc. Ved utarbeidelsen av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelsen legges det stor vekt på at resultatene er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte og diskuteres utførlig.

Materiell som er utviklet i forbindelse med oppgaven, så som programvare eller fysisk utstyr er en del av besvarelsen. Dokumentasjon for korrekt bruk av dette skal så langt som mulig også vedlegges besvarelsen.

Kandidaten skal rette seg etter arbeidsreglementet ved bedriften samt etter eventuelle andre pålegg fra bedriftsledelsen. Det tillates ikke at kandidaten griper inn i betjeningen av produksjonsmaskineriet, idet alle ordrer skal formidles på vanlig måte gjennom fabrikkens bedriftsledelse.

Eventuelle reiseutgifter, kopierings- og telefonutgifter må bære av studenten selv med mindre andre avtaler foreligger.

Hvis kandidaten under arbeidet med oppgaven støter på vanskeligheter, som ikke var forutsett ved oppgavens utforming og som eventuelt vil kunne kreve endringer i eller utelatelse av enkelte spørsmål fra oppgaven, skal dette straks tas opp med instituttet.

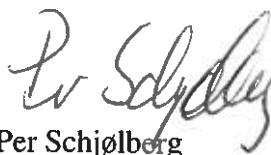
Besvarelsen skal innleveres i 1 elektronisk eksemplar (CD) og 2 eksemplar (innbundet).

Innleveringsfrist: 14. juni 2010.

Ansvarlig faglærer/veileder ved NTNU: Knut Sørby  
Telefon: 73 59 03 74  
Mobiltelefon: 918 97 328  
E-post: [knut.sorby@ntnu.no](mailto:knut.sorby@ntnu.no)

Kontaktperson ved bedriften: Tormod Jensen  
Telefon: 73 53 96 13  
Mobiltelefon: 952 31 243  
E-post: [tormod.jensen@teeness.com](mailto:tormod.jensen@teeness.com)

**INSTITUTT FOR PRODUKSJONS-  
OG KVALITETSTEKNIKK**



Per Schjølberg

førsteamanuensis/instituttleder



Knut Sørby  
faglærer

## Forord

Denne oppgaven omhandler prosjektet mellom Teeness og Volvo Aero Norge, der de ser på muligheten for å overvåke dempede borstenger for innvendig maskinering. Dette er en hovedoppgave som er en del av masterstudiet ved NTNU i Trondheim, vårsemesteret 2010.

For meget god veiledning og hjelp takkes:

- Professor Knut Sørby som veileder fra Teeness og NTNU
- Tormod Jensen som veileder fra Teeness

For hjelp med programmering og diskusjoner rundt den aktuelle elektronikken takkes Even Lund fra Teeness.

For hjelp med å se på muligheter for tilbakekobling til maskinstyringer takkes Mellvin Jakobsen fra Teeness.

For veiledning i programmeringsløsninger i Python takkes Petter Jemtland (studiekamerat)

For veiledning i C-programmering takkes Håvard Brøtan (far).

---

Vegard Brøtan

## 1 Sammendrag

Målet med prosjektet var å finne og teste alternative måter for overvåkning av lange borstenger. Det har i en tidligere rapport med navn "Innvendig maskinering av jetmotor-akslinger" blitt drøftet bruken av strekkklapper til dette formålet. Her er det fortatt enkle tester med en stål-aksling, noe som førte til relativt gode resultater. Hensikten med dette prosjektet var derfor å videreutvikle denne idéen, og å lage et system som kunne testes på en borstang i en innvendig bearbeidings-operasjon. For å komme frem til et resultat ble det sett på oppbygningen og de strukturelle utfordringene på stangen og i systemet som skulle bygges, deretter ble det blitt gjort et studie av strekkklapper. Dette har ført til at det er blitt bygd to små billige systemer for å teste hvilke problemstillinger som er aktuelle for det fremtidige systemet. Her er det funnet klare svar på hvilke deler i dette systemet som ikke var gode nok, nemlig oppløsning i ADCen(analog til digital konverter) og overføringshastigheten til styring eller PC. På samme tid har det blitt bygd et system med basis i LabView og National Instruments-deler. Dette systemet hadde en rekke svakheter som er bemerket i oppgaven. Systemet ble testet med tre forskjellige kutt og to forskjellige skjær. Ut fra disse tester er det gjort et studie av hvordan systemet kan kobles opp mot en maskinstyring, da det i alle tester er satt opp en kobling inn til en datamaskin, som grafisk viser strekk, omregning til akselerasjon og frekvensplanet. Fra de observasjoner og den kunnskapen som er gitt fra prosjektet har det blitt foreslått videre arbeid som kan gjøres for å utnytte og forbedre det arbeid som allerede er gjort, slik at systemet kan implementeres i en praktisk produksjonssituasjon.

## 2 Summary

The goal of this project was to find and test alternative methods of monitoring a bottle bore process. In a former report called "Innvendig maskinering av jetmotorakslinger" it has been discuss how one could implement strain gauges for this purpose. That project did experiments on a steel-rod, as if it was a boring bar. This lead to some good results, that one would want to develop further. The goal of this development was to test a system like this i a real boring operation. To develop such a system we first did a study of boring bars and strain gauges. This lead the project to build to cheap models that could tell us which part of the system that would be important and which part that would have to be upgraded. There was found that one had to upgrade the analog to digital converters resolution. It was suggested a resolution of 16-bit instead of the 10-bits that we started with. Also the speed of the transfer rate to the computer were too slow. Instead of building this system it was suggested to use a system that was as good as ready, except from some programming. This system were made by National Instruments and used the PC-based LabView to control it. It has been done tests with two different cutting tools and with three different cut sizes for each tool. There was found that also this system had some problems, though it had a 24-bit resolution and a measuring speed of up to 50kHz. From the tests there has been made a chapter on further development of this kind of system so that it could be implemented as a practical monitoring system in production.

## Innhold

<b>1</b>	<b>Sammendrag</b>	<b>ii</b>
<b>2</b>	<b>Summary</b>	<b>iii</b>
<b>3</b>	<b>Introduksjon</b>	<b>1</b>
<b>4</b>	<b>Strekkklapper og deres bruksmuligheter</b>	<b>2</b>
4.1	Strekkklappenes oppbygning . . . . .	2
4.1.1	Støyreduksjon . . . . .	3
4.2	Strekkklappsystemers oppbygning . . . . .	4
4.2.1	Kalibrering av strekkklappsystemer . . . . .	8
4.3	Strekkklappers nåværende bruksområder . . . . .	11
4.3.1	Renishaw MP250 måleprobesystem for datastyrte maskiner . . . . .	11
4.3.2	Overvåkning . . . . .	11
4.3.3	Vekter . . . . .	11
<b>5</b>	<b>Dempede borstenger</b>	<b>12</b>
5.1	Vibrasjoner i verktøymaskiner . . . . .	12
5.1.1	Frie svingninger . . . . .	12
5.1.2	Påtrykte svingninger . . . . .	12
5.1.3	Selvgenererende svingninger . . . . .	12
5.2	Passiv dempet borstang . . . . .	13
5.2.1	Statisk stivhet . . . . .	13
5.2.2	Dynamisk stivhet . . . . .	13
5.3	Aktiv demping med aktuator . . . . .	14
<b>6</b>	<b>Systembygging</b>	<b>15</b>
6.1	LabView systemet . . . . .	15
6.2	Elektriske komponenter . . . . .	15
6.3	Mikrokontroller-system bygd med integrerte kretser på hurtig-koblingskort (engelsk: breadboard) . . . . .	18
6.4	Arduino . . . . .	19
6.5	LabView . . . . .	20
<b>7</b>	<b>Programmering</b>	<b>21</b>
7.1	Introduksjon til aktuelle programmeringsspråk . . . . .	21
7.1.1	Assembly . . . . .	21
7.1.2	C . . . . .	22
7.1.3	Arduino, <a href="http://www.arduino.cc">www.arduino.cc</a> . . . . .	22
7.1.4	Python . . . . .	23
7.1.5	LabView . . . . .	23
7.2	Programmering og test med Arduino . . . . .	23
7.3	Programmering og test system bygd med integrerte kretser . . . . .	23
7.4	Bruk av programmet Python for grafisk fremstilling . . . . .	25
7.5	Programmering og test med LabView . . . . .	25
<b>8</b>	<b>Utvikling og illustrasjon av forsøk</b>	<b>26</b>
8.1	Numerisk omregning fra strekk til vibrasjon . . . . .	26
8.2	Innstilling av strekkklapper . . . . .	27



8.3	FEM-analyse av forenklet borstang . . . . .	29
8.4	Illustrasjon av forsøk med Ø60 borestang . . . . .	34
8.4.1	Plassering av strekkklapper . . . . .	35
8.4.2	Påliming og lodding . . . . .	36
8.5	Kalibrering av akser . . . . .	37
8.5.1	Parallell-kalibrering . . . . .	37
8.5.2	Direkte kalibrering . . . . .	37
8.5.3	Problemer som oppstod under innstilling av akser . . . . .	39
<b>9</b>	<b>Tilbakekobling til en CNC maskin</b>	<b>40</b>
9.1	Okuma - OSP-P200L . . . . .	40
9.2	Siemens 840D . . . . .	40
9.3	Heidenhain CNC Pilot 4290 . . . . .	41
9.4	Oppsummering og alternativer . . . . .	41
<b>10</b>	<b>Resultater fra testingen</b>	<b>42</b>
10.1	Dynamisk test med slag på stangen . . . . .	42
10.2	Bearbeidingstester i dreiemaskin . . . . .	45
10.2.1	Variabler brukt i fremvisningen av resultater: . . . . .	47
10.2.2	Skjær Sandvik cnmg med nesoradius 0,8mm . . . . .	48
10.2.3	Skjær med nesoradius 0,4mm . . . . .	49
10.2.4	Sammendrag av tester . . . . .	51
<b>11</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>52</b>
<b>12</b>	<b>Forslag til videre arbeid</b>	<b>54</b>

## Figurer

1	Forenklet illustrasjon av en Teeness "Bottle bore" test-borestang. . . . .	1
2	Sleidefunksjonen fra en Cogsdill ZX modul . . . . .	2
3	Wheatstone-bro . . . . .	2
4	Mulige støykilder . . . . .	4
5	Grad av støyreduksjon grunnet valg av signalkabler. . . . .	4
6	Kvart Wheatstone-bro . . . . .	5
7	Halv Wheatstone-bro . . . . .	6
8	Streklapp-plassering for fullt aktiv halvbro i utkragerbjelke . . . . .	6
9	Hel wheatstone-bro . . . . .	7
10	Plassering av streklapper fra figur 9 for torsjonsmåling . . . . .	7
11	MP250 . . . . .	11
12	Overflate som kan oppstå på grunn av vibrasjoner. . . . .	12
13	Teeness skreddersydd passiv dempet borestang. Her med tykk bakende bygd av hardmetallringer for forbedret statisk stivhet. Illustrasjon: Sandvik SilentTools-katalog . . . . .	13
14	FEM-analyse av statisk nedbøyning . . . . .	14
15	Riktig belastning av verktøyholder, illustrasjoner fra <a href="http://www.teeness.no">www.teeness.no</a> . . . . .	14
16	En innebygd aktuator trykker motfase mot vibrasjoner . . . . .	14
17	a) Mikrokontroller: Atmega168 b) Forsterker: AD6200 . . . . .	16
18	Oppkobling av forsterker . . . . .	16
19	Symbol for kondensator . . . . .	17
20	Symbol for resistor . . . . .	17
21	Koblingsskjema av mikrokontrolleren atmega168p . . . . .	18
22	Koblingsskjema for Arduino . . . . .	19
23	Koblingsskjema for LabView-system . . . . .	20
24	Nivå, programmeringsspråk . . . . .	21
25	Penn spesifisering . . . . .	21
26	Arduino . . . . .	22
27	Illustrasjon av akselerasjonsutregning fra numeriske måledata, der A er akselerasjon, V er fart og U er utslag/utbøyning. . . . .	26
28	Borstang forenklet til bjelke med kraft på enden. . . . .	27
29	Frihetsgrader for nodene til ett element . . . . .	29
30	Utkragerbjelkens last . . . . .	30
31	Den forenklete borstangen som det er gjort analyser på. . . . .	31
32	Forenklet analyse av borstang med 2000N på enden. . . . .	31
33	Området hvor streklappen burde sitte. . . . .	32
34	Frekvensmode 1 . . . . .	33
35	Frekvensmode 2 . . . . .	33
36	Tildeling av navn på aksene. . . . .	34
37	Streklapp-plassering. . . . .	35
38	Opprissing av plassering til streklappene. . . . .	35
39	Trykk under liming . . . . .	36
40	Siktemetode for riktig plassering av streklapp. . . . .	36
41	Systemet oppkoblet. . . . .	36
42	Illustrasjon av oppsett for direkte kalibrering av Z-akse på venstre side og X-akse på høyre side. . . . .	37
43	Forholdet mellom tøyning og nedbøyning. (Z-akse) . . . . .	38

44	Grov skissering av arkitekturen bak Okuma OSP-P200 . . . . .	40
45	Målinger med akselerometer uten demper . . . . .	42
46	Slagmåling med strekkklapper i X-retning uten demper . . . . .	42
47	Slagmålinger med strekkklapper i Z-retning uten demper . . . . .	43
48	Frekvensplanet til strekkklappmålingen . . . . .	43
49	Sammenligning av frekvens i akselerometer- og strekkklappmåling. . . . .	44
50	Dobbelt slag med demper. . . . .	44
51	Illustrasjon til hjelp for utregning av nedbøyning . . . . .	45
52	Hullindikator . . . . .	46
53	0,3mm kutt med svingninger. . . . .	46
54	Sandvik cnmg 0,8 . . . . .	48
55	Sandvik dcmt 11 t3 0,4 . . . . .	49
56	Illustrasjon av måleoppløsning på et 800Hz sinus-formet signal . . . . .	51

\*

## Tabeller

1	Antall aktive strekkklapper i forhold til målebroens oppbygning . . . . .	9
2	Nedbøyning fra FEM-analyse . . . . .	13
3	Oppsummeringstabell av FEM-analyse . . . . .	33
4	Instillingsverdier for Z- og X-akse. . . . .	38
5	Utbøyninger for 3mm kutt med cnmg 0,8 . . . . .	48
6	Skjærdata for 3mm kutt med cnmg 0,8 . . . . .	48
7	Utbøyninger for 1mm kutt med cnmg 0,8 . . . . .	48
8	Skjærdata for 1mm kutt med cnmg 0,8 . . . . .	48
9	Utbøyninger for 1mm kutt med cnmg 0,8 . . . . .	49
10	Skjærdata for 0,5mm kutt med cnmg 0,8 . . . . .	49
11	Utbøyninger for 3mm kutt med dcmt 0,4 . . . . .	49
12	Skjærdata for 3mm kutt med dcmt 0,4 . . . . .	49
13	Utbøyninger for 1mm kutt med dcmt 0,4 . . . . .	50
14	Skjærdata for 3mm kutt med dcmt 0,4 . . . . .	50
15	Utbøyninger for 1mm kutt med dcmt 0,4 . . . . .	50
16	Skjærdata for 0,5mm kutt med dcmt 0,4 . . . . .	50

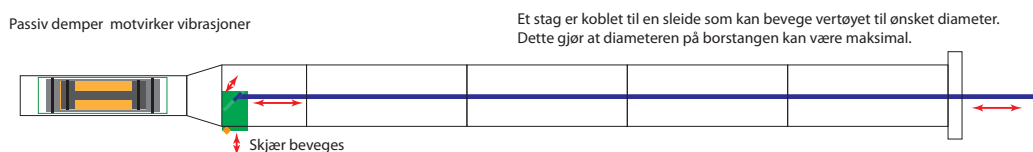
\*

### 3 Introduksjon

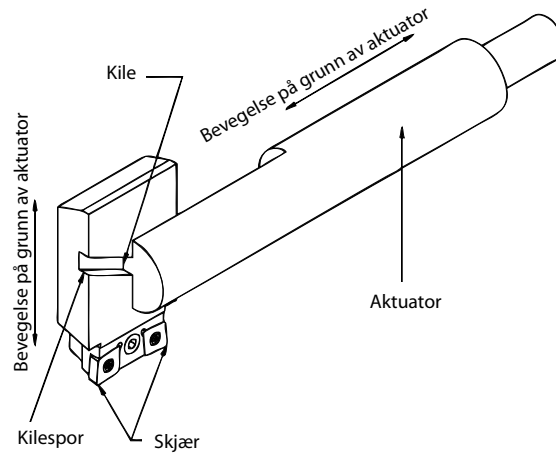
Den innledende prosjektoppgaven til denne masteroppgaven beskriver forsøk der strekk-lapper brukes til å finne vibrasjoner og egenfrekvensen i en jernstang som skal forestille en lang borstang. I dette prosjektet skal det ses nærmere på hvordan man kan instrumentere borstangen og med et system av strekk-lapper. Siden systemet er utsatt for store krefter vil det kreve stor motkraft og stabilitet. Dette er grunnen til at drivverket til skjæret i mange tilfeller ikke blir plassert inne i stangen. Her trengs det altså en aksling som går frem til en sleide som holder skjæret slik som vist i figur 1. På grunnlag av dette vil det i denne rapporten sees på muligheten av å måle utbøyning av stangen som videre kan føre til direkte kompensasjon av skjærets forflytning. Tanken er at dette systemet også kan kobles til en vanlig borstang slik at man også her kan kompensere for utbøyning. Dette medfører behov for en tilbakekobling av parametere til maskinstyringen. I oppgaven er det gjort et litteraturstudie av dette området.

Først kan de være lurt å se på systemet i sin helhet. Systemet har en borstang med justerbart skjær i radiell retning. Skjærets plassering avgjøres av en lineær aktuator eller en servomotor. Disse plasseres gjerne bakenfor borstangen og bygges da inn i borstangens holder. Det finnes tre eksempler på denne typen stenger. Den første er en relativt gammel stang som i dag står i produksjon hos Volvo Aero Kongsberg. Denne stangen har samme type sleidemekanisme som i figur 2, der skjæret drives indirekte av en servomotor som står ca. en halv meter bak innspenningen av stangen. Her roterer borstangen, mens arbeidsstykket står stille. Den andre borstangen er utviklet igjennom et samarbeid mellom Volvo Aero og Teeness. Denne stangen er vist i figur 1, og drives i av et lignende system som den tidligere modellen. For bedre nøyaktighet er måleskiven med tilbakekobling satt på enden av kulemutterskruen som driver akslingen frem mot sleideenheten. På den måten oppnås det måling nærmere skjæret enn om måleskiven hadde vært koblet til motoren. Den tredje borstangen er en borstang fra Cogsdill. Figur 1 viser en enkel skisse av hvordan skjæret beveger seg i disse borstengene. Cogsdill har utvalg av både aktuator- og servomotordrift i borstenger med sleide på skjæret. I de lengre stengene som brukes det servomotor og i de kortere stengene blir en aktuator bygd inn i en tykk del av verktøyet.

ameriican heller



Figur 1: Forenklet illustrasjon av en Teensess "Bottle bore" test-borstang.



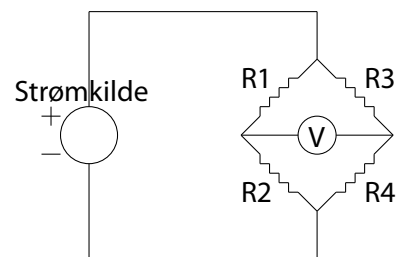
Figur 2: Sleidefunksjonen fra en Cogsdill ZX modul

## 4 Strekkklapper og deres bruksmuligheter

I dette avsnittet ses det nærmere på strekkklappers oppbygning, strekkklappsystemers oppbygning og strekkklappers nåværende bruksområder, da man senere i oppgaven ønsker å bruke strekkklapper som utgangspunkt i et målesystem for lange borstenger. Det anbefales på det sterkeste å ta en titt på produsenten Vishay sine teknologi-notater som ligger allment tilgjengelig på internett. Produsenten HBM har også lagt ut gode informasjonskilder slik som Hoffmann [1989].

### 4.1 Strekkklappenes oppbygning

Strekkklapp er en liten målelapp som måler svært små posisjonsendringer. Posisjonsendringene er gjerne målt i  $\mu\text{m}$  og skyldes at et fast legeme strekkes, vrir eller trykkes sammen. Strekkklapper bygger på at resistansen i en elektrisk leder forandrer seg når lederen forlenges. I hovedsak forandrer resistansen seg på grunn av en motstandstråd som er innstøpt i et bærearke/basestoff av plast eller gummi. Dette limes til den del som skal prøves, slik at tråden er parallell med den retning på underlaget hvor forlengelse/spenning ønskes målt. Under belastningsprøven måles forandring i resistansen ved hjelp av en wheatstone-bro. Wheatstone-broer brukes også i trykkmålere, vekter og andre instrumenter der målestørrelsen omgjøres til en forlengelse,  $\Delta L(m)$ , i stedet for den dimensjonsløse og vanlig brukte  $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$ . Wheatstone-broer finnes i mange utgaver etter hvordan en vil utnytte strekkklappene og etter hvor mange strekkklapper som trengs. Sensorene er veldig billige og kan i de fleste tilfeller fåes kjøpt fra 50 til 500 kr. Det finnes flere leverandører av strekkklapper som f.eks. HBM, Vishay og Kyowa.



Figur 3: Wheatstone-bro

Strekkklappens sensitivitet for strekk og trykk er gitt av dens målekonstant (gauge factor(GF)) og oppgis fra produsenten. Utregning av målekonstanten kan sees i ligning (4.1). Hvis man har en målekonstant på 2 i en 3mm lang strekkklapp, med en startmotstand på 120ohm

og strekker strekkklappen  $9\mu\text{m}$  gir dette et regnestykke som ser slik ut:  $2 \times \frac{0,009\text{mm}}{3\text{mm}} = 0,6\%$  i motstand blir dette  $0,6\% \times 120\Omega = 0,72\Omega$ . Denne lille motstandsforskjellen lager en spenningsforskjell i sammenkoblingen av to motstander, som vidre kan registreres som en forskjell av to slike veier. Dette registreres i måleenheten  $V$  i figur 3. For at  $V$  skal forandre seg kreves en endring i motstanden, her vist som  $R1$  til  $R4$ . Man kan regne på dette. Som eksempel kan alle motstandene settes lik  $120\Omega$ , der  $R4$  er en strekkklapp. I slike tilfeller brukes ligning (4.2). Dermed vet man at spenningen på hver side av  $V$  er  $2,5V$  hvis strekkklappen ikke er i tøyd tilstand. Spenningsforskjellen mellom de to sidene av  $V$  er da  $0$ , altså har man et nullsignal. I et fysisk system vil ofte nullsignalet ligge nesten på  $0$  på grunn av små forskjeller i motstandene. Med en spenningsforskjell i strømsignalet på  $5V$  vil  $V_{R3}$  bli  $2.492522$ . Dette gir en forskjell  $0,007478V$ .

Hos markedstilgjengelige strekkklapper varierer gjerne null-motstanden mellom  $120\Omega$  -  $1000\Omega$ . Høy motstand gir også store motstandsforandringer, noe som betyr at de er mer sensitiv. Problemet med høy motstand er at de lettere utmattes enn strekkklapper med lav motstand. Siden vårt system både trenger både høy oppløsning og høy terskel for utmatting vil det være lurt å velge en strekkklapp med lav motstand og øke oppløsningen i målingssystemet. Strekkklapper med lav motstand er gjerne billigere enn strekkklapper med høyere motstand.

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (4.1)$$

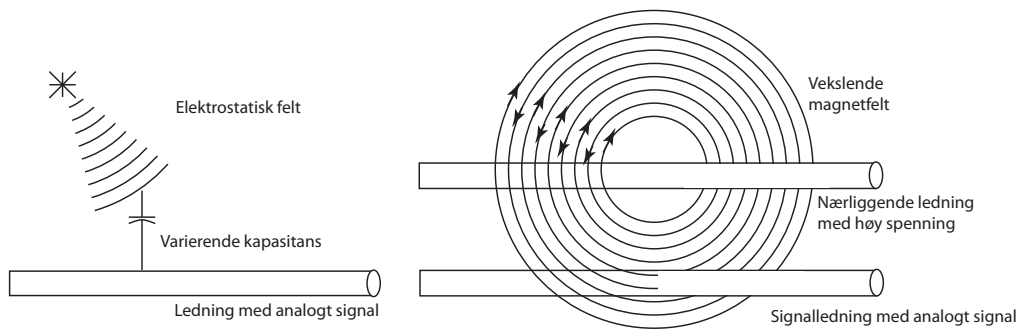
$$V_{R3} = \frac{V_{inn}R3}{R3 + R4} \quad (4.2)$$

$$\frac{V_{ut}}{V_{inn}} = \frac{R1}{R1 + R2} - \frac{R3}{R3 + R4} \Leftrightarrow V_{ut} = V_{inn} \left( \frac{R1}{R1 + R2} - \frac{R3}{R3 + R4} \right) \quad (4.3)$$

#### 4.1.1 Støyreduksjon

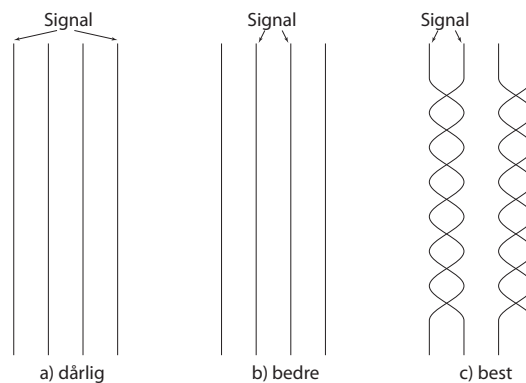
Man opererer alltid med analoge signaler igjennom strekkklappene og ut til analog til digital-konverteren(ADC). Det er mulig å endre disse signalene med elektrostatisk støy. Denne typen støy kommer gjerne fra ledninger, motorer, lysrør, sveise- og loddeapparater, vibratorer eller trådløse datasendinger. Støyen kan enten følge strømforsyningen inn til systemet, eller treffe ledningene som fører de analoge signalene. For å motvirke slike problemer vil det være nødvendig å ta visse forhåndsregler for oppbygging av systemet. Støy som kommer inn i systemet igjennom strømforsyning er det ikke sett på i denne rapporten. For å motvirke støy brukes gjerne et lavpassfilter inn på kontrolleren som styrer strekkklappbruen. Det man vil se nærmere på er hvordan en skal kunne beskytte seg mot påvirkning fra elektrostatiske felt. I figur 4 ser man illustrasjoner av hvordan støy kan påvirke systemet. Også selve strekkklappen er utsatt for slike feilkilder.

Som nevnt finnes det tiltak for å dempe slike påvirkninger. Et vanlig tiltak er å ha skjerming utenpå signalledningene. Dette gjøres ved å plassere et tynt faradays bur rundt ledningen. Dette buret er et nett av elektrisk ledende metalltråder eller en metall-folie som gjør at det ikke kan oppstå elektriske potensialforskjeller innenfor. Buret bør være jordet for best mulig effekt.



Figur 4: Mulige støykilder

Det neste punktet er hvordan ledningene er lagt. En skal flette ledningene så nære strekk-lappene som mulig og en bør bruke så korte ledninger som mulig. Vishay [2009] forklarer mye om fletting av ledninger og hvordan dette brukes i motvirkning av forskjellige typer støy. Figur 5 viser hvordan en enkelt kan forbedre signalkvaliteten. Her er a) og b) er flatkabler mens c) er løse ledninger. Som en ekstra beskyttelse kan også ekstra ledninger med jording benyttes for å skape noe som ligner på et Faradays bur.

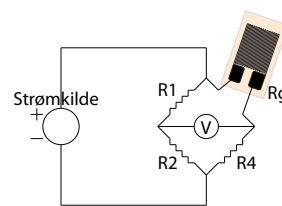


Figur 5: Grad av støyreduksjon grunnet valg av signalkabler.

## 4.2 Strekklasssystemers oppbygning

Et strekklasssystem styres i de fleste tilfeller av en Wheatstone-bro. En slik koblingsbro er laget for å måle forskjell i motstand ved spenningsforandring. Figur 3 illustrerer oppbygningen av en slik bro. Broen består av fire motstander, en strømkilde og et voltmeter. Voltmeteret inneholder gjerne en analog til digital konverter for å gjøre signalet om til stabile digitale signaler. Det sier seg selv at et lite analogt signal lett vil kunne påvirkes av elektrisk støy. Gode koblinger, skjerming og lodding vil være nøkkelementer for å få et slikt system til å fungere bra. Når det gjelder strekklasser skal disse kobles til i stedet for en av motstandene i figur 3 for å skape et signal som varierer med motsandsendringen. Det finnes mange måter å koble systemet på. Det finnes broer med en, to og fire strekklasser, såkalt kvart-, halv- og hel-bro. I dette avsnittet beskrives noen av de vanligste typene broer og fordeler, samt ulemper med disse.

**Kvart-bro:** En kvartbro er en målebro med én strekkklapp som ofte brukes på plasser hvor en har dårlig plass, jevn temperatur og/eller plasser med store strekk. Grunnen til at den ikke brukes til de mest nøyaktige målingene er dens problem med temperaturforandringer. Disse forandringene vil gi et avvik i målingen og bidrar dermed til unøyaktighet. Produsentene oppgir grafer og formler for å unngå slike unøyaktigheter, men dette betyr at en temperaturmåler må kobles inn i forsøket. Av denne grunn ble ikke denne typen målebro brukt i mine forsøkene. Tidligere i avsnittet vises det hvordan en skal regne når en har bare én strekkklapp med i målebroen sin. Fra ligning (4.3) får vi ligning (4.5) ved å sette inn  $120\Omega$  for  $R_1$ ,  $R_2$  og  $R_4$ . Legg merke til at man har ganget med -1 for å få positivt strekk.

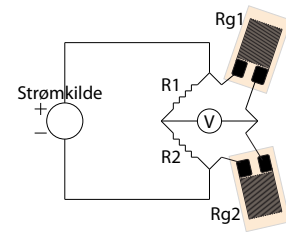


Figur 6: Kvart Wheatstone-bro

$$V_{ut} = V_{inn} \left( \frac{R_g}{R_g + 120} - 2 \right) \quad (4.4)$$

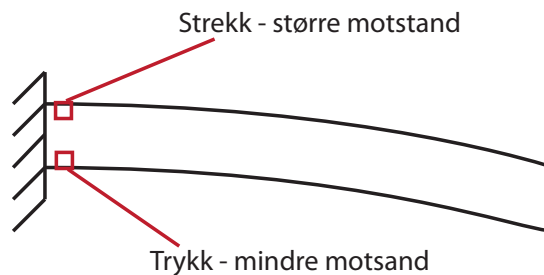


**Halv-broer:** Poenget med en halvbro fremfor en kvart bro er å kompensere for temperatur. Kompenseringen kan skje både ved å lime fast begge strekkklappene og også ved å la den ene strekkklappen være festet til en løs bit eller i en annen retning. For små tøyninger vil en bro der begge strekkklapper er limt som en del av systemet være ideelt da oppløsningen rundt måleområdet blir bedre. På en utkragerbjelke festes strekkklappene slik at man får en strekkklapp med maksimalt trykk og en med maksimalt strekk. Dette er vist i figur 8. Ved temperaturforandringer i stangen vil begge strekkklappene få en forandring i samme retning. La oss si at denne forandringen er veldig stor og utgjør et ekstra bidrag på  $0,1\Omega$  for begge strekkklappene. Fra formel (4.2) ser man da at nullsignalet blir opprettholdt. Tidligere i avsnittet ble det regnet på en enkelt strekkklapp med  $120\Omega$ . Nå utføres det samme regnestykket med en fullt aktiv halvbro som vist i figur 8. Systemet strekkes fortsatt  $9\mu\text{m}$  som gir  $0,72\Omega$  forandring i strekkklappene. Dette betyr at strekkklappen som strekkes, la oss si at det er  $R_4$ , gir  $120,72\Omega$ , mens strekkklappen som trykkes ( $R_3$ ) gir  $119,28\Omega$ . Fra formel (4.2) får man dette uttrykket:  $V_{R3} = \frac{5V \times 119,28}{120,72 + 119,28} = 2,485V$ . Dette gir en forskjell  $0,0015V$  som er over dobbelt så stort som i en halvbro. Ut fra dette regnestykket må høyre side av  $V$  definere  $4s$  som negativ. Det er også to andre måter å koble denne broen på:  $R_1$  kan skifte plass med  $R_{g1}$  eller  $R_2$  kan skifte plass med  $R_{g2}$ . Gjør en dette vil en få et avvik fra null i begge sider av  $V$ , men resultatet vil bli det samme. Man bør også merke seg at rent strekk eller trykk ikke vil bli tatt opp av en slik fullt aktiv halv-bro.



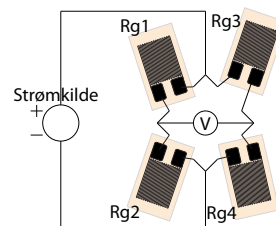
Figur 7: Halv Wheatstone-bro

$$V_{ut} = V_{im} \left( \frac{R_{g1}}{R_{g1} + R_{g2}} - 2 \right) \quad (4.5)$$



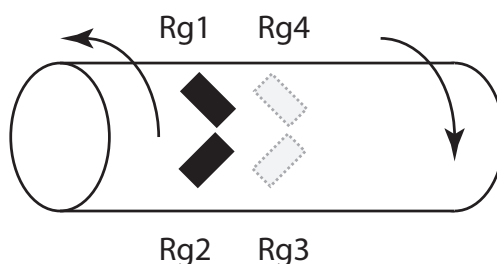
Figur 8: Strekkklapp-plassering for fullt aktiv halvbro i utkragerbjelke

**Hel-bro:** En helbro bruker fire strekkklapper som vist i figur 9. Grunnen til at denne typen bro brukes fremfor halvbro er at den gir dobbelt så stort utslag. Samtidig har den også flere bruksområder enn en halvbro. Problemet med helbroen er at den tar mer plass, er dyrere og har flere pålimte strekkklapper som det kan gå galt med. Torsjon gir gjerne små tøyninger, og på grunn av at broen trenger kompensasjon strekk-trykk fra nedbøyning vil derfor en hel-bro være det eneste egnede valget til måling av torsjon. I figur 10 ser man hvordan en torsjonsbro burde kobles opp. Man ser at rent strekk eller trykk og temperatur forandrer alle strekkklapper likt og gir dermed ingen måleforskjell. Hvis man får en nedbøyning, vil  $R_g1$  og  $R_g2$  strekkes likt mens  $R_g3$  og  $R_g4$  trykkes likt, noe som fører til uforandret null-signal fra begge sider av broen. Med utbøyning vil  $R_g1$  og  $R_g4$  strekkes likt mens  $R_g2$  og  $R_g3$  trykkes likt, noe som fører til likt forandret null-signal på begge sider.



Figur 9: Hel wheatstone-bro

$$V_{ut} = V_{inn} \left( \frac{R_g3}{R_g3 + R_g4} - \frac{R_g1}{R_g1 + R_g2} \right) \tag{4.6}$$



Figur 10: Plassering av strekkklapper fra figur 9 for torsjonsmåling

#### 4.2.1 Kalibrering av strekkklappsystemer

I prinsippet har et strekkklappsystem lineær sammenheng mellom tøyning og spenning, men i enkelte tilfeller kan instrumenteringen gjøre at dette forandres. Til dette prosjektet er det viktig å vite at signalene kan bli uproporsjonal grunnet instrumenteringen, men at man ikke anså det nødvendig å ta noen forhåndsregler for å unngå dette.

**Nullstilling (Offset nulling)** Nullstilling av signalet brukes for å finne nullpunktet til målebroen. På grunn av små variasjoner i motstand hos de pålimte strekkklappene vil broen ha et null-signal slik at den ser ubalansert ut. Trekker man fra dette lille signalet direkte vil broen se balansert ut og i praksis gi et nullsignal som er lik null. Benevnes nullsignalet som  $A$ , vil ligning (4.7) være sann i ustrekt tilstand.

$$V_{ut} - A = 0 \quad (4.7)$$

**Parallell-kalibrering (Shunt calibration)** er en vanlig prosedyre hvis en vil stille inn broen slik at den gir fra seg tøyning direkte. Ved å parallellkoble en kjent motstand over en strekkklapp simuleres tøyning i strekkklappen. For å gjøre denne typen kalibrering må vi vite strekkklappens målekonstant ( $GF$ ) og hvor stor tøyning ( $\epsilon$ ) man vil måle. Under beskrives det hva som er viktig når en skal gjøre en parallell-kalibrering og hvilke parametere en trenger å kjenne til. Motstandene  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  og  $R_4$  brukes som vist i avsnitt 4.2 som motstanden i strekkklapper eller vanlige motstander.

$N$  er et tall på hvor mange aktive strekkklapper som brukes i målingen. Under kalibrering vil bare en strekkklapp bli brukt, og nettopp derfor er viktig å bruke denne konstanten til å rette målingen overfor tøyning i hele broens sensorer. Tabell 1 viser en oversikt over de vanlige definisjonene av  $N$ .

$\nu$  er Poissons tall (tverrkontraksjonstallet) og er forholdet mellom tverrtøyning og aksialtøyning:  $\nu = -\frac{\epsilon_t}{\epsilon}$ . Dette kan det leses mer om i Irgens [1999b] s.19.

$V_{inn}$  er spenningen som føres inn i målebroen.

$V_{ut}$  er spenningen som føres ut av målebroen.

$R_g$  er den initielle motstanden i strekkklappen som i vårt tilfelle vil være konstant på  $120\Omega$ .

$R_s$  er motstanden som kobles i parallell med den ene strekkklappen.

$\Delta R$  er motstandsfor forskjellen på grunn av den parallellkoblede strekkklappen.

$$GF = \frac{\Delta R/R_g}{\epsilon} \Leftrightarrow \frac{\Delta R}{R_g} = GF\epsilon \quad (4.8)$$

Fra ligning (4.3) utledes ligning (4.9)

$$\left(\frac{V_{ut}}{V_{inn}}\right)_0 = \left(\frac{R1}{R1 + R2} - \frac{R3}{R3 + R4}\right) \quad (4.9)$$

Mål på grunn av forandring i R1:

$$\left(\frac{V_{ut}}{V_{inn}}\right)_{R1} = \left(\frac{R1 + \Delta R1}{R1 + \Delta R1 + R2} - \frac{R3}{R3 + R4}\right) \quad (4.10)$$

Forandring på grunn av forandring i R1:

$$\Delta\left(\frac{V_{ut}}{V_{inn}}\right) = \left(\frac{V_{ut}}{V_{inn}}\right)_{R1} - \left(\frac{V_{ut}}{V_{inn}}\right)_0 = \left(\frac{R1 + \Delta R1}{R1 + \Delta R1 + R2} - \frac{R3}{R3 + R4}\right) - \left(\frac{R1}{R1 + R2} - \frac{R3}{R3 + R4}\right) \quad (4.11)$$

R1 og R2 er lik og kan kalles  $R_g$ :

$$\Delta\left(\frac{V_{ut}}{V_{inn}}\right) = \frac{R_g + \Delta R1}{R_g + \Delta R1 + R_g} - \frac{R_g}{R_g + R_g} = -\frac{\Delta R1/2}{2R_g + \Delta R1} = -\frac{\Delta R1/R_g}{4 + 2\Delta R1/R_g} \quad (4.12)$$

Det settes inn for  $\frac{\Delta R}{R_g}$  fra ligning (4.8):

$$\Delta\left(\frac{V_{ut}}{V_{inn}}\right) = -\frac{GF\epsilon}{4 + 2GF\epsilon} \quad (4.13)$$

Ligning (4.13) viser utregningen for en kvartbro, der  $V_{ut}$  og  $\epsilon$  er variable. Denne utregningen tar bare hensyn til at en av motstandene skal forandre seg når den blir utsatt for tøyning. Om det brukes flere strekkklapper i målingen, må antallet strekkklapper multipliseres inn i målekonstanten, ( $GF$ ), slik at man får  $(N)(GF)$ .  $N$  er et måltall for hvor mange aktive strekkklapper man har. Poissontallet brukes om strekkklapper som står tverrvendt på tøyningensretningen, som tidligere nevnt. Tabell 1 gir en oversikt over hvilket måltallet som de forskjellige broene bruker ( $N$ ). I tabellen står  $t$  for tverrvendt. Om kompensasjonsstrekkklappen i en halvbro er festet på en nøytral kloss (null tøyning i kloss, bare temperaturforandring) vil denne broen bli regnet på som om den var en kvartbro. På samme måte vil en helbro med to strekkklapper på nøytral kloss være lik en halvbro.

Brotype	Kvartbro	halvbro m/t	halvbro	helbro m/2t	helbro
$N$	1	$1(1 + \nu)$	2	$2(1 + \nu)$	4

Tabell 1: Antall aktive strekkklapper i forhold til målebroens oppbygning

Motstandsforandring i forhold til parallellkobling over strekkklapp:

$$\Delta R = \frac{R_g R_s}{R_g + R_s} - R_g = -\frac{R_g^2}{R_g + R_s} \Leftrightarrow \frac{\Delta R}{R_g} = -\frac{R_g}{R_g + R_s} \quad (4.14)$$

Ligning (4.14) settes inn i ligning (4.12) og man finner  $\Delta\left(\frac{V_{ut}}{V_{inn}}\right)$  i ligning (4.8) og setter denne inn i siste del:

$$\Delta\left(\frac{V_{ut}}{V_{inn}}\right) = \frac{\frac{R_g}{R_g+R_s}}{4 - 2\frac{R_g}{R_g+R_s}} \Leftrightarrow \frac{R_g}{4R_s + 2R_g} = -\frac{(N)(GF)\epsilon}{4 + 2(N)(GF)\epsilon} \quad (4.15)$$

Fra siste del av ligning (4.15) fås denne ligningen:

$$\epsilon = -\frac{R_g}{(R_s + R_g)(N)(GF)} \quad (4.16)$$

Ut fra dette ser man at parallell-kalibrering gir enkle regnestykker som krever nøyaktig informasjon fra brukeren. På grunnlag av dette burde man være i stand til å kunne måle tøyningene som gis i borstangen.

**Direkte kalibrering** Direkte kalibrering brukes for å stille om måleresultatene fra et volt-signal til et ønsket signal ved hjelp av målinger. Ved denne typen innstilling må man lage seg en tabell for spenning med hensyn på måling. Basert på våre utregninger i avsnitt 8.2 vil dette forholdet være proporsjonalt i en borstang, noe som betyr at man burde få en lineær graf fra tabellen til disse målingene. På den måten kan en interpolere og ekstrapolere tallverdier ut fra noen få målepunkter. Om det skulle vise seg at sammenhengen ikke er proporsjonal (trolig på grunn av instrumenteringen) må det utledes en formel som beskriver denne sammenhengen. Dette kan da brukes ved å sette opp en formel for sammenhengen mellom det elektriske signalet og tøyningen.

### 4.3 Strekkklappers nåværende bruksområder

Strekkklapper brukes i dag både i industrimåleinstrumenter, overvåkningssystemer og i billige måleapplikasjoner til det private marked. Her ses det på noen utvalgte eksempler som er tilgjengelige på markedet.

#### 4.3.1 Renishaw MP250 måleprobesystem for datastyrt maskiner

Dette er et måleprobesystem med meget høy nøyaktighet som skal tåle mye. Proben kobles via en styreboks mot maskinkontrolleren. Selve strekkklappmålingen i dette probesystemet gjøres inne i den store sylindere i toppen. Der inne sitter det strekkklapper som greier å måle  $0.25\mu\text{m}$  nede sideveis på den røde kule og  $1\mu\text{m}$  i probens senterakse. Mer informasjon om dette produktet finnes på Renishaw sine hjemmesider: [www.renishaw.com](http://www.renishaw.com).



Figur 11: MP250

#### 4.3.2 Overvåkning

Flere bil- og tog-broer har overvåkningssystemer. Her brukes gjerne strekkklapper til å måle både strekk og lavfrekvent vibrasjon i utvalgte elementer av broen. Dette er store strekkklapper som sveises eller limes fast. Huey P. Long broen i Louisiana er et godt eksempel på dette. Det finnes mer informasjon om denne broen på [www.timedla.com](http://www.timedla.com). Broer ligger langt utenfor det denne rapporten omhandler, derfor er Robotis Research et bedre eksempel. De bygger avanserte roboter med strekkklapper som sier fra om roboten løfter for tungt, slik at en kan unngå unødvendig slitasje på motorsystemet. De har også implementert strekkklapper i griperne for å måle gripekraft. Robotics Researchs produkter brukes av blandt annet NASA og Ford. At strekkklapper blir brukt i både små og store systemer er selskapet MEIC, [www.meic.com](http://www.meic.com), et godt eksempel på. De jobber til daglig med både holdbare systemer og test-systemer innen mange forskjellige felter hvor strekkklapper brukes.

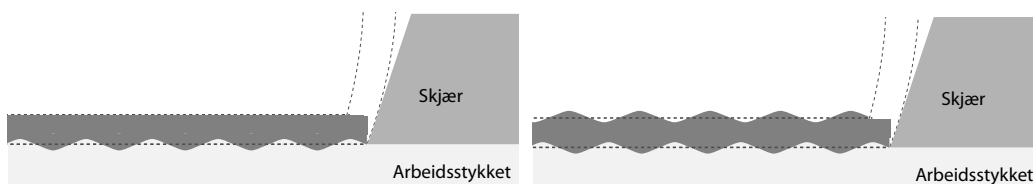
#### 4.3.3 Vekter

I mange baderomsvekter brukes strekkklapper som måleelement. Det finnes et utvalg av muligheter når en skal lage en slik applikasjon. Vektene er som oftest veldig enkle i sin oppbygning og tåler relativt mye. Samtidig er de billige å produsere. Det samme prinsippet brukes når en skal veie en bil eller en trailer. Firmaet TruckWeight har laget et system der strekkklappene er festet på en plate som ettermonteres til traileren, dette gjør at en kan følge med på lasttyngden mens en laster traileren.

## 5 Dempede borstenger

### 5.1 Vibrasjoner i verktøymaskiner

Vibrasjoner med stor amplitude er noe en prøver å unngå i verktøymaskiner, da vibrasjonene gjerne fører til sperringer, slitasje på maskinen og meget dårlig overflate på arbeidsstykket. I figur 12 ser man hvorfor overflaten kan bli dårlig og utarte seg til å bli verre. Til høyre på figuren vises kutt nummer to. Ønsket kutt er markert med striplet linje langs arbeidsstykket, mens faktisk kutt er markert med en mørk gråtone. Ovenfor dette ses sponet som går ut av prosessen med striplet linje. Denne operasjonen vil få meget store belastnings-svingninger, som er uønsket. Hvis man tenker på en lang borstang vil man lett kunne se for seg at den kan bøye ut og ned fra arbeidsflaten. En mulig måte å løse dette på er aktiv dempning.



Figur 12: Overflate som kan oppstå på grunn av vibrasjoner.

det er i alt tre hovedtyper innenfor svingninger i en verktøymaskin, F. O. Rasch [2010]:

#### 5.1.1 Frie svingninger

Ved et slag eller annen kortvarig kraftpåvirkning vil deformasjon i maskin eller verktøy føre til svingninger som er like den en kan finne i et masse-fjær-demper-system. Masse-fjær-demper-systemer er nærmere forklart i kapittel 14-4 i Tipler [2004]. Senere i oppgaven vil det gjøres tester med slag mot borstangen der denne typen svingninger satt i søkelyset.

#### 5.1.2 Påtrykte svingninger

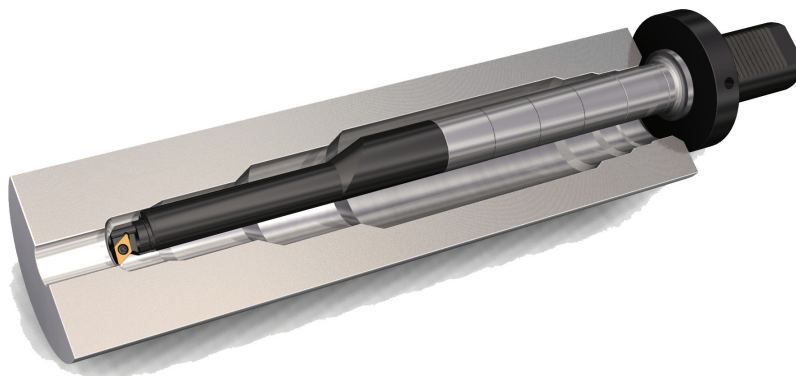
Påtrykte svingninger vil oppstå når en periodiske kraft som ligger innenfor en fast og lav frekvens blir påført systemet. Slike svingninger kan føre til store problemer om de oppstår nære egenfrekvensen til systemet. Disse svingningene lager ofte en lav dur. Ytre vibrasjoner kan også påføre systemet disse svingningene.

#### 5.1.3 Selvgenererende svingninger

Samspillet mellom verktøymaskin og den sponfraskillende enheten kan føre til sperringer, som gjerne skjer ved høye frekvenser. Det vil da oppstå bevegelser relativt mellom arbeidsstykket og skjæret. Innen dreining kan disse svingningene skje i alle retninger relativt til skjæret, noe som i alle tilfeller vil føre til en bølgede overflate, som vist i figur 12. Amplituden på en slik svingning vil i sitt mest ekstreme føre skjæret helt ut av arbeidsstykket, men der får det ingen påtrykt kraft, som betyr at dette blir maksimalt utslag.

## 5.2 Passiv dempet borstang

En solid borstang uten opplagring vil vanligvis ikke kunne være lengre enn fire ganger diameteren. Blir den lenger vil en fort oppnå nedbøyning, vibrasjoner, dårlig overflate og dermed gjerne dimensjonsavvik. Teeness i Trondheim har utviklet en metode med passiv dynamisk vibrasjon absorpsjon, hvor man kan oppnå større forhold mellom lengde og diameter enn 4. De leverer nå borstenger for opptil femten ganger diameteren. Vibrasjoner kommer av raske dynamiske krefter i skjæreplassen. Den dynamiske påvirkningen av borstangen kan utlignes med større statisk stivhet, større dynamisk stivhet og reduserte krefter.



Figur 13: Teeness skreddersydd passiv dempet borestang. Her med tykk bakende bygd av hardmetallringer for forbedret statisk stivhet. Illustrasjon: Sandvik SilentTools-katalog

### 5.2.1 Statisk stivhet

Større statisk stivhet får en ved å velge en verktøyholder med så stor diameter som mulig. Det skal også sies at dette er grunnen til at en ofte velger en rund stang, da en utnytter volumet og dermed også arealmomentet til sitt fulle ved å ha stangen slik. For å få et bedre inntrykk av statisk stivhet kan man se på figur 14 hvor det er gjort et estimat på utbøyning etter forholdet lengde /diameter. Stengene er 10mm i diameter og 40, 100, 120 og 160mm lang. Man ser en enorm forskjell i den statiske utbøyningen som vist i tabell 2.

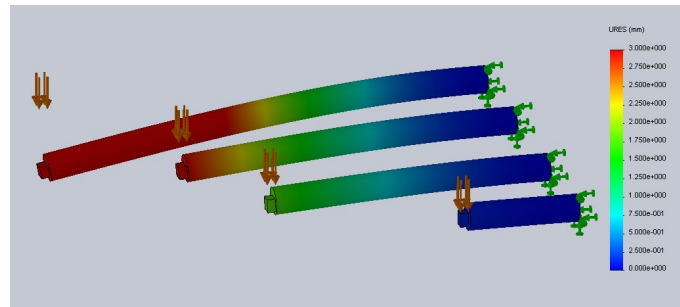
$\frac{\text{Stanglengde}}{\text{Diameter}} \left(\frac{L}{D}\right)$	Nedbøyning i ytterkant, mm	$\frac{\text{Nedbøyning}}{4\frac{L}{D}}$
4	0.12mm	1
10	1.74mm	14.5
12	2.99mm	24.9
16	7.04mm	58.7

Tabell 2: Nedbøyning fra FEM-analyse

### 5.2.2 Dynamisk stivhet

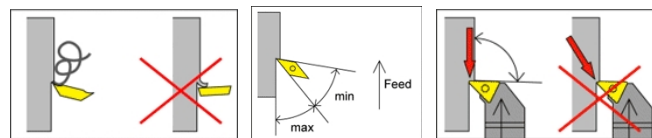
Dynamisk stivhet vil i borstenger først og fremst bli påvirket av fluktuerende krefter under løsriving av spon fra arbeidsstykket. For å øke den dynamiske stivheten må skjærappsettet være riktig, slik at man kan få tynne kutt med så lave krefter på skjæret som mulig. En vil





Figur 14: FEM-analyse av statisk nedbøyning

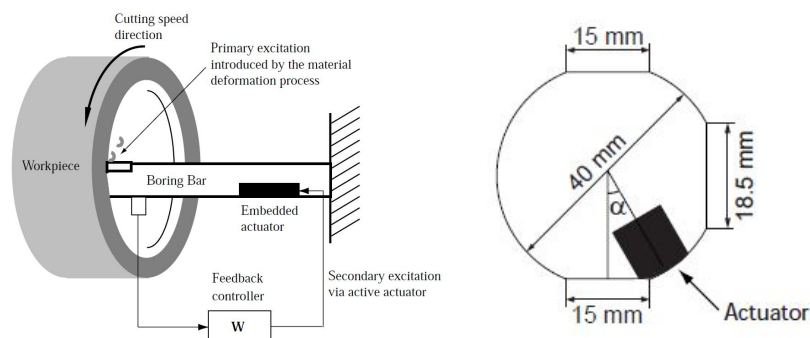
gjørne prøve å holde kreftene langs verktøyholderens akse som vist i figur 15. På denne måten minker en påvirkningen i de andre aksene, noe som gjør at utsvingningene i X og Y blir mindre.



Figur 15: Riktig belastning av verktøyholder, illustrasjoner fra [www.teeness.no](http://www.teeness.no).

### 5.3 Aktiv demping med aktuator

Andren [2003] har bygd et system hvor en aktuator utvider seg etter målte vibrasjoner i borstangen. Denne metoden krever et akselerometer, en kontrollboks og en aktuator. Bortsett fra dette trengs det ingen større investeringer. Systemet greide å redusere vibrasjonene såpass betraktelig at det må sies å være et vellykket forsøk på å lage en aktiv dempet borstang. Den statiske stivheten til stangen vil i dette tilfellet bli mindre, da det er frest ut en grop i stangen hvor aktuatoren blir plassert. Som man kan se på figur 16 er aktuatoren plassert i en vinkel der den jobber mot begge de store kreftene fra skjæret.



Figur 16: En innebygd aktuator trykker motfase mot vibrasjoner

## 6 Systembygging

Systemet bygges på grunnlag av en stor borstang som trenger sensorer for utbøyning og vibrasjon. Prosjektet skal på grunnlag av et tidligere prosjekt omhandle strekkklapper og deres mulighet til å plukke opp vibrasjoner i borstangen. I første omgang skal det bygges et billig system for uttesting av ideer og for å se hvilke deler av systemet som trenger mer ressurser. Parallelt med denne byggingen skal det også gjøres tester med LabView, hvor alle deler er kjøpt inn fra National Instruments og HBM. LabView-systemet vil også kunne gi svar på hvilke restriksjoner og muligheter som finnes med henhold til hastighet, da man kan utføre forsøkene med en målehastighet på 50kHz. Alle strekkklapper i prosjektet er levert av HBM, og er omtalt i kapittel 4.

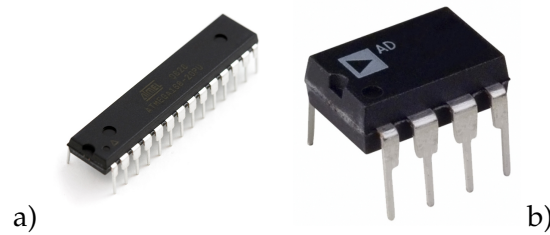
### 6.1 LabView systemet

For å teste hvilke muligheter og begrensninger et strekkklappsystem har for å utvikles til et kommersielt system for borstenger, brukes en måleblokk fra National Instruments. Denne blokken kan via en ekspress-blokk i LabView benyttes til å innbringe digital data med 24 bit oppløsning. Det vil si  $2^{24} = 16777216$  forskjellige tall kan oppnås. Samtidig har systemet en målehastighet på hele 50kHz. For at systemet skal fungere skikkelig trengs det informasjon om strekkklappens målekonstant (GF). Deretter kan det måles initiell spenning og i samme sekvens gjøres en parallell-kalibrering.

### 6.2 Elektriske komponenter

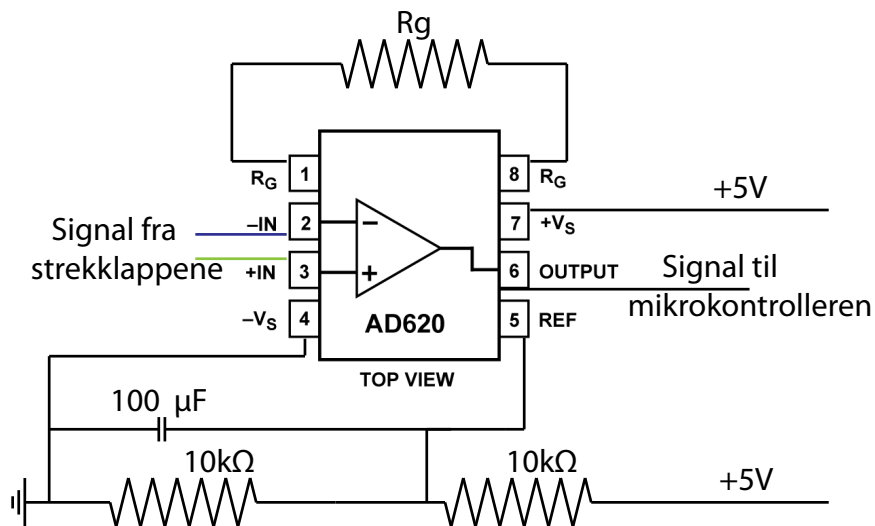
Som nevnt i oppgaven burde det ses på alternative løsninger for denne typen overvåkning. Man har sett fra tidligere forsøk at det er enkelte kriterier som burde oppfylles, slik som regnekraft og hastighet. Først trengs en introduksjon av komponenter som skal tas i bruk. Hvis leser trenger ytterligere informasjon om enkle komponenter kan en lese mer om dette i Platt [2009]. Make Magazine har også flere Youtube-klipp som omhandler både historie og enkle eksperimenter med de forskjellige komponentene.

**Mikrokontroller:** En mikrokontroller er en prosesseringsenhet med diverse funksjonsblokker, slik som analog til digital konverter, lager og inn-ut-enheter. På grunn av dette trenger en mikrokontroller færre tilleggskomponenter enn en mikroprosessor for å utgjøre et komplett system. Atmega168 og Atmega328P benyttes i dette prosjektet. Den første av de to kan kjøpes i enkle pakker til under 5\$. Den andre kan også anskaffes til nesten samme pris. Mikrokontrolleren har en innebygget analog til digital konverter på 10-bit som kan klokkes med en hastighet på 115200Hz. Dette gir en oppløsning på  $2^{10} = 1024$ , og en absolutt maksimal hastighet på  $115200\text{Hz}/10 = 11520\text{Hz}$ . Det vil nok ikke være mulig å kunne oppnå denne hastigheten, mye på grunn av overføringshastigheten til PC som vil kreve de ti bitene pluss start- og stopp-bit. 1024 i oppløsning er meget lite. For å kunne utnytte dette skikkelig burde Wheatstone-broen være perfekt balansert. Dette gjør at man kan forsterke akkurat det signalet man trenger. Som et eksempel kan man si at maksimal utbøyning er 1,3mm. Dette betyr at man kan måle hver  $1,3\text{mm}/1024 = 0,00127\text{mm}$ , men dette blir vanskelig å få til da målebroen ikke burde ha et nullavvik for å klare dette optimale resultatet. Selv om man vet at systemet er for dårlig kan det likevel være interessant å teste ut prinsippene bak slike målinger.



Figur 17: a) Mikrokontroller: Atmega168 b) Forsterker: AD620

**IC-forsterker:** Strekkloppene skal gjerne måles med så lav spenning og strøm som mulig i forhold til de toleranser en setter for systemet, da strekkloppene kan oppvarmes ved høy intensitet og dermed gi målefeil. Dette betyr at man trenger en forsterker til å forsterke signalet som eventuelt skal tilbake inn til en mikrokontroller-port. Forsterkeren som benyttes i dette prosjektet er en liten integrert krets som kan forsterke et signal 10000 ganger. En slik forsterker koster under 4\$, derfor ble det kjøpt inn en forsterker fra Analog Devices: AD620 og en fra Burr-Brown: INA129p. I følge deres spesifikasjoner skal det ikke ha noe å si hvilken av disse en tar i bruk, men det er greit å ha litt redundans om en av de to nevnte skulle bli ødelagt. Senere i rapporten blir disse omtalt som *F*.



Figur 18: Oppkobling av forsterker

**Seriell TTL til USB** For å lagre data i flashminnet og for kommunikasjon med dataskinen trengs en seriell TTL til USB konverter. TTL står for Transistor-Transistor Logikk. Denne typen logikk brukes i mikrokontrollere for kommunikasjon. Med denne typen adapter vil man da kunne kommunisere fra mikrokontroller til PC og også programmere mikrokontrolleren.

**Krystallen:** Krystallen kan kalles en svingningsgenerator og er en kvartsbasert svingningsklokke som avgjør hvor fort en prosessor arbeider. Altså hvor raskt den er klokket. I dette prosjektet velger man en krystall med 14.7456 MHz, da man vet at maks seriell overføringshastighet er 115200 Ba/s og at analog til digital konverteren også kan kjøres opp på 115200Hz. En utregning viser at  $14745600/115200 = 128$ . Dette betyr at klokkefrekvensen for mikrokontrolleren stemmer overens med de indre systemene. Som man vil se på Arduinoen er det ikke farlig å gå opp i klokkefrekvens, men som man kan se av tabell 19-11 og 19-12 på side 196-197 i ATmega168 databladet, vil 20MHz gi en feil på -1,4%. Toleransen til systemet er 5% feil i baud-hastigheten som da 20MHz er innenfor, men for å være på den sikre siden velges en klokkefrekvens som passer perfekt til kontrolleren.

**Kondensator:** En kondensator står for elektrisk kapasitans og hjelper ofte en likestrømskrets med å bli mer stabil. Den vil også gjøre at likestrømskretsen får en myk start og slutt. En kondensator består av to elektrisk ledende plater som er rullet sammen med isolasjon mellom. Symbolet for kondensator er vist i figur 19



Figur 19: Symbol for kondensator

**Resistor/elektrisk motstand:** En resistor eller motstand begrenser effekten av elektrisk strøm som kan gå i kretsen. Hvis en regner på størrelsen til en motstand bruker en gjerne ohms lov som kan sees i formel (6.1) og en utledning av Joule's lov som vises i formel (6.2). Dette er relativt enkle og allment kjente formler som det ikke går nærmere inn på. Mer informasjon kan finnes i Platt [2009] om nødvendig. Symbolet for motstand er i oppgaven også brukt for strekkklapper. Strekkklappers symbol er ofte brukt som en motstand med pil over, for å vise at dette er en variabel motstand.

$$U = R \times I \quad (6.1)$$

$$P = U \times I \quad (6.2)$$

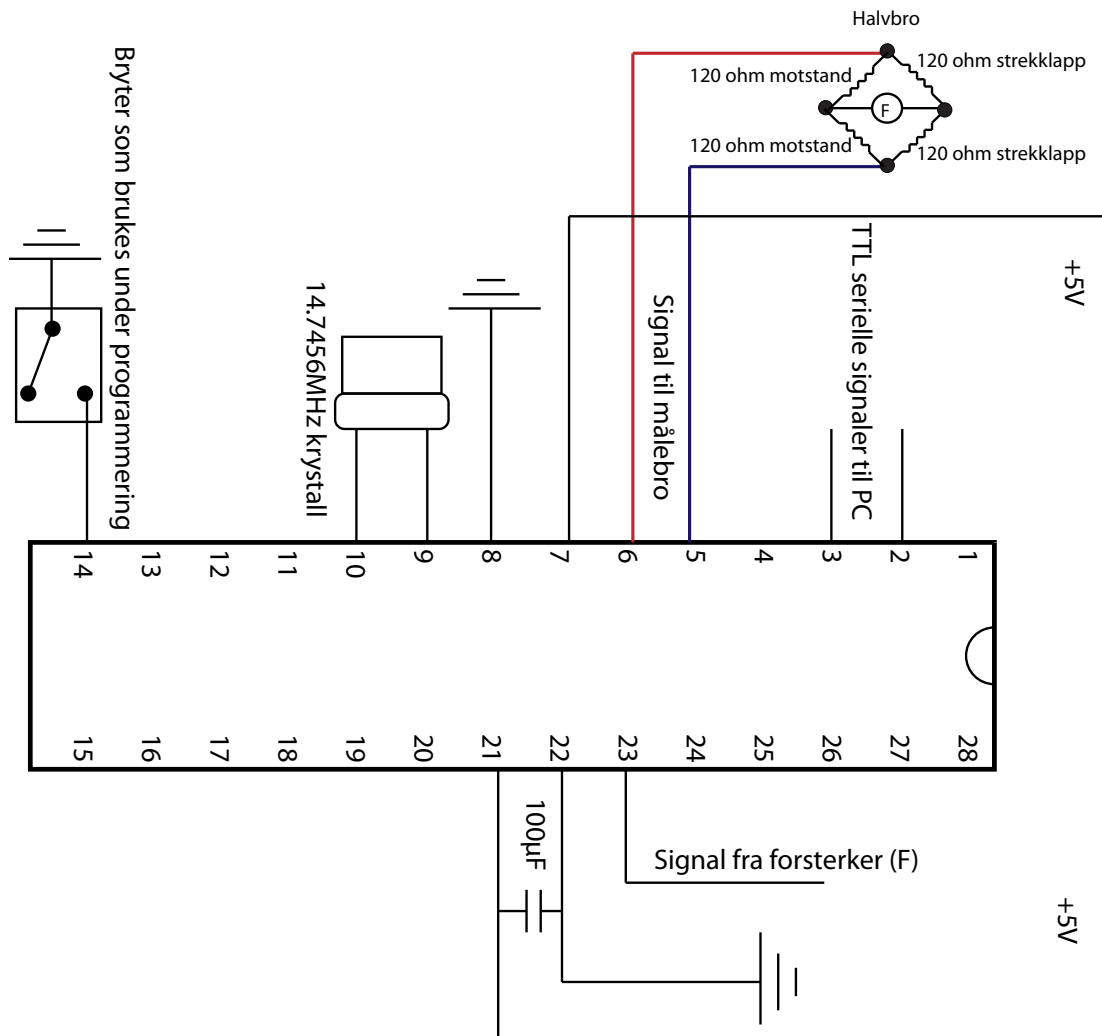


Figur 20: Symbol for resistor

### 6.3 Mikrokontroller-system bygd med integrerte kretser på hurtig-koblingskort (engelsk: breadboard)

Mikrokontrolleren er flashet med en bootloader med navn foodloader.

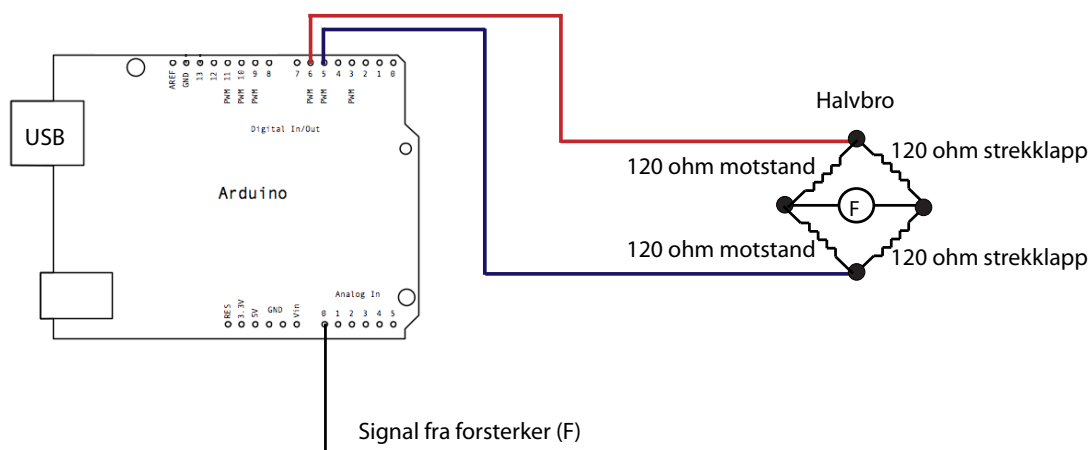
Lenke: <http://github.com/ffd0/foodloader>. Programmeringskoden finnes i Vedlegg 5. Legg merke til at man skifter polaritet i utsignalet til målebroen for å oppnå det samme som i ligning (7.1). Dette betyr at man bruker sender et målesignal per to målesignaler som analog til digital konverteren gir fra seg. Fra figur 23 ser man hvordan mikrokontrolleren ble koblet på et hurtig-koblingskort. Ut fra mikrokontrollerens datablad har man funnet hvilke porter som burde brukes. Strømmen kommer fra seriell-signalet, der en har to signalkabler, en jordingskabel og en +5V kabel.



Figur 21: Koblingsskjema av mikrokontrolleren atmega168p

## 6.4 Arduino

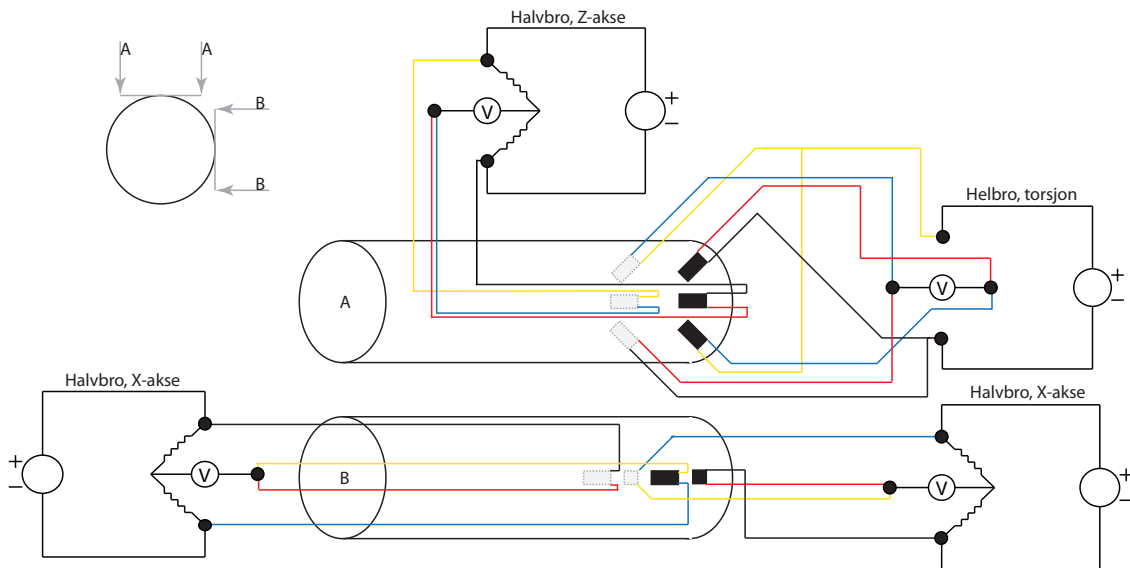
I testene ble det brukt en Haceduino, som er en uoriginal Arduino. Denne kontrolleren er så godt som lik den originale Arduinoen, da programmet og hardware-løsningen er open-source. Arduinoen får strøm og signaler igjennom USB-kabelen. Som man ser ligner systemene hverandre, men Arduinoen er mer "plug and play" enn systemet som er bygd av integrerte kretser, og vil på den måten lettere vise de viktige koblingene opp mot målebroen.



Figur 22: Koblingsskjema for Arduino

## 6.5 LabView

Fra strekklossene ble det lagt opp ledninger til adaptere. Et adapter per målebro. Siden det var påtenkt å gjøre en test der man sammenlignet stor og mindre strekkloss var det ikke grunn til å bruke mer enn tre adaptere. Disse adapterene ble festet til borstangen så nære strekklossene som mulig. Lengre ledninger ble loddet på de strekklossene som hadde for korte ledninger, og det ble gjort enkle tiltak for å unngå støy. Slike tiltak var skjermede eller tvinnede ledninger der det var mulig og så korte ledninger som det var praktisk mulig å få til. Fra adapterene ble det brukt RJ-50 ledninger. Disse var hadde i starten veldig varierende motstand i tilkoblingspunktene, men med litt elektronikk-oppløsnings-spray (for å oppnå rene overflater) bedret situasjonen seg noe. Da vil skulle kutte systemet ned fra tre til to målebroer forskjøv signalene seg betraktelig. Siden kontrolleren inne i måleblokken trolig bruker én ADC til å utføre konverteringer ser det da ut til at signalene til en viss grad påvirker hverandre, dette er uønsket men vanskelig å gjøre noe med. På grunn av dette ble det valgt å alltid ha torsjons-broen tilkoblet, slik at man slapp unna ekstra innstillinger. Allerede her kan man se at det kan være lurt å ha adskilte ADCer i et fremtidig system.

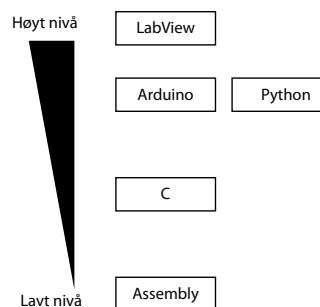


Figur 23: Koblingskjema for LabView-system

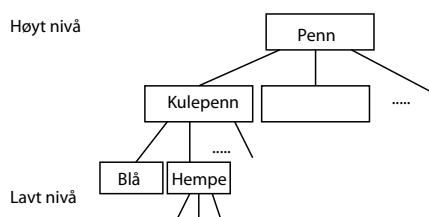
## 7 Programmering

### 7.1 Introduksjon til aktuelle programmeringsspråk

Programmeringsspråk deles gjerne opp i høyt og lavt nivå. I lavere nivå programmering må programmet spesifisere flere tekniske detaljer, slik som minne-allokering og initiering. Dette betyr at det er enklere å programmere på høyt nivå, men at en gjerne skaper mye unødvendig kode som gjør at systemet blir tregere og noen ganger mindre stabilt. Man kan forklare hvordan dette virker ved å se på en penn. Du kan spørre etter en penn ved å si at du trenger en penn, eller du kan gå på et lavere nivå å si at du trenger f.eks. en kulepenn, rørpenn eller filtpenn. Deretter kan du gå på et lavere nivå å spesifisere med hempe og generell form og farge. I denne oppgaven har det blitt brukt både C, Python, Arduino og LabView. Figur 24 viser en enkel illustrasjon hvilke nivå de forskjellige programmene tilhører i forhold til hverandre.



Figur 24: Nivå, programmeringsspråk



Figur 25: Penn spesifisering

#### 7.1.1 Assembly

Assembly er en grunnleggende symbolsk representasjon av maskinkode og er derfor sett på som det laveste nivå programmeringsspråk bortsett fra ren maskinkode. Dette betyr at denne typen programmering ofte ikke kan brukes i enheter fra annen produsent eller klasse uten å gjøre relativt store forandringer. Programmeringen følger altså en spesifikk maskinarkitektur. Dette høres ut som en negativ egenskap, men det finnes gode grunner til at programmeringen skal være spesifikk. Dette gir nemlig en liten og lett maskinkode, noe som øker hastighet og stabilitet. Problemet med å bruke assembly-programmering i dette prosjektet er den komplekse problemstillingen mikrokontrolleren skal løse. Det er mulig å bruke assembly, det er valgt å unngå språket på grunn av den komplekse koden som må tilordnes. Mer om assembly-programmering og optimalisering av denne koden finnes i Lien [1995].



### 7.1.2 C

C kan også brukes på lav-nivå programmering, men vil i stor grad kunne brukes på et høyere nivå enn Assembly. C har i mange tilfeller overtatt Assemblys plass som lav-nivå språk på grunn av dette. C kommer i forskjellige dialekter på grunn av forskjellige bruksområder og støtte av programmer. Dette skal man i denne sammenhengen ikke tenke på, da det skal lages en enkel kode for en mikrokontroller. [www.howstuffworks.com/c.htm](http://www.howstuffworks.com/c.htm) er en god kilde til informasjon om C programmering.

### 7.1.3 Arduino, [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)

Arduino er et mye brukt og anerkjent prototype-verktøy for såkalte innebygde systemer, eller "embedded systems" som det kalles på engelsk. Hardware består av en 8-bit mikrokontroller med et "RS-232 til USB"-adapter. Fra mikrokontrolleren finnes det slotter der det enkelt kan kobles inn hel-ledere fra diverse utstyr. Som software kommer mikrokontrollerne med en ferdiglastet 2kB bootloader. Denne gjør at det er mulig å bruke den gratis programmereren som lastes ned til en pc. Via en enkel USB-tilkobling kan Arduino-kortet kobles opp mot en PC. Programmeringsspråket er en videreutvikling med grunnlag i C og C++. Språket er bygd opp av store biblioteker med makroer for å være enkelt og raskt forståelig for en ikke-programmerer. Vanlig C og C++ kan også benyttes til å programmere Arduinoene. Arduino er åpen kildekode både for privatpersoner og bedrifter. Banzi [2009] beskriver bruken av Arduino som prototypeverktøy. Det finnes også mye informasjon om programmeringsspråket på diverse forum og firmaets egen hjemmeside.



Figur 26: Arduino

### 7.1.4 Python

Python er et høy-nivå programmeringsspråk som kan brukes til mange applikasjoner. I dette prosjektet brukes det først og fremst til å lage en PC-applikasjon som kan mota og manipulere data fra mikrokontrolleren. Python har et stort utvalg tilleggspakker som også kan lastes ned gratis og installeres som påbygning. Python er åpen kildekode både for privatpersoner og bedrifter. For å få en rask og god gjennomgang av hvordan python-programmering fungerer kan Swaroop [2003] anbefales, ellers finnes det også mye informasjon på internett.

### 7.1.5 LabView

**(Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench)** LabView er et visuelt programmeringsspråk der en bygger opp et blokkdiagram og et kontrollpanel. Blokkene kobles sammen med strenger slik at programmeringen blir visuell. Programmet blir da av et så høyt nivå at den som programmerer egentlig ikke trenger å kunne et ord programmering. Bak en blokk kan det gjerne ligge mange blokker som utfører en av funksjonene som trengs. Programmet opererer også med grafiske while- og if-løkker. Programmeringsspråket er laget av National Instruments. National Instruments selger også mye tilbehør og ekstrapakker, men produktene har gjerne en høy pris. For mer informasjon om LabView-programmering anbefaler jeg boken Essick [2009]

## 7.2 Programmering og test med Arduino

Som nevnt er arduinosystemet veldig enkelt å forstå. Derfor ble det satt i gang et forsøk for å se om og hvor fort det var mulig å overføre signaler fra Arduino-kortet til en PC. Tanken med dette var at det senere kunne være aktuelt å øke de parametrene som man vet Arduino er dårlig på. Dette betyr både overføringshastighet, klokking og ADC-oppløsning og -hastighet.

Analog til digital konverteren i en Atmega328p er på 10bit dette betyr at man kan oppnå en oppløsning på  $2^{10} = 1024$ , mens spenningsforskjellen man kan måle er 5V. 5V er også spenningsforskjellen man kan oppnå når man sender signalet inn på målebroen. Dette betyr at signalet ut fra målebroen er veldig lite, mens mikrokontrolleren bare kan måle  $5V/1024 = 0,004883mV$ . Noe som betyr at signalet burde forsterkes. Dette er gjort ved å bruke forsterkerene som er nevnt tidligere i oppgaven. Legg merke til at programmet bytter polaritet på signalet inn i målebroen. Dette gjøres for å unngå elektromotorisk støy (EMK). La oss kalle målesignalet  $V_{ut}$ . Da vil utregningen se ut som i ligning (7.1), noe som betyr at  $2V_{ut} = V_{ut0} - V_{ut1}$ . Da polariteten er snudd fra 0 til 1 vil signalene være motsatt vendt i forhold til hverandre og nettopp derfor skal de subtraheres. Dette beskrives i A. Rydh [2009]. Programmet med forklaringer finnes i *Vedlegg4*.

## 7.3 Programmering og test system bygd med integrerte kretser

Dette systemet ble bygd for å se hvilken hastighet man kan oppnå i seriell kommunikasjonen mellom mikrokontroller og PC, da det var klart at Arduino-systemet trolig vil være tregere på grunn av programmeringsspråkets oppbygning. Det ble brukt TTL til USB til

overføring, og de samme prinsippene som er forklart i delen om Arduino. Programmet finnes i *Vedlegg5*.

## 7.4 Bruk av programmet Python for grafisk fremstilling

Programmene i *Vedlegg4* og *Vedlegg5* ble brukt i sammenheng med python-programmet i *Vedlegg3*. Siden overføringshastighet er et problem har man valgt å gjøre noen beregninger på mikrokontrolleren før overføring til PC. Denne utregningen gjøres for å unngå elektromotorisk støy (EMK som tidligere forklart. I starten oppstod det store problemer med overføring, da buffer-minnet i overføringen ble fylt slik at signaler ble overskrevet av andre signaler. Dette ble løst ved å prøve de eksakt samme kommandoene i det Linux-baserte operativsystemet Ubuntu. Feilen skyldes trolig en dårlig driver på PC-siden. Ved å omprogrammere python-programmet greide man å få skrevet ut hastigheten til de to enkle programmene. Dessverre ble dette programmet og filene det laget tapt da datasma-skinen som det var lagret på ble stjålet. Resultatene fra testen var nedskrevet, der man hadde en hastighet på ca.1420Hz fra Arduino-kontrolleren og en hastighet på ca.3655 Hz fra det hjemmelagde systemet. Grunnen til denne hastighetsforskjellen skyldes programmeringsspråkernes oppbygning som tidligere forklart.

$$V_{ut} = \frac{V_{ut0} - EMK_0 - (V_{ut1} - EMK_1)}{2} \quad (7.1)$$

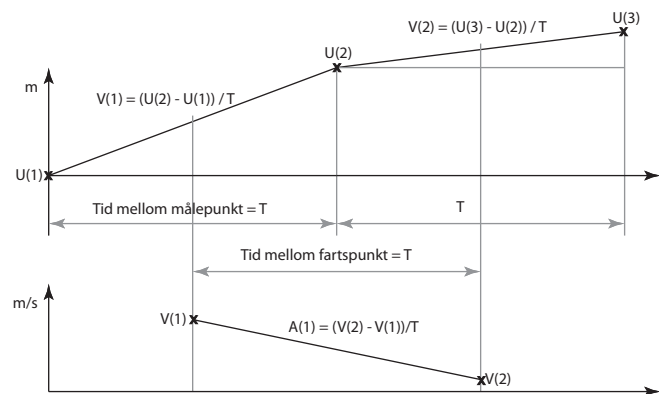
## 7.5 Programmering og test med LabView

LabView programmet ble konstruert slik at det var mulig å utnytte strekkloppene fullt ut ved å programmere grafisk. Måten å gjøre dette på er å bruke ferdiglagde ekspress-blokker med innebygde funksjoner som kunne tilpasses det enkelte system. Blokker og program er beskrevet i *Vedlegg3*.

## 8 Utvikling og illustrasjon av forsøk

### 8.1 Numerisk omregning fra strekk til vibrasjon

Tiden brukt på en måling er den inverse av målefrekvensen,  $\omega$ , som vises i ligning (8.1). Hvis en kaller bevegelseslengden til stangen mellom to målinger  $u_x$ , akselerasjonen i stangen  $A$  og tiden mellom de to målingene  $T$ , kan en gjengi akselerasjonen som en funksjon av  $u_x(n)$  og  $\omega$  som vist i ligning (8.5). Det er viktig å legge merke til at det her er snakk om numeriske data fra målinger på en fysisk modell.  $\frac{1}{T}$  er antall målinger pr. sekund:



Figur 27: Illustrasjon av akselerasjonsutregning fra numeriske måledata, der  $A$  er akselerasjon,  $V$  er fart og  $U$  er utslag/utbøyning.

$$T = \partial t = (1/\omega) \quad (8.1)$$

Farten  $v_x$ , er lik den deriverte av nedbøyningen  $u_x$ , som igjen kan skrives som forskjellen mellom to punkter av  $u_x$  delt på tidsintervallet  $T$ :

$$v_x = \dot{u}_x = \frac{\partial u_x}{\partial t} = \frac{u_x(n) - u_x(n-1)}{(1/\omega)} = (u_x(n) - u_x(n-1)) \times \omega \quad (8.2)$$

Akselerasjonen  $A$ , er lik den deriverte av farten  $v_x$ , som igjen kan skrives som forskjellen mellom to punkter av  $v_x$  delt på tidsintervallet  $T$ . Det trengs tre sammenlignende punkter av  $u_x$  for å finne et punkt av  $A$ . Se figur 27 for grafisk forklaring.

$$A = \ddot{u}_x = \dot{v}_x = \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial((u_x(n) - u_x(n-1)) \times \omega)}{\partial t} \quad (8.3)$$

$$A = (u_x(n) - u_x(n-1) - u_x(n-1) + u_x(n-2)) \times \omega^2 \quad (8.4)$$

$$A = (u_x(n) - 2u_x(n-1) + u_x(n-2)) \times \omega^2 \quad (8.5)$$

Dette kan forenkles hvis en ser for seg at svingningen i en stang er sinusformet:

$$(k \sin x) = \int (k \cos x) dx = - \int \int k \sin x dx \quad (8.6)$$

Forenklingen i ligning (8.6) er ikke god nok, da man må ta med frekvensendringer som igjen gir endringer i konstanten. Man må derfor se for oss systemet som et masse-fjær system:

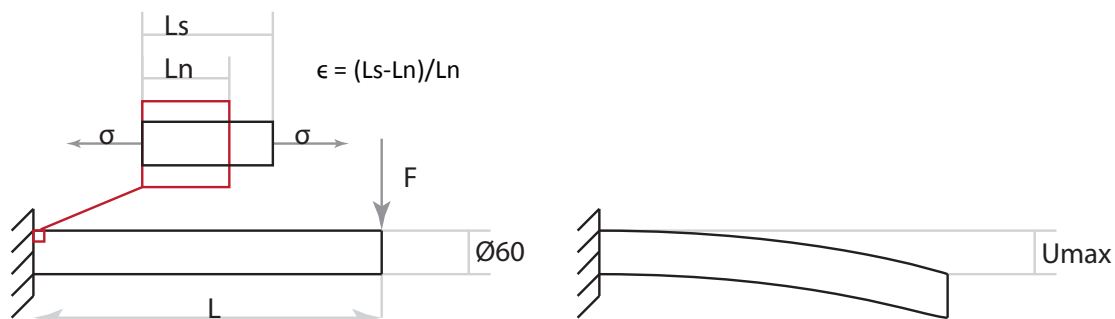
$$k \sin(\omega t) = k \int (\omega \cos(\omega t)) dt = -k \int \int (\omega^2 \sin(\omega t)) dt dt \quad (8.7)$$

Nå har man to ukjente, for både frekvensen,  $\omega$ , og konstanten  $k$ . Hvis man ikke har én klar egenfrekvens må man forandre frekvensen kontinuerlig for å oppnå ønsket resultat. For en dempet borstang vil systemets frekvens være uklar i forhold til egenfrekvenser, og derfor forkaster man denne metoden.

## 8.2 Innstilling av strekkklapper

For å stille inn strekkklappene trenger man noen enkle mekanikk-formler. Her skal det ses på utregningene og grunnlaget for videre programmering i forhold til test-kjøring og utvikling av systemet. Først kan man starte med X- og Z-aksen for å se på torsjonsutregningene.

Både X- og Z-akse forenkles slik at man har en kraft virkende normalt på akseplanet. Dette er vist i figur 28.



Figur 28: Borstang forenklet til bjelke med kraft på enden.

Ligning (8.9) viser det annet arealmoment av en sirkulær bjelke, mens ligning (8.10) viser moment i bakre del av en utkragerbjelke med punktkraft på enden. Ligning (8.8) viser maksimal utbøyning,  $U_{max}$ , av den samme bjelken. Disse ligningene finnes i appendiks D i Irgens [1999b]. Videre tar vi for oss bjelkens tverrsnittsmodul i ligning (8.11) og ser at minimum oppnås ved  $h = r$ . Dette brukes videre i ligning (8.12) fra Irgens [1999b] s. 217 for å bestemme maksimal bøyespenning i stangen. I ligning (8.12), som er fra av Hookes lov, vet man at tøyning er en funksjon bøyespenning og E-modul. Ligning (8.14) blir da en sammensetning av ligning (8.12) og ligning (8.13). Til slutt settes ligning (8.8) inn i ligning (8.14) og ender opp med ligning (8.15). Man ser at  $\epsilon$  og  $U_{max}$  er de eneste variablene i sluttlikningen som viser at utbøyningen av borstangen er proporsjonal med tøyningen innerst ved innspenningsflaten. Forøvrig er det ikke farlig om strekkklappen flyttes frem, da det bare vil føre til en ny konstant i regnestykket.

$$U_{max} = \frac{FL^3}{3EI} \quad (8.8)$$

$$I_y = I_x = \frac{\pi r^4}{4} \quad (8.9)$$

$$M = FL \quad (8.10)$$

$$W = \frac{I}{h} \Rightarrow W_{min} = \frac{\pi r^4}{4} \times \frac{1}{r} = \frac{\pi r^3}{4} \quad (8.11)$$

$$\sigma_{max} = -\frac{M}{W_{min}} = \frac{4FL}{\pi r^3} \Leftrightarrow F = \frac{\sigma_{max} \pi r^3}{4L} \quad (8.12)$$

$$\epsilon_{max} = \frac{\sigma_{max}}{E} \Leftrightarrow \sigma_{max} = \epsilon_{max} E \quad (8.13)$$

Ligning (8.12) + ligning (8.13):

$$F = \frac{\epsilon_{max} E \pi r^3}{4L} \quad (8.14)$$

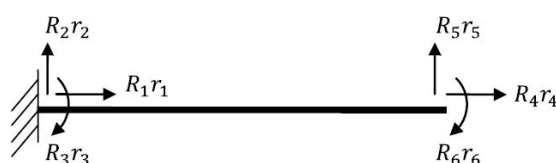
Ligning (8.8) + ligning (8.14) + ligning (8.9):

$$U_{max} = \frac{\frac{\epsilon_{max} E \pi r^3}{4L} L^3}{3EI} = \frac{\epsilon \pi r^3 L^2}{12I} = \frac{L^2}{3r} \epsilon = k \epsilon \quad (8.15)$$

-

### 8.3 FEM-analyse av forenklet borstang

FEM står for Finite Element Method og er et sterkt verktøy for utregning av et systems muligheter og begrensninger. Dette er en metode som egner seg meget godt til datamaskiner, da den ofte krever ekstremt mange kalkulasjoner og gir ekstremt mange svar. Grunnen til dette er at konstruksjoner og systemer deles inn i nett. Dette nettet kan være bygd opp på flere måter, men vil alltid inneholde noder som kobler sammen elementer. Nodene er altså knutepunktene mellom elementene. Bruksområdet til denne typen simulering er derfor enorm. I vårt forsøk skal det ses på nedbøyning og egenfrekvens som de to viktigste egenskapene i en belastet borstang. For enkelhets skyld spennes borstangen inn som en utkragerbjelke. I figur 29 vises det hvilke frihetsgrader et system med ett element har. Her er  $\mathbb{R}$  lastvektor og  $\mathbf{r}$  forskyvningsvektor og  $\mathbb{K}$  stivhetsmatrisen. Ligning (8.16) beskriver systemligningen til ett element, og vil brukes til videre utregninger.



Figur 29: Frihetsgrader for nodene til ett element

Man ser at  $r_5 = -U_{max}$  fra ligning (8.8). For å vise at elementmetoden fungerer kan d finne denne gitte formelen.

$$\mathbb{R} = \mathbb{K}\mathbf{r} \Rightarrow \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \\ R_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EI}{L} & 0 & 0 & -\frac{EI}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 12\frac{EI}{L^3} & -6\frac{EI}{L^2} & 0 & -12\frac{EI}{L^3} & -6\frac{EI}{L^2} \\ 0 & -6\frac{EI}{L^2} & 4\frac{EI}{L} & 0 & 6\frac{EI}{L^2} & 2\frac{EI}{L} \\ -\frac{EI}{L} & 0 & 0 & \frac{EI}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -12\frac{EI}{L^3} & 6\frac{EI}{L^2} & 0 & 12\frac{EI}{L^3} & 6\frac{EI}{L^2} \\ 0 & -6\frac{EI}{L^2} & 2\frac{EI}{L} & 0 & 6\frac{EI}{L^2} & 4\frac{EI}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ r_5 \\ r_6 \end{bmatrix} \quad (8.16)$$



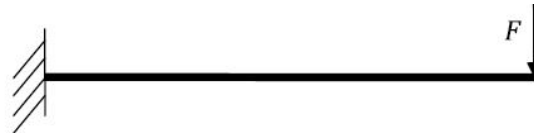
Figur 29 viser lasten på bjelken. Dette gjør at  $R_5$  blir  $-F$ , mens resten av  $\mathbb{R}$  blir 0. Stivhetsmatrisen vil endre seg betraktelig da den ene noden er fast innspent.

Fra formler i Irgens [1999b] finner vi disse stivhetsbetingelsene, som derfra kan settes direkte inn i stivhetsmatrisen:

$$R_4 = \left(\frac{EI}{L}\right) r_4$$

$$R_5 = \left(12\frac{EI}{L^3}\right) r_5 + \left(6\frac{EI}{L^2}\right) r_6$$

$$R_6 = \left(6\frac{EI}{L^2}\right) r_5 + \left(4\frac{EI}{L}\right) r_6$$



Figur 30: Utkragerbjelkens last

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -F \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{EI}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 12\frac{EI}{L^3} & 6\frac{EI}{L^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6\frac{EI}{L^2} & 4\frac{EI}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ r_5 \\ r_6 \end{bmatrix} \quad (8.17)$$

Hvis man skal finne  $U_{max}$  fra denne matrisen må man sette opp ligningene man får ut av ligning (8.17):

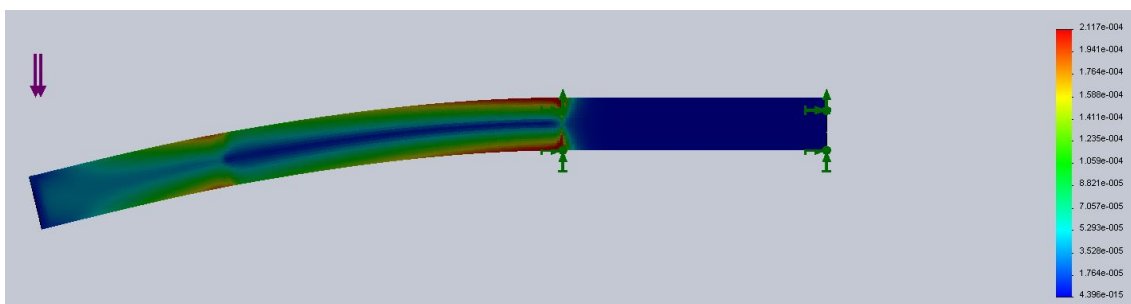
(1)	$0 = r_4 \frac{EI}{L} + 0r_5 + 0r_6 \implies r_4 = 0$
(2)	$-F = 0r_4 + r_5 12\frac{EI}{L^3} + r_6 6\frac{EI}{L^2} \implies r_5 = -F \frac{L^3}{12EI} - r_6 \frac{L}{2}$
(3)	$0 = 0r_4 + r_5 6\frac{EI}{L^2} + r_6 4\frac{EI}{L} \implies r_6 = -\frac{3}{2L} r_5$
(2) + (3)	$r_5 = -\frac{FL^3}{3EI}$

Man ser altså at en slik enkel bruk av elementmetoden fungerer bra ved at resultatet stemmer overens med gitte ligninger. Det finnes derimot flere problemer med tredimensjonal FEM-analyse, som kan føre til små beregningsfeil. Dette beskrives i "Elementmetoden; En innføring" av Åge Ø. Waløen. Dette er et kompendium i tre deler som er beregnet på faget "Dimensjonering GK" på NTNU.



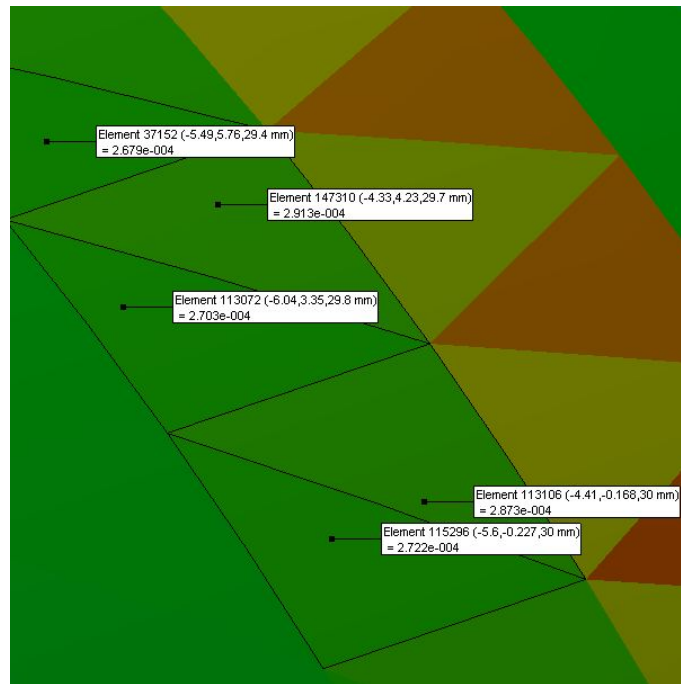
Figur 31: Den forenklede borstangen som det er gjort analyser på.

Den forenklede stangen var innspent slik at 600mm raget ut mot en kraft vist med lilla piler i figur 31. Stangen var  $\text{\O}60\text{mm}$  og det gjennomgående hullet  $\text{\O}21\text{mm}$ . De andre målene kan finnes i vedlagt CAD-modell. Simulering som ble gjort i Solidworks med fast innspent bakre del ga maks tøyning i bakre del på  $2,434 \times 10^{-4}$  og en utbøyning i frontpartiet på  $1268\mu\text{m}$  når stangen ble belastet med  $2000\text{N}$  i tuppen normalt på aksial retning (som en utkragerbjelke). Denne analysen ble gjort for å se om innspenningsmetode har noe å si for tøyningen i bakre del. Ved innspenning som som vist i figur 31 og figur 32, altså hvor stangen klemmes fast, vil tøyningen øke til rundt  $2.8 \times 10^{-4}$  med en nedbøyning på  $1268\mu\text{m}$  i tuppen. Dette er trolig det resultatet som vil oppnås fra våre tester.



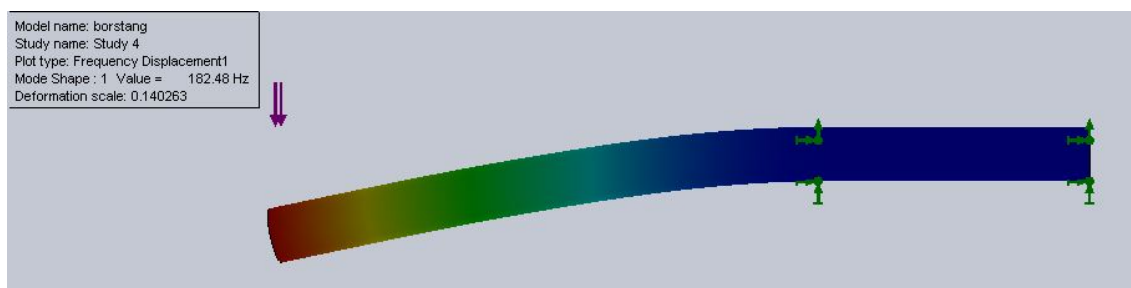
Figur 32: Forenklet analyse av borstang med  $2000\text{N}$  på enden.

Som nevnt tidligere bygges en FEM-analyse opp av noder og elementer. I figur 33 ser man at disse elementene danner trekanter som igjen danner arealer. Her fungerer nodene som knutepunkter mellom disse arealene og vil derfor også her være sentrale punkter for utregning. Bildet viser en FEM-analyse der det ble brukt veldig lange elementer, noe som gjorde at oppløsningen ble dårlig. Denne analysen tok rundt 240 megabyte, mens analysen man til slutt endte opp med tok over 1000 megabyte. Når en ser slike tall forstår en hvorfor disse analysene gjøres på PC og hvorfor en PC er godt egnet til jobben. Elementene som ble brukt var mellom 0,2 og 1,1mm lange.

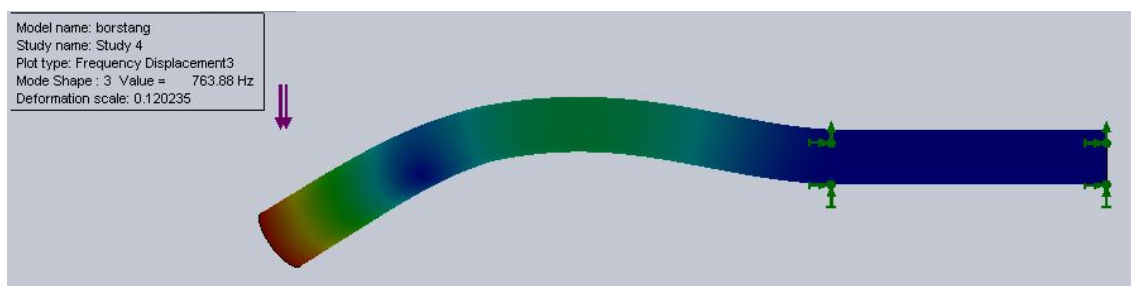


Figur 33: Området hvor strekklappen burde sitte.

Det neste som skal gjøres, er å finne egenfrekvensene til stangen. Dette for å verifisere at forenklingene gjort på stangen ikke har endret egenskapene noe særlig. Fra enkle bankeforsøk vil man kunne avgjøre stangens egenfrekvenser senere i oppgaven. Illustrasjonene av svingemodene viser hvordan svingemodene ser ut ved overdrevet utslag. Programmet finner også en svingemode på over 1500Hz, men denne er uinteressant, da man vet fra den tidligere prosjektoppgaven at denne moden har et meget lite utslag. Trolig vil også svingemode 2 være vanskelig å måle på grunn av liten amplitude også her. Ut fra figurene under kan men også merke seg hvor bøyen, og dermed tøyningen i stangen er størst. Ved første mode er tøyningen størst bakerst ved innfestningen, mens den i andre mode ser ut til å være større lengre fremme. Begge modene vil ha bra med strekk helt bak, så dette er basert på disse resultatene en god plassering for strekkklappene.



Figur 34: Frekvensmode 1



Figur 35: Frekvensmode 2

Kraft	Utbøyning	$\epsilon$ 40mm	$\epsilon$ 17mm	$\epsilon$ 14.5mm	Fr.mode 1	Fr.mode 2
2000N	1268 $\mu$ m	$2.246 \times 10^{-4}$	$2.320 \times 10^{-4}$	$2.338 \times 10^{-4}$	182,48Hz	763,88Hz

Tabell 3: Oppsummeringstabell av FEM-analyse

Grunnen til at man konsentrerer seg om tøyningsverdi på toppen 40, 17 og 14.5mm fra innspenningen er at dette er hvor strekkklappenes sentrum vil stå. Man forventer derfor lignende verdier i de videre testene. Frekvensmode 1 og 2 (Fr.mode) er hentet inn for å se i hvor stor grad den forenklete analyse-stangen er lik borstangen vi skal måle på.

## 8.4 Illustrasjon av forsøk med Ø60 borestang

Dette forsøket er hoveddelen av lab-virksomheten i prosjektet. Forsøket er inndelt i flere deler med 10 strekkklapper festet til stangen. Programvaren og hardware som brukes i forsøket er levert av National Instruments, mens strekkklappene er levert av Hottinger Baldwin Messtechnik. Første del av forsøket dreier seg om banketester for å sammenligne målingene med akselerometermålinger. Samtidig ses det på forskjellen mellom størrelsene på mellomstore strekkklapper.

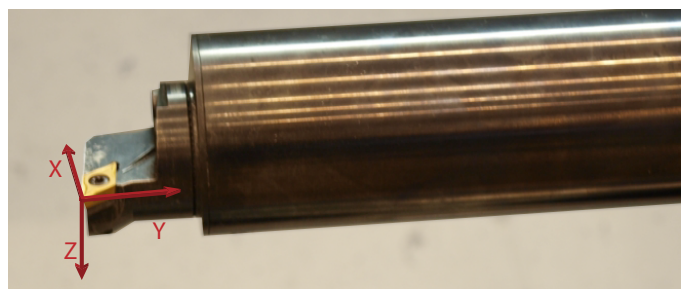
### Deler innkjøpt til LabView-forsøk:

1. 1x Målebro NI9237
2. 2x Strekkklapp HBM 120Ω 1-LG11-6/120, SG = 2,09
3. 2x Strekkklapp HBM 120Ω 1-LV41-3/120, SG = 1,98
4. 2x Strekkklapp HBM 120Ω K-RY81-3/120, SG = 2,03
5. 1x Lim - HBM Z70 (teflonbånd medfølger). Datablad i vedlegg 7.
6. 3-4x National Instruments RJ50 Adapter
7. 3-4x National Instruments RJ50 Kabel
8. Skjermede kabler med fire ledere og loddetinn.

Plassering av strekkklapper, adapter og målebro:

For å kunne få direkte tilbakekobling mot aksene som allerede finnes, vil det være naturlig å plassere strekkklappene i aksens retning. Dette betyr at man ikke fanger opp maks utbøyning direkte, men at man heller konsentrerer seg om hva utbøyningen gjør med aksene. Om nødvendig burde det være enkelt å regne ut maksimal utbøyning på grunnlag av disse tallene.

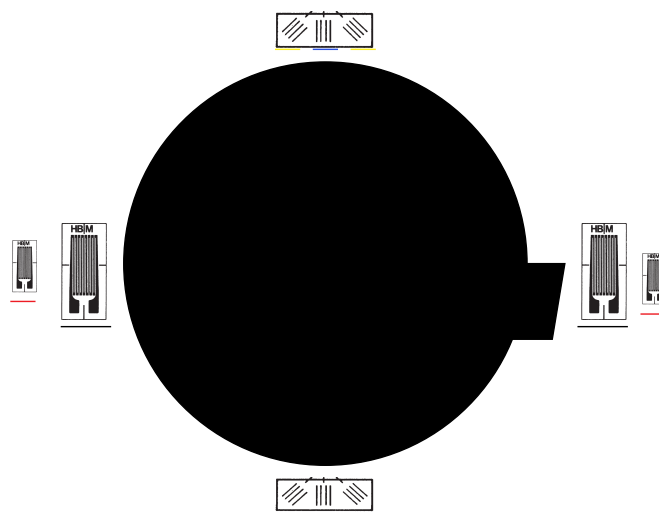
Man starter med å definere akser i tre dimensjoner. Aksene følger maskinstyringens akser for lettere og kunne kompensere for ut- og nedbøyning som forklart over. Aksene som ble definert er vist i figur 36. Vanligvis er Y og Z vridd 90 grader om X-aksen, men i flere tilfeller ser også aksene lik ut som i dette tilfellet. Det er muligens litt rart å sette Z-aksen ned og Y-aksen til høyre, men grunnen er å oppnå positive tall i målingen. På grunn av meget liten påvirkning i Y-retning ble det ikke målt i den retningen.



Figur 36: Tildeling av navn på aksene.

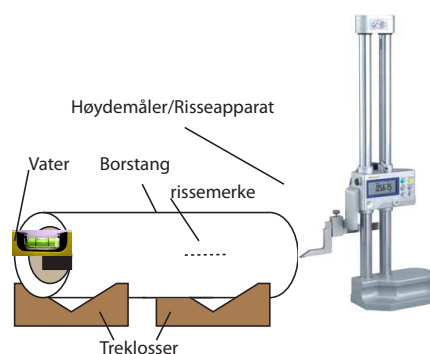
### 8.4.1 Plassering av strekkklapper

Ut fra FEM-analyser har man sett at den største tøyningen befinner seg veldig nære innfestningen. Derfor plasseres strekkklappene så nære innspenningen som mulig. Her er det viktig at strekkklappene blir lagt riktig både i forhold til plassering og i forhold til vinkel. Alle enkle strekkklapper skal måle i borstangens Y-retning mens rosettene skal festes slik at de kan måle torsjon som vist i figur 10. Figur 37 viser hvilke sider strekkklappene skal festes til. Planen er å koble opp tre halvbroer og en helbro. Helbroen er de fire strekkklapp-delene som står 45 grader på X- og Y-akse. Fargen under strekkklappene i figur 37 viser hvilke strekkklapper som tilhører hvilken bro. Blå, svart og rød bro er koblet helt likt.



Figur 37: Strekkklapp-plassering.

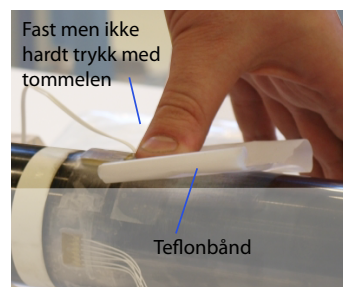
Der strekkklappene skal plasseres burde det være riktig overflateruhet. Det er limet som bestemmer ruheten, og det er derfor i bruksanvisningen til limet en skal lete etter informasjon om dette. Denne ruheten oppnås gjerne ved hjelp av smergelpapir eller sandblåsning. Limet som ble brukt i eksperimentene i denne oppgaven skulle følge brukermanualen bruke smergelpapir 180-240, eller sandblåsning med 320 korn korund. I dette forsøket er det brukt 220 smergelpapir på alle de fire plassene hvor det ble klargjort for påliming av strekkklapp. Den neste utfordringen er forsiktig å risse opp hjelpelinjer til plassering av strekkklappene. I figur 37 illustreres det hvordan dette ble gjort. Siden man vet at borstangen har en ytre diameter på 60mm kan man først måle toppen av stangen for så å bevege risseapparatet ned 30mm for oppmerking. Denne metoden kan benyttes for alle de fire sidene. Det neste man gjør er å risse hvor strekkklappene skal ligge i Y-retning. Først måler man 600mm fra skjæret og setter et lite tusjmerke her. Deretter spennes stangen opp i en dreiebenk og der risses forsiktig målene i overflaten. Til sist renses alle overflater med rensmiddel. I våre forsøk ble loctite 7063 brukt.



Figur 38: Opprissing av plassering til strekkklappene.

## 8.4.2 Påliming og lodding

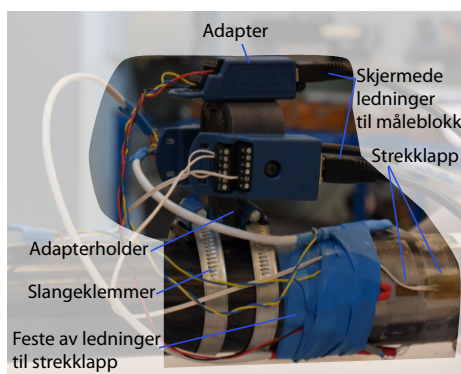
Når man har funnet og merket opp strekkklappenes plassering, må en bestemme metode for å lime på strekkklappen slik at den sitter så riktig om mulig. Her trenger man gjenomsiktig tape for å kunne starte. I figur 40 ser man hvordan strekkklappen kan plasseres for å sikte inn plassering. Blir strekkklappen feil plassert, er det bare å løsne tapen og å prøve på ny. Deretter løsner en tapen på en side og drypper på et tynt lag lim. Før så strekkklappen ned på metallet og trykk med normal kraft ned på strekkklappen med tommelen slik som vist i figur 39. Det er her vanlig å bruke et teflonbånd mellom strekkklappen og fingeren for å unngå å lime seg fast og for å ikke forurense limet. Fra limets bruksanvisning vet en hvor lenge en skal holde trykk på strekkklappen. I vårt tilfelle var det 120 sekunder. Legg også merke til teflonbåndet som isolerer mellom de uisolerte ledningene ut fra strekkklappen som ikke er festet i figur 40. På slike strekkklapper kan det gjerne brukes et isolerende lim etter at strekkklappen er festet og loddet til systemet. Det er også vanlig å finne et festepunkt for ledningene slik at man unngår å få strekk i loddingene eller inn mot strekkklappen. Som det fremgår senere, var ikke dette noe problem i vårt system.



Figur 39: Trykk under liming



Figur 40: Siktemetode for riktig plassering av strekkklapp.



Figur 41: Systemet oppkoblet.

Til slutt loddes det på ledninger som skal gå til et adapter som fører signalene videre til måleblokken. Her er det viktig at alt blir godt isolert slik at man unngår målefeil. Elektrikertape og krympestrømper brukes for å oppnå god isolering. Ledningene fra strekkklapper til adapter er forholdsvis korte, så her er det ikke så farlig med støyvern som det ville vært i lengre ledninger. Figur 41 viser det ferdigkoblede systemet.

## 8.5 Kalibrering av akser

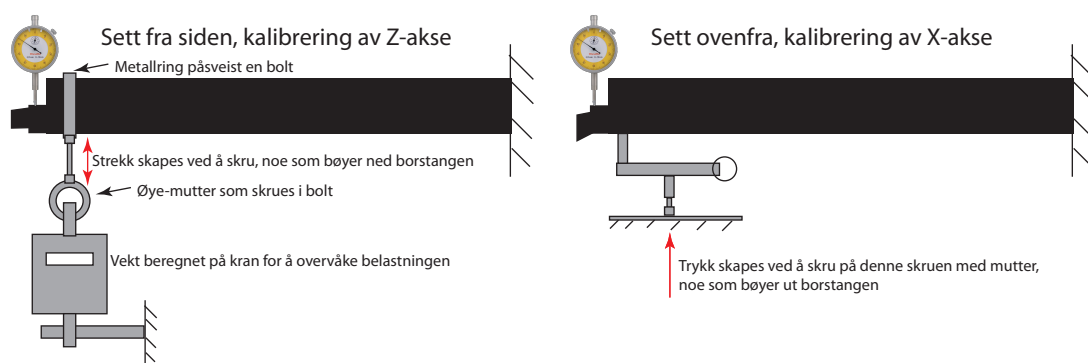
Null-kalibrering av målebroer er beskrevet i avsnitt 4.2.1. Dette ble gjort i alle de tre systemene som ble bygd. Her beskrives både parallell-kalibrering og direkte kalibrering.

### 8.5.1 Parallell-kalibrering

Det ble i tidlig fase av prosjektet tenkt at det kunne være greit å se på den faktiske tøyningen i borstangen. Med tanke på FEM-analyser, kunne det være mulig å sammenligne tøyningen som oppstår, dvs. simulering mot virkelighet. Av den grunn ble det gjennomført en parallell-kalibrering av aksene. LabView har en innebygget funksjon for dette som er meget enkel å følge. Det er derimot et problem at det ikke finnes gode nok retningslinjer for hvordan en skal bruke denne funksjonen. Funksjonen baserer seg på en helt vanlig kalibrering, men er vanskelig å bruke da den er meget sensitiv ovenfor hvor stor motstand som blir brukt i parallellkoblingen. I vår test ble det prøvd mange motstander slik at det ble funnet en sammenheng mellom feilmeldingene. Dette førte oss til en økning av motstandene, og til slutt endte man opp med en motstand på 40MΩ. Denne motstanden fungerte for alle de tre halvbroene, mens man ikke klarte å stille inn helbroen på denne måten.

### 8.5.2 Direkte kalibrering

Parallell-kalibreringen var ikke nødvendig, men gir en ekstra verdi som det går an å forholde seg til i konklusjonen. Det som derimot var veldig viktig, var den direkte kalibreringen. Siden man allerede vet at det mekaniske systemet skal være proporsjonalt, vet man at man burde få en rettlinjert graf fra tabellen man kommer til å sette opp. Dette er nødvendigvis ikke sant om det elektriske systemet ikke greier å omforme signalene med samme linearitet. Derfor er selve innstillingen et spennende forsøk. Nå blir tøyningsverdier satt i sammenheng med nedbøyningsmål for å lage en interpoleringstabell.



Figur 42: Illustrasjon av oppsett for direkte kalibrering av Z-akse på venstre side og X-akse på høyre side.

Figur 43 viser hvordan det ble festet en kranvekt for å måle vekten som ble påsatt stangen. Denne vekten var innspenst i et rør som var festet til innspenningsblokken. Ved å skru på en øyemutter ble stangen bøyd ned mot vekten. Den gule enheten i figuren er en måleklokke med nøyaktighet på 0,001mm. Denne klokken blir satt mot referanseflaten for vater for å



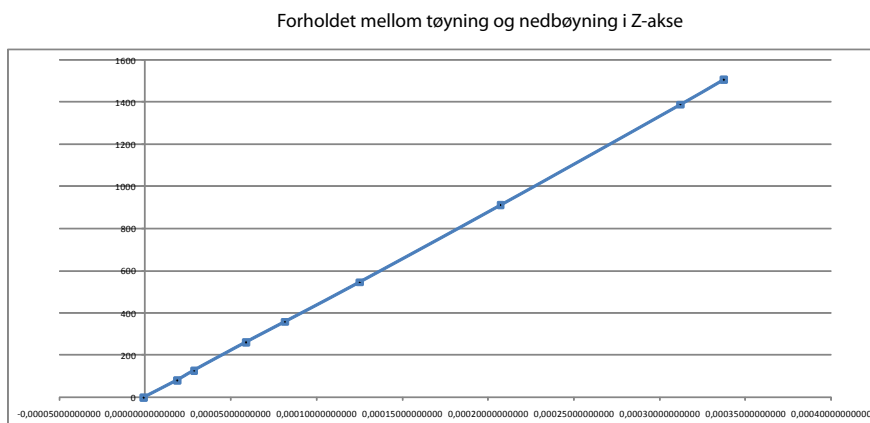
få en jevn flate å måle mot. Både målingen og kraften er forskjøvet innover på stangen i forhold til skjæret, noe som trolig vil skape avvik. Belastningen på stangen i Z-akse ble satt til maksimalt 2000N. Dette for å få et vidt spekter i interpolasjonstabellen vår. Den andre delen av den direkte kalibreringen var X-aksen. Det var her allerede klart hvor mye kraft det lå på stangen ved visse utbøyninger, noe som gjorde at det ikke var nødvendig med en vekt eller kraftmåler. Det ble derfor valgt å gå til en millimeter utbøyning, noe som man antok å være mer enn dobbelt så mye som man egentlig trengte til de videre testene. I tabell 4 ser man resultatene fra kalibreringen og ekstrapoleringen. De øverste og nederste verdiene er lineært ekstrapolert ut fra to punkter funnet i kalibreringen. Ved hjelp av punkt  $a$  og punkt  $b$  kan man finne et punkt  $c$  når  $t$  og  $n$  er proporsjonale. Dette vises i ligning (8.18). Legg også merke til at denne ligningen kan snus slik at man kan finne  $n$  på grunnlag av  $t$ . Dette former et stigningstall som kan brukes for å lette utregningen.

$$t_c = t_a + (t_b - t_a) \frac{n_c - n_a}{n_b - n_a} \quad (8.18)$$

	$Z_t$	$Z_m$	$Xs_t$	$Xs_m$	$Xl_t$	$Xl_m$	$Tt$	$Tm$
*	-0,000238155	-1000	-0,000191181	-1000	-0,000228066	-1000	0,1642075	-1000
	-0,0000008774	0	0,0000001183	0	0,000002958	0	0,0004575	0
	0,0000188167	83	0,0000203961	106	0,000027446	106	0,0004562	0,008
	0,0000286105	129	0,0000412757	214	0,000053139	214	0,0004551	0,0135
	0,0000589492	263	0,0000788102	406	0,000098584	406	0,0004528	0,023
	0,0000816819	360	0,0001536890	821	0,000151687	642	0,0004496	0,05
	0,0001249990	547	0,0001869910	1037	0,000190527	821	0,0004457	0,068
	0,0002072800	913			0,000230299	1020	0,0004390	0,1063
	0,0003120220	1390					0,0004306	0,155
	0,0003373650	1509						
*	0,002145663	10000	0,001568870	10000	0,002025035	10000	-1,723567345	10000

Tabell 4: Instillingsverdier for Z- og X-akse.

\* = ekstrapolerte verdier. Hvor  $t$  = tøyingsverdi,  $b$  = målt bøyning-/vinkel,  $s$  = stor strekkklapp og  $l$  = liten strekkklapp.



Figur 43: Forholdet mellom tøyning og nedbøyning. (Z-akse)

### 8.5.3 Problemer som oppstod under innstilling av akser

Det er flere problemer som kan oppstå under en sensor-måling. Her listes det opp noen av de problemene som har oppstått i forsøkene som er gjennomført:

**Parallell-kalibrering:** Parallell-kalibrering som ble gjort i dette forsøket var en ferdiglaget svart boks der en skulle følge en oppskrift. Kalibreringen ble gang på gang avbrutt med feilmeldinger som ga visse tallverdier. Det ble derfor forsøkt med mange verdier for motstand. Da ble det funnet et mønster i feilmeldingene som tilsa at parallell-motstanden burde være mye større. Dette ga resultater og man fant en motstand som fungerte for alle halvbroene, nemlig  $10M\Omega$ .

**Oppvarming:** Ved oppstart burde målebroen bruke et par minutter for å varme seg opp. Om ikke dette blir gjort vil målingene bli for høye. Tilkobling uten måling har vist seg å være nok. Dette er spesielt for NI-boksen og vil trolig være anderledes i andre måleblokker.

**Antall målebroer:** Det ble opplevd store forskjeller i signal i forhold til hvor mange målebroer som var tilkoblet. Dette virker som en unødvendig feil som lett skulle kunne unngås ved å sette opp systemet på en litt annen måte. Det er viktig å merke seg at slikt kan skje slik at en kan unngå slike problemer i fremtiden.

**Kobling mellom måleboks og adapter:** Denne sammenkoblingen lignet veldig på en cat5 ethernet-kabel og kalles RJ50. Dette var en dårlig løsning, da litt forskyvning av kabelen førte til store utslag i målingen. Dette ble forsøkt fjernet ved hjelp av elektronikk-spray som skulle rense overflatene i koblingen. Dette hjalp mye, men problemet vedvarte i mindre grad. Det anbefales derfor til lodding eller skrukoblinger i analoge målebroer.

**Feil målebro:** Det ble også på et tidlig tidpunkt valgt feil målebro i LabView-systemet. Broen som ble valgt var en halvbro med en tverrvendt strekkklapp. Dette førte til store målefeil og ble oppdaget på grunn av feilene. Broen som egentlig skulle velges var en fullt aktiv halvbro.

**Innfestning av borstang:** Helt i starten var ikke borstangen festet godt nok. Dette medførte mer nedbøyning enn hva som var ønskelig. Torsjonsmålinger ble også veldig vanskelig når stangen ikke var skikkelig festet. Grunnen til dette var en settskrue som er satt inn for at innfestningen lettere skal gi slipp på stangen.

**Datainnsamlingshastighet:** Det ble oppdaget store forskjeller mellom å kjøre på full hastighet og på lav hastighet i målingene. For å kunne få best mulig resultat ble det prøvd mange forskjellige målehastigheter og man endte til slutt opp med 24kHz.

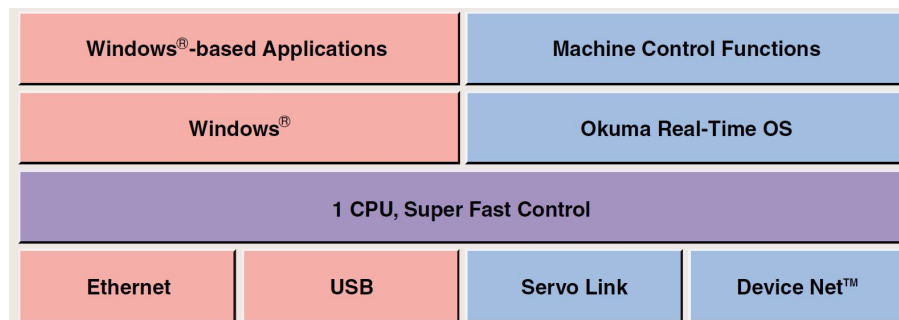
## 9 Tilbakekobling til en CNC maskin

Det finnes et stort utvalg av maskinstyringer. Her er noen av de store merkene: Siemens, Heidenhain, Fanuc, Okuma, Mazarol, Num, Fagor og Osai. Dette blir mange merker så det ble valgt ut tre styringer, en fra Okuma, en fra Siemens og en fra Heidenhain. Det er selvfølgelig problemer med å teste slike styringer da de gjerne er dyre og står i produksjon. Av den grunn gjøres det her et litteraturstudie som skal kunne være til hjelp i fremtidige tester.

Først kan man merke seg at styringene gjerne har en viss regnekapasitet, hvor det ofte finnes mange minneplasser for variable. Disse variablene kan være noe som defineres av hvilken type del som skal lages, eller de kan defineres av sensorsystemer. I denne oppgaven er man interessert i den siste. Sensorsystemet må kunne koble seg inn på styringen for å lastes inn som en av de gjeldene variabler. Et problem som gjerne kan oppstå er at systemet laster inn en variabel uten å oppdatere den. Det kreves altså kontinuerlig oppdatering av disse variablene.

### 9.1 Okuma - OSP-P200L

Denne Okuma-styringen bruker DeviceNet som er en kommunikasjonsprotokoll for automasjonsindustri. Protokollen er brukt som et kommunikasjonsledd mellom styringen og andre kontrollere. Dette burde dermed være en god måte å kommunisere med styringsenheten til maskinen. Om dette skulle bli vanskelig er det også mulig å bruke USB-portene til slike målinger. I bladet "USER'S VOICE vol.6, s.13" forklares noe av arkitekturen bak en slik maskin.



Figur 44: Grov skissering av arkitekturen bak Okuma OSP-P200

### 9.2 Siemens 840D

Denne styringen er i bruk av mange dreiemaskin-leverandører. Sammen med CAD-FEM-DAM-programmet Siemens NX6 utgjør den et komplett system for håndtering av design, analyse, produksjon og filhåndtering. I følge Siemens brosjyre 'SINUMERIK 840Di The Totally PC-Integrated Alternative' bruker disse styringene Profibus-grensesnittet, som i prinsippet gjør det samme som DeviceNet.

### 9.3 Heidenhain CNC Pilot 4290

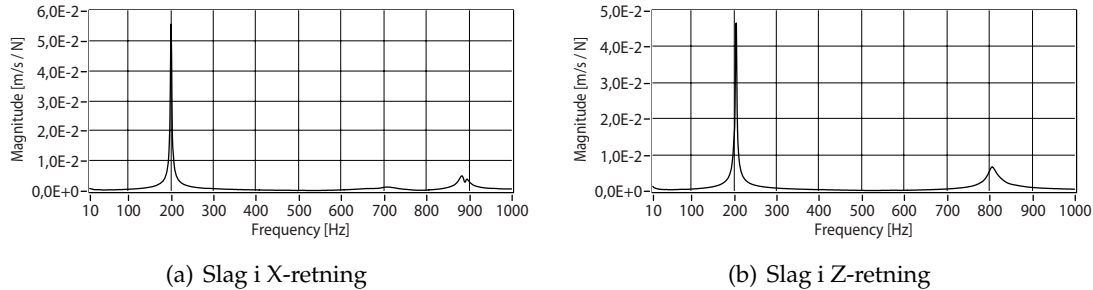
Denne typen styring virker mer låst enn de to andre man har sett på. Etter å ha vært i kontakt med Heidenhain Norge har det ikke kommet frem flere opplysninger enn de man selv kunne finne. Nå vet man fra instruksjonsmanualen til denne styringen at det skal være mulig å koble sensorer opp mot 'RS-232'-inngangen på styringen, men det har ikke kommet klart frem at denne kan brukes under en maskineringsprosess.

### 9.4 Oppsummering og alternativer

Det er klart at det er mulig å koble opp sensorsystemer til maskinen, men i vårt tilfelle vil det ikke bli enkelt. Mye av grunnen til dette ligger i at man vil gi en kontinuerlig tilbakemelding for flytting av skjæret. Problemet blir da å kunne sende gode og hurtig oppdaterte signaler til styringen. Følsomheten for støy og andre avvik gjør derimot at hastigheten ikke burde være for stor. En annen måte å løse dette på er å koble inn en ekstra akse. Dette er noe som kan gjøres på alle styringene som er nevnt over. Her vil problemet stort sett ligge i kostnader. En siste måte som kan nevnes er ethernet-tilkoblingen som de aller fleste maskinstyringer av nyere dato har innebygd. Dette er trolig også en protokoll som det kan være mulig å bruke til sensor-kommunikasjon. Dessverre er det også her vanskelig å finne god informasjon som kan lede til en løsning. DeviceNet, Profinet, USB, RS-232, ethernet og ekstra akse er dermed belyst. Siden de to første grensesnittene er laget med spesiell tanke på informasjon mellom maskinsystemene og andre enheter, vil det bli tatt utgangspunkt i å bruke disse til eventuelle tester.

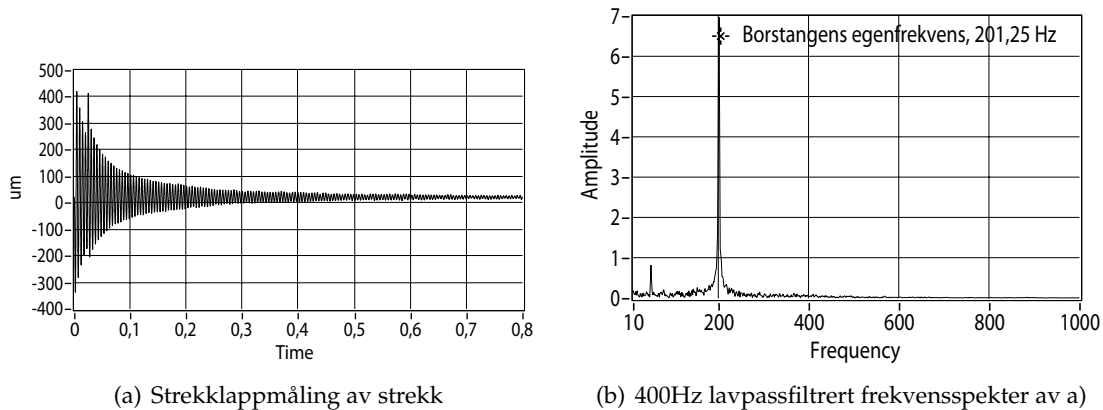
## 10 Resultater fra testingen

### 10.1 Dynamisk test med slag på stangen



Figur 45: Målinger med akselerometer uten demper

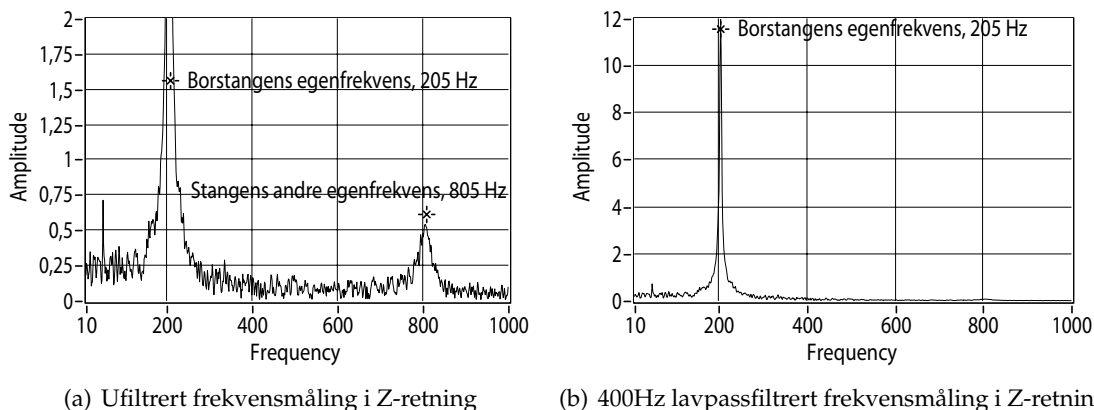
Før stangen ble innspent i dreiemaskinen ble det gjort en rekke tester ved å slå på stangen med en hammer. For å ha kontroll på strekkklapp-resultatene ble det plassert et akselerometer på skjæret. Figur 45 viser frekvensspekteret fra akselerometer-målinger for to tester, en med slag i X-retning og en med slag i Y-retning. På samme tidspunkt ble det samlet inn data fra strekkklappene med en målefrekvens på 24000Hz. Denne målefrekvensen ble valgt ut fra en rekke tester med forskjellig frekvens, der signalet med minst støy i frekvensplanet ble valgt. Oppbygningen til LabView gjør at det er vanskelig å si noe om hvordan frekvensplanet blir kalkulert ut fra dette, men man vet fra tidligere studier at antall måledata som trenges i en FFT-analyse er  $2^m = n$ , der  $n$  er antall målinger og  $m$  er et heltall. Dette tilsier at man bruker bare  $2^{14} = 16384$  noe som virker som et lavt tall i forhold til de data vi sitter inne med, men som i alle tilfeller burde være nok.



Figur 46: Slagmåling med strekkklapper i X-retning uten demper

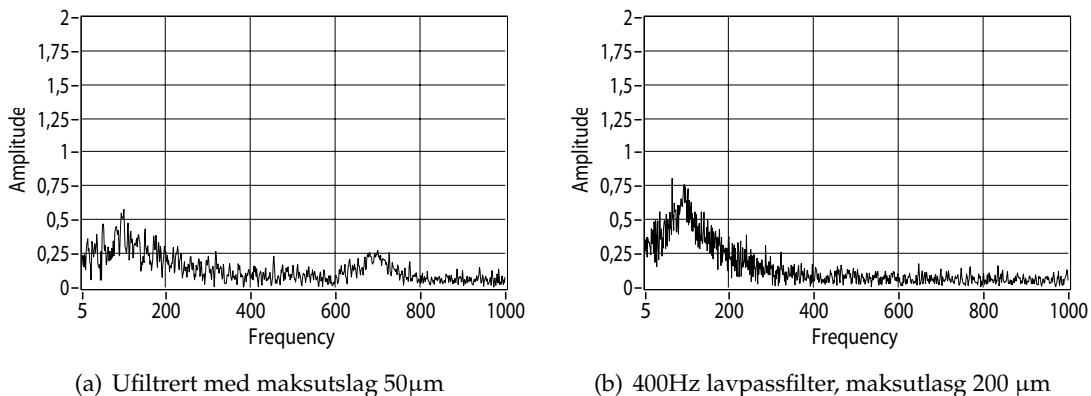
I figur 46(a) ses svingningene i en udempet borstang mens i figur 46(b) ses frekvensspekteret til denne målingen. Signalet er her lavpassfiltrert med grenseverdi på 400Hz. I figur 47 ser vi at dette fjerner borstangens andre svingemode som ligger på 805Hz. Svigningen på 805Hz er såpass liten at den vil være nesten ubetydelig i borstangens prestasjon. Samtidig ser vi støy fra strømmettet på 50Hz. Denne støyen forsvant om man koblet systemet på en annen kurs i bygget, men er relevant for å se at slike situasjoner kan oppstå.

Figur 47 viser tydelig støyen fra strømmettet 50Hz og hvordan den er i forhold til mode-  
ne av egenfrkvensen. Andre svingemode er i samme størrelsesorden som støyspikeren.  
Støyspikeren kan filtreres bort om ønskelig. Legg merke til at størrelsene i grafens Y-akse  
varierer fra Figur 47(a) til Figur 47(b), der støyen under 400Hz er mye den samme i begge  
figurene.



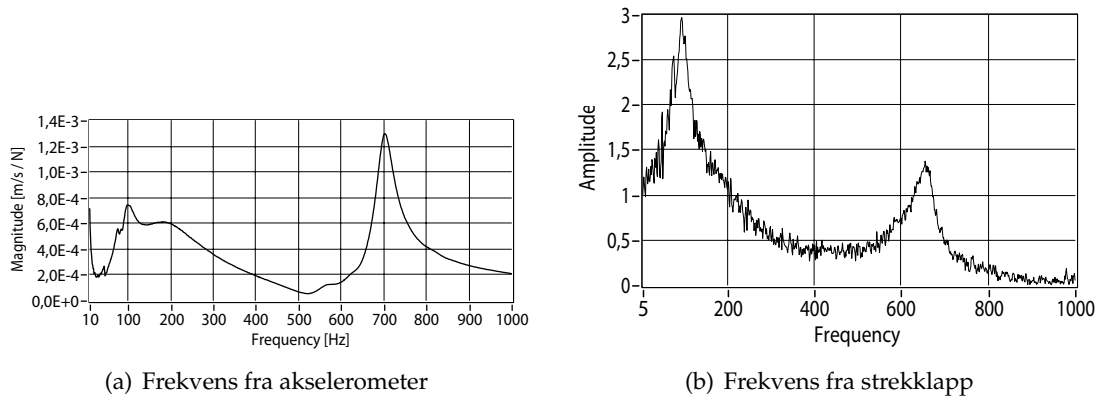
Figur 47: Slagmålinger med strekklapper i Z-retning uten demper

Deretter ble det satt inn demper i stangen. Demperens egenfrekvens lå på ca. 100Hz og vil derfor trekke systemet ned i egenfrekvens og samtidig minke utslagene betraktelig. Siden dette var tester der vi manuelt slo på borstenen vil ikke amplituden være særlig beskrivende. Figur 48 og figur 49 viser målinger med ett slag på den dempede borstenen. Man kan se at filtrering tar bort noe støy og demper signalet.



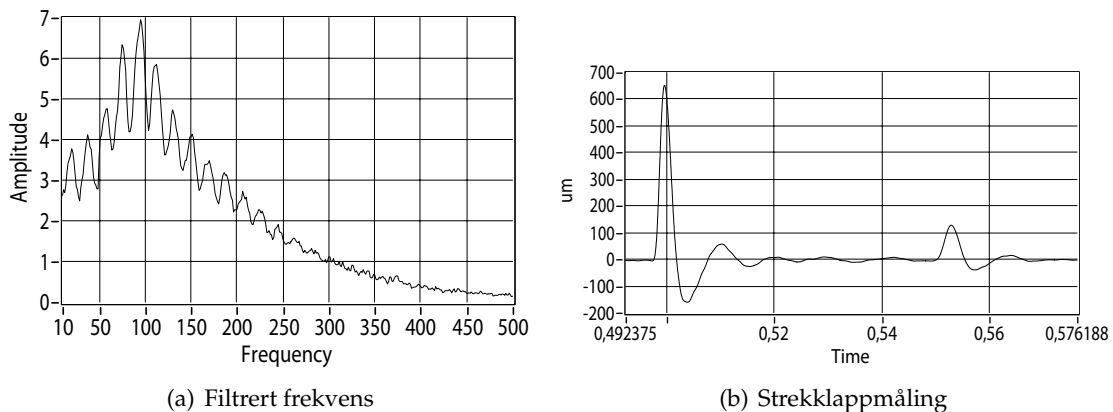
Figur 48: Frekvensplanet til strekklappmålingen

Det viktigste fra disse testene er å se om man får et fint svingemønster med demper. Figur 49 viser en sammenligning av frekvensdiagrammet til både strekkklapp og akselerometer. Strekkklappmålingen er her ikke filtrert og vi kan dermed se noe støy. Målingene er tatt med ett slag på borstangen.



Figur 49: Sammenligning av frekvens i akselerometer- og strekkklappmåling.

Slår vi over to slag per sekund vil gjerne frekvensgrafene se ut som en stor sky av støy, men dette er det gode grunner til. Figur 50 viser vi hva som skjer når en slår to slag. Frekvensen vil her svinge, da man får forskjellige amplituder å forholde seg til.

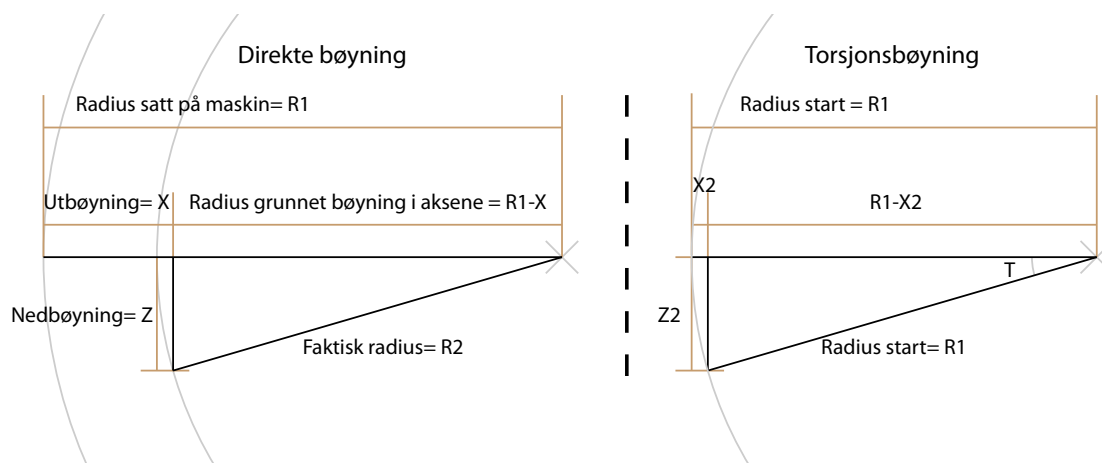


Figur 50: Dobbelt slag med demper.

Ut fra slagprøvene ser man gode svingemønster og greier å lese av egenfrekvensmodene til både stangen og systemet. Filtrering hjelper til å få finere grafer, men gjør i tillegg at man mister noe informasjon. Det ble også prøvd å dobbelt derivere utbøyningsmålingen. Dette førte til en enorm støy-sky. Dermed lavpassfiltrerte man målingen før derivasjonen. Dette hjalp mye, men man kunne se at utregningen var meget sensitiv for filterstørrelsen. Det ble derfor konkludert med at strekkklappene har store avvik i amplitude i slike utregninger, men at de fungerer bra til å vise akselerasjonens svingemønster. Ved optimal filtrering kan det trolig være mulig å få et akselerasjonssignal som kan brukes til aktiv demping av borstangen. Det ble ikke gjort flere tester på dette området.

## 10.2 Bearbeidingstester i dreiemaskin

Figur 51 viser hvordan borstangen beveger i en skjærprosess på grunn av direkte bøyning og torsjonsbøyning. Fra illustrasjonen er det tenkt at vi ser inn på XZ-planet. Siden vi har målt  $X$ ,  $Z$ ,  $T$  og  $R_1$  skal vi kunne regne ut hva radiusen vil ende på etter skjærprosessen. Utregningen starter med å finne bidraget fra torsjonsbøyningen som vist i ligning (10.1) og (10.2). Deretter legges disse bøyningsverdiene til bøyningsverdiene som vi allerede har fått fra strekkklappene. På venstre side av figur 51 ser vi en illustrasjon for utregningen i ligning (10.3), som finner hvor stor radius som oppnås ut fra de fire målte verdiene. Siden strekkklappene ikke vil bli flyttet på grunn av bøyninger er det riktig å ikke vri de direkte utbøyningene etter torsjonsbøyningen.



Figur 51: Illustrasjon til hjelp for utregning av nedbøyning

$$\frac{R_1 - X_2}{R_1} = \cos T \Leftrightarrow X_2 = R_1 - R_1 \cos T \quad (10.1)$$

$$\frac{Z_2}{R_1} = \sin T \Leftrightarrow Z_2 = R_1 \sin T \quad (10.2)$$

Her legges  $X_2$  til  $X$  og  $Z_2$  til  $Z$  for å kunne finne radiusen som skjæret til slutt ender på. Utregningen baserer seg på Pythagoras' læresetning.

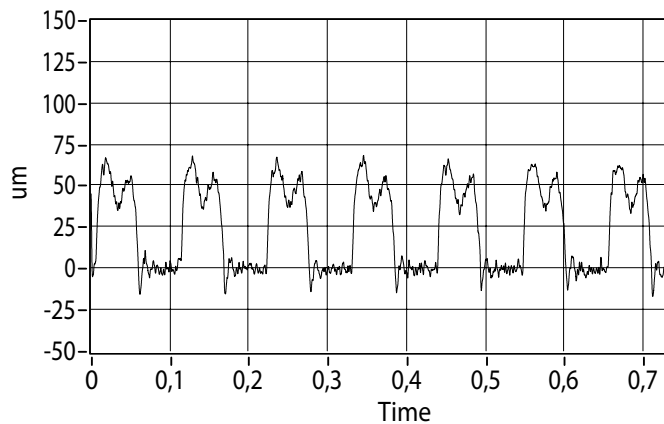
$$R_2 = \sqrt{(Z + Z_2)^2 + (R_1 - (X + X_2))^2} \quad (10.3)$$



De videre testene ble gjort i en Kern CD650 dreiebenk som står plassert i fabrikken til Teeness på Ranheim. Man prøvde borstangen med tre forskjellige skjær og tre forskjellige kutt. Ett kutt på 3mm, ett på 1mm og ett på 0,5mm av radius. I første settet med tester tok man ut arbeidsstykket for å måle det med mikrometer. På grunn av vanskeligheten med å innspenne arbeidsstykket ble ikke dette vellykket. Grunnen til dette var at arbeidsstykket i neste operasjon alltid stod litt skjevt i forhold til forrige kutt. På denne måten fikk man tester der det utviklet seg relativt store forskjeller mellom skjærekraftene ut fra hvor på arbeidsstykket skjæret passerte. På den ene siden rørte ikke skjæret arbeidsstykket, mens på den andre siden tok skjæret for mye. Dette ble da en interessant test på hurtigheten til strekklappene. Det var tydelig at dette skjedde i flere av testene, men det var spesielt et 0,3mm kutt som bemerket seg, der skjæret gikk helt ut av kutt hver omdreining. Dette er vist i figur 53. Neste gang det ble kjørt tester ble det brukt en hullindikator som vist i figur 52. Måleren var godkjent for 0,01mm nøyaktighet og kunne enkelt stikkes inn i arbeidsstykket mens det stod innspennt i dreiemaskinen. I Vedlegg2 finnes grafene fra disse testene.



Figur 52: Hullindikator



Figur 53: 0,3mm kutt med svingninger.

**10.2.1 Variabler brukt i fremvisningen av resultater:**

$D_0$  er diameteren målt før bearbeiding.

$D_1$  er diameteren målt etter bearbeiding.

$\Delta D_k = D_1 - D_0$  forskjell i diameter på grunn av kutt.

$\Delta D_f = 2K_{kutt} - \Delta D_k$  forskjell mellom innstilt kutt og faktisk kutt.

$X$  utbøyning i borstangens  $X$ -retning.

$Y$  utbøyning i borstangens  $Y$ -retning.

$T$  grader forskyvning på grunn av torsjonskrefter

$RPS = \frac{N}{\pi D_0}$  rotasjonshastighet per sekund i dreiespindel.

$\Delta = 2R_2 - D_0 - \Delta D_k$  forskjellen mellom utregnet diameter fra strekkklappene og målt diameter etter bearbeiding.

### 10.2.2 Skjær Sandvik cnmg med nesoradius 0,8mm



Figur 54: Sandvik cnmg 0,8

**3mm kutt:** Det ses hele veien en klar korrelasjon mellom torsjon og nedbøyning i Z-akse. Det kan ut fra denne testen fastslå at frekvensplanet er bedre egnet i Z-aksen på grunn av mer tøyning og dermed mer utslag, noe som gjør at støypåvikningen blir mindre. Man kan se at nedbøyningen går fra null til maks utslag på 0,05 sekunder dette er en jevn stigning som ikke overgår maksimal utbøyning som tidligere trodd. Grunnen til den tidligere hypotesen skyldes det man tydelig kan se i akselerasjonsplanet, hvor akselerasjonen gir et enormt utslag i det øyeblikk skjæret går i kutt. Torsjonsandelen i dette kuttet svinger rundt  $0,00254^\circ$ , noe som gir en klar effekt på skjærets posisjon. Fra ligning (10.1) og (10.2) kan man regne seg frem til at torsjonen gir en nedbøyning på 0,116mm og en utbøyning på 0,000127mm. Det er spennende å se at formlikheten mellom torsjon og Z-akse er så stor som den er.

$D_0$ , mm	$D_1$ , mm	$\Delta D_k$	$\Delta D_f$	$X$ , $\mu\text{m}$	$Z$ , $\mu\text{m}$	$T$ , $^\circ$	$R_2$ , mm	$\Delta$ , mm
99,93	105,17	5,24	0,76	447	1118	0,0628	0,8461	0,08608

Tabell 5: Utbøyninger for 3mm kutt med cnmg 0,8

N, m/min	f, mm/o	RPS, o/sek
200	0,3	10,6

Tabell 6: Skjærdata for 3mm kutt med cnmg 0,8

**1mm kutt:** Med et mye mindre kutt ser man enorm forskjell i ned- og utbøyning. Dette skyldes selvfølgelig stor forskjell i kreftene som påvirker skjæret. Man ser at kalkulasjonene stemmer enda bedre her enn de gjør i det større kuttet. Dette kuttet er spesielt interessant siden det av og til gir noe utslag på 30Hz. Fra forrige kutt kunne man også se tendensen til en slik lavfrekvent svingning.

$D_0$ , mm	$D_1$ , mm	$\Delta D_k$	$\Delta D_f$	$X$ , $\mu\text{m}$	$Z$ , $\mu\text{m}$	$T$ , $^\circ$	$R_2$ , mm	$\Delta$ , mm
106,07	107,78	1,71	0,29	176	250	0,02	0,3246	0,03461

Tabell 7: Utbøyninger for 1mm kutt med cnmg 0,8

N, m/min	f, mm/o	RPS, o/sek
200	0,15	10,0

Tabell 8: Skjærdata for 1mm kutt med cnmg 0,8

**0,5mm kutt:** Dette kuttet har mye de samme egenskapene som før, men problemet her er at sponen ikke brytes slik at arbeidsstykket pakker seg med spon. Dette gjør at man på slutten av kuttet får enorme ut- og nedbøyninger. Kuttet går fra en utbøyning på 0,148mm til et maksutslag på ca.1,15mm. Også nedbøyningen blir påvirket på samme måte. Fra akselerasjonsutregningen kan man tydelig se flere ikke-periodiske slag som treffer borstangen. Det som er virkelig spennende er at utbøyningen, nedbøyningen og torsjonen bygger seg opp gradvis før det virkelig går galt.

$D_0$ , mm	$D_1$ , mm	$\Delta D_k$	$\Delta D_f$	$X$ , $\mu\text{m}$	$Z$ , $\mu\text{m}$	$T$ , $^\circ$	$R_2$ , mm	$\Delta$ , mm
108,1	108,87	0,77	0,23	148	139	0,009	0,2377	0,00769

Tabell 9: Utbøyninger for 1mm kutt med cnmg 0,8

$N$ , m/min	$f$ , mm/o	RPS, o/sek
200	0,15	9,8

Tabell 10: Skjærdata for 0,5mm kutt med cnmg 0,8

### 10.2.3 Skjær med nesoradius 0,4mm



Figur 55: Sandvik dcmt 11 t3 0,4

**3mm kutt:** Dette kuttet starter med en liten lavfrekvent vibrasjon i inngangen til kuttet, men finner seg raskt inn i vanlig skjæremodus. Ved utgangen kan en også se noe lavfrekvent støy mens stangen rolig forlater kuttet. På denne måten blir det ingen store akselerasjoner som gjør at akselerasjonskurven blir mer pølseformet, enn et kutt hvor borstangen hopper rett i maksimalt kutt. Det er her snakk om forandringer som skjer med et spillerom på endten 0.001-0.01 sekunder eller opp mot et halvt sekund.

$D_0$ , mm	$D_1$ , mm	$\Delta D_k$	$\Delta D_f$	$X$ , $\mu\text{m}$	$Z$ , $\mu\text{m}$	$T$ , $^\circ$	$R_2$ , mm	$\Delta$ , mm
100,03	105,865	5,835	0,165	161	1177	0,065	0,2813	0,1164

Tabell 11: Utbøyninger for 3mm kutt med dcmt 0,4

$N$ , m/min	$f$ , mm/o	RPS, o/sek
200	0,25	10,6

Tabell 12: Skjærdata for 3mm kutt med dcmt 0,4

**1mm kutt:** I dette kuttet starter man på samme måte som forrige kutt, hvor man hadde en rolig inngang med noe lavfrekvent svingning. Kuttet går meget pent, men når man kommer til enden hopper borstangen ut av kuttet på 0,002 sekunder. Dette medfører stort utslag i akselerasjonsutregningen.

$D_0$ , mm	$D_1$ , mm	$\Delta D_k$	$\Delta D_f$	$X$ , $\mu\text{m}$	$Z$ , $\mu\text{m}$	$T$ , °	$R_2$ , mm	$\Delta$ , mm
106,12	107,85	1,73	0,27	91	221	0,02	0,1808	-0,0892

Tabell 13: Utbøyninger for 1mm kutt med dcmt 0,4

N, m/min	f, mm/o	RPS, o/sek
200	0,3	10,0

Tabell 14: Skjærdata for 3mm kutt med dcmt 0,4

**0,5mm kutt:** Dette kuttet oppfører seg på motsatt måte av det forrige kuttet. Her går skjæret i direkte inngrep for så å gradere seg ut med noe lavfrekvent svingning. Det er derimot et problem at avviket fra den utregnede verdien er såpass stor som den er. Jeg greier ikke se at det er grunnlag for at kuttet skal bli så lite som det blir i denne testen.

$D_0$ , mm	$D_1$ , mm	$\Delta D_k$	$\Delta D_f$	$X$ , $\mu\text{m}$	$Z$ , $\mu\text{m}$	$T$ , °	$R_2$ , mm	$\Delta$ , mm
108,16	108,85	0,69	0,31	96	104	0,01	0,1917	-0,1183

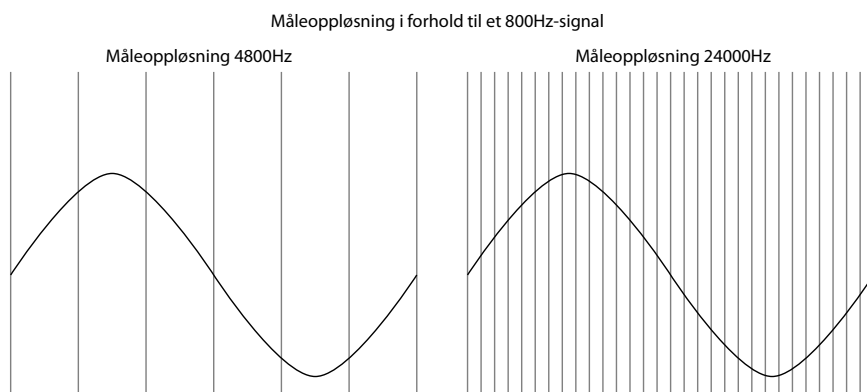
Tabell 15: Utbøyninger for 1mm kutt med dcmt 0,4

N, m/min	f, mm/o	RPS, o/sek
200	0,3	9,8

Tabell 16: Skjærdata for 0,5mm kutt med dcmt 0,4

### 10.2.4 Sammendrag av tester

Fra testene ender man opp med signalet  $\Delta$ , som forklarer forskjellen mellom stor forskjell det er mellom diameter av målt og diameter som systemet tror har blitt laget på grunn av utbøyning og nedbøyning. Man ser det det i to tester var avvik på opp mot 0,12mm. Dette er uakseptabelt høyt, så videre arbeid må anbefales for å forbedre disse resultatene. Utregning av akselerasjon ble vanskelig da filtrering av støy ble en betydelig faktor for å kunne oppnå riktig amplitude. Det har blitt observert at utbøyning og nedbøyning øker over flere sekunder når spon er på vei til å pakke seg. Ved å undersøke grafene nøye ses det at det i stor grad ikke skjer store endringer kjappere enn 0,001 sekund. Skal det måles en slik endring må det naturligvis være nødvendig med kjappere målehastighet enn dette. I prosjektet før dette prosjektet ble det konkludert med at 4800Hz var en grei målehastighet, men at systemet som der ble brukt hadde noe problemer med støy på denne hastigheten som gjorde at det ble vanskelig å bruke resultatet til videre analyser. Ut fra de grafer man har sett i denne testen kan det ikke konkluderes med det samme. Her ser derimot 4800Hz ut til å være en bra målehastighet som burde kunne plukke opp de problematiske svigningene som kan oppstå i borstangen. Ved at 4800 er delelig på 800Hz som er den største frekvensmoden vi vil måle er dette en ypperlig målehastighet.



Figur 56: Illustrasjon av måleoppløsning på et 800Hz sinus-formet signal

## 11 Konklusjon

Strekkklapper finnes i mange størrelser og former. Noen kan sveises mens andre må limes. Det er fokusert på borstenger, noe som det har blitt vist at gir små tøyninger. Samtidig har det blitt anslått at strekkklappene burde ta lite plass og ikke komme i veien for operasjonen som skal gjøres. Siden det finnes lite tøyning blir også motvirking av støy ekstra viktig, da signalene blir små. Wheatstone målebroer må implementeres i en hver strekkklappmåling for å kunne oppnå brukbare resultater. Disse sender ut små analoge signaler som ofte må forsterkes opp relativt mye. Forsterkningen burde skje på grunnlag av systemets oppbygning slik at den kan tilpasses til ønsket oppløsning. Som oppgaven har vist kan små analoge signaler føre med seg en rekke problemer. Støy fra ledninger, spenningsnett og elektromagnetisk støy kan gjøre signalene ubrukelige. Nettopp på grunn av dette er det viktig å tenke på hva som kan gå galt for så å teste hva som faktisk går galt. Det er nevnt mange feil og mangler på de forskjellige systemene, noe som burde gjøre det lettere å lage et "feilfritt" system i fremtiden. På flere måter er de billige systemene bedre enn det dyre National Instruments (NI) systemet man gjorde tester med, men oppløsning og hastighet er noe NI-systemet gjør veldig bra. Dette har alt med hvilken hardware som ble brukt, så med litt raskere ADC og overføring vil det være fullt mulig å lage et system som overgår NI-systemet. Det mest skuffende i NI-systemet er tilkoblingsmulighetene, som fører til store problemer på grunn av unøyaktig motstand i selve tilkoblingspunktet. Dette betyr at man får avvik som skyldes tilkoblingsfeil, og det burde det ha vært enkelt å unngå. Slike feil i systemet har gjort det veldig vanskelig å vurdere om nøyaktighet. Man har sett at systemet er langt fra nøyaktig nok, dog dette i høy grad skyldes unøyaktigheter som kunne vært unngått med bedre tilkoblingsmuligheter. Det velges derfor å konkludere med at videre tester er nødvendig, og at det burde være mulig å lage et mikrokontroller basert system. I kapitlet 'forslag til videre arbeid er det lagt frem forslag og begrunnelser til hvordan Teeness kan videreutvikle systemet til å bli praktisk anvendbart i en produksjonssituasjon.

### System laget fra integrerte kretser:

- + Måler tøyning bra.
- + Full oversikt over programmet, som gir produsent mulighet til å spesialisere systemet i stor grad.
- + Mange tilkoblingsmuligheter. (USB, seriell, ethernet og flere kan kobles på.)
- + Stor frihet til å skifte ut deler og da også generell utforming av systemet.
- Vanskelig å programmere.
- Krever mer arbeid og testing for å utvikle.

**National Instruments system:**

- + Meget høy oppløsning i målingen.
- + Ekstremt kjapp måling og overføring.
- + Raskt å sette opp.
- + Enklere å programmere.
- + Fysisk lite.
- Vanskelig å videreutvikle deler av systemet da mye av systemet blir en svart boks.
- Meget dårlige tilkoblinger inn på måleblokk.
- Trenger rundt 5min med måling for å varme seg opp.

Det har vist seg at utregning av akselerasjon fra strekkklappmålinger kan være vanskelig, men ikke umulig. Den ekstremt høye oppløsningen kombinert med høy målehastighet gav ekstremt store utslag. Ved å lavpassfiltrere signalene kunne man fjerne mye av støyen og også redusere utslagene betraktelig. Dette var dog ikke noen god måte å løse problemet på, og jeg vil i det henseende konkludere med at utregningen var brukbar men likevel ikke god nok til å erstatte et akselerometer.

**Fordeler med strekkklappbroer:**

- Meget følsom og nøyaktig, men krever mye av elektronikken den er koblet opp mot.
- Påvirker ikke maskineringsprosessen.
- På en borstang kan den monteres langt fra bearbeidingsstedet, noe som betyr at den i mindre grad er utsatt for hard behandling.
- Robust ved riktig bruk.
- Enkel å stille inn.

**Ulemper med strekkklappbroer:**

- Vanskelig å bytte/reparere.
- Kan påvirkes mye av støy.
- Krever mye av måleenheten.
- Vanskelig å montere og teste.



## 12 Forslag til videre arbeid

På grunnlag av konklusjonen ses det at det kan være lurt å utvikle et system der en har full kontroll over hvilke komponenter og hvilke indre oppsett som tas i bruk. Derfor anbefales det å se enda nærmere på å utvikle mikrokontrollersystemene slik at en får en høyere oppløsning i ADCen og med kjappere overføringshastighet til andre enheter. 16-bit ADC vil gi en oppløsning på  $2^{16} = 65536$  forskjellige tall, med et maks utslag på  $\pm 3\text{mm}$  vil man kunne måle  $6\text{mm}/65536 = 0,09155\mu\text{m}$ . Dette er på papiret mer enn nok til å lage et bra system.

Det er også interessant å se på hva som kan gjøres videre med tanke på overføring til PC eller maskinstyring. USB er her valg som den kjappeste av overføringsmediene. Denne typen overføring er blitt standard på de fleste maskinstyringer av nyere dato, men ikke alle ser ut til å kunne utnytte den som direkte inngang mot regulering av maskinparametere. Det ble i slutten av prosjektet bestilt et LPC2148 modul kort. (Lenke: <http://www.keil.com/dd/chip/3880.htm>) Dette kortet har bare 10-bit, men har muligheten til meget kjapp USB-tilkobling og eventuell seriell-tilkobling. ADCer med høye hastigheter finnes separat slik som AD9262, som er en integrert krets som bruker 16-bit og en hastighet på 2.5MHz, 5MHz eller 10MHz. Disse kretsene koster rundt 250NOK.

## Referanser

- R. A. Nilsson A. Rydh, S. Tagliati. Emerging measurement techniques for studies of mesoscopic superconductors. *Springer Netherlands*, 2009.
- L. Andren, L. og Håkansson. Active vibration control of boring bar vibrations. Blekinge Institute of Technology, 2003.
- Massimo Banzi. *Getting started with Arduino*. O'reilly, 2009.
- Mats Bejhem. *Machining Monitoring and Control*. PhD thesis, 2001.
- John Essick. *Hands-On Introduction to LabVIEW for Scientists and Engineers*. Oxford University Press, 2009.
- K. Sørby F. O. Rasch. Verktøymaskiner: Oppbygning - dynamiske forhold- overvåking -kapabilitet. 2010.
- Karl Hoffmann. *An Introduction to Measurements using Strain Gauges*. HBM GmbH, 1989.
- F. Irgens. Formelsamling mekanikk. 3.utgave, *Tapir akademiske forlag*, 1999a.
- Fridtjov Irgens. *Fasthetslære*, 6.utgave. Tapir, 1999b.
- S Kalpakjian and S. R. Schmid. *Manufacturing Processes for engineering materials*. 5.utgave, Prentice Hall, 2007.
- R. Karlsen and K. Sørby. Minimizing vibration tendencies in machining. SINTEF, 2003.
- T. K. Lien. *Digital styring for mekatronikk*. Tapir forlag, 1995.
- Byrne G. Dornfeld D. Inasaki I. Ketteler G. Konig W. and Teti R. Tool condition monitoring (tcm) - the status of research and industrial application. *CIRP Annals*, 1995.
- NationalInstruments. Choosing the right strain-gauge for your application. <http://zone.ni.com/devzone/>.
- G. Pavic´. Measurement of vibrations by strain gauges, part 1 and 2. *Journal of Sound and Vibration*, 1985.
- Charles Platt. *MAKE: Electronics*. O'reilly, 2009.
- C. Scheffer and P. S. Heyns. Wear monitoring in turning operations using vibration and strain measurements. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2001.
- C. H. Swaroop. *A byte of python*. NonCommercial-ShareAlike, 2003.
- P. A. Tipler. *PHYSICS for scientist and engineers*. W. H. Freeman & Co., 2004.
- Vishay. Noise control in strain gage measurements. volume TN-501-2, 2009.

# Vedlegg

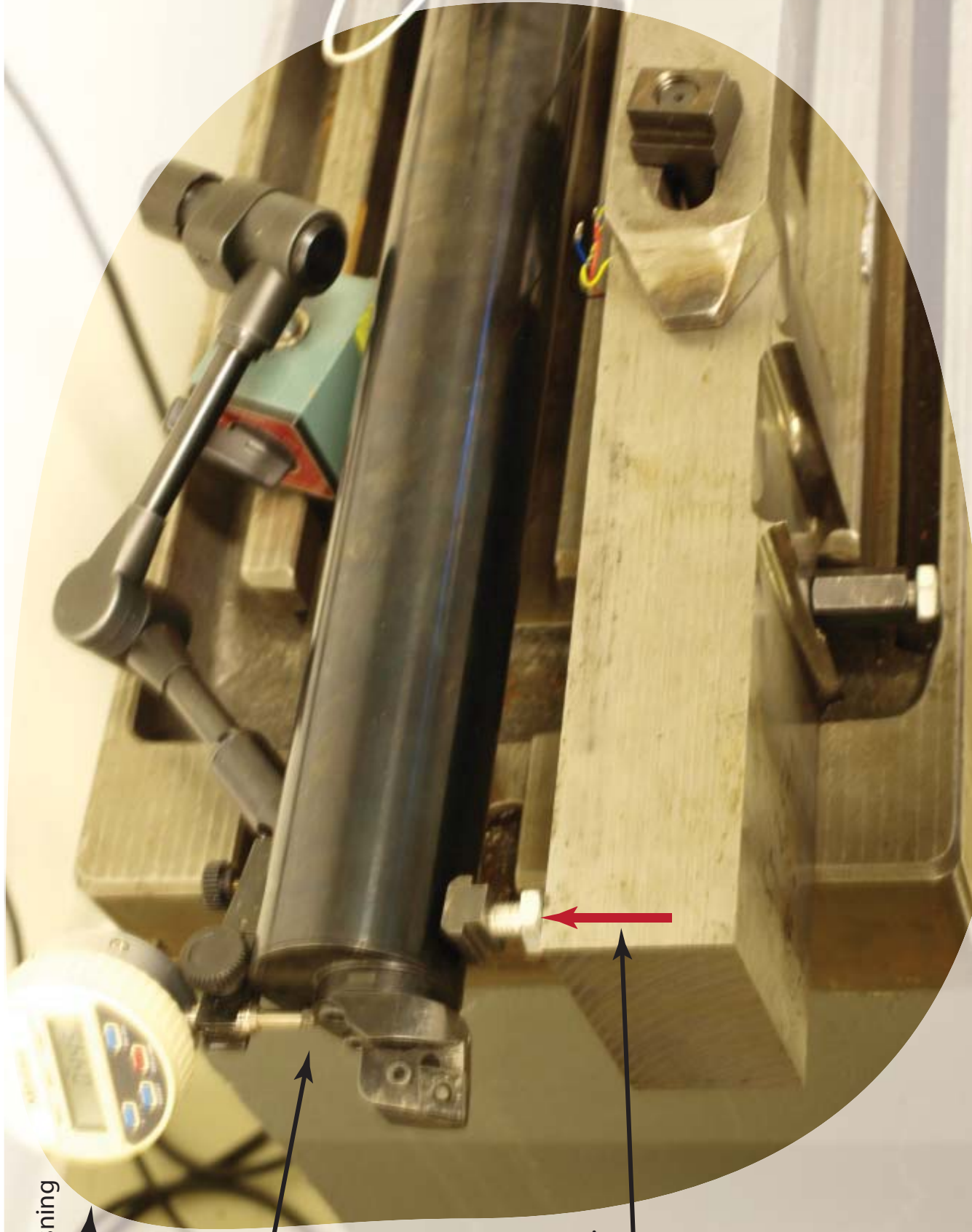
1. **Bilder fra testing**
2. Grafer fra test i dreiebenk
3. Python-program
4. Arduino-program
5. C-program
6. LabView-program
7. Datablad for lim HBM z70
8. Forstudierapport



Måleur med 0.001 mm oppløsning

Måling på referanseflate for vater

Strekk for å bøye ned stangen.



Måleur med 0.001 mm oppløsning

Måling på referanseflate for vater

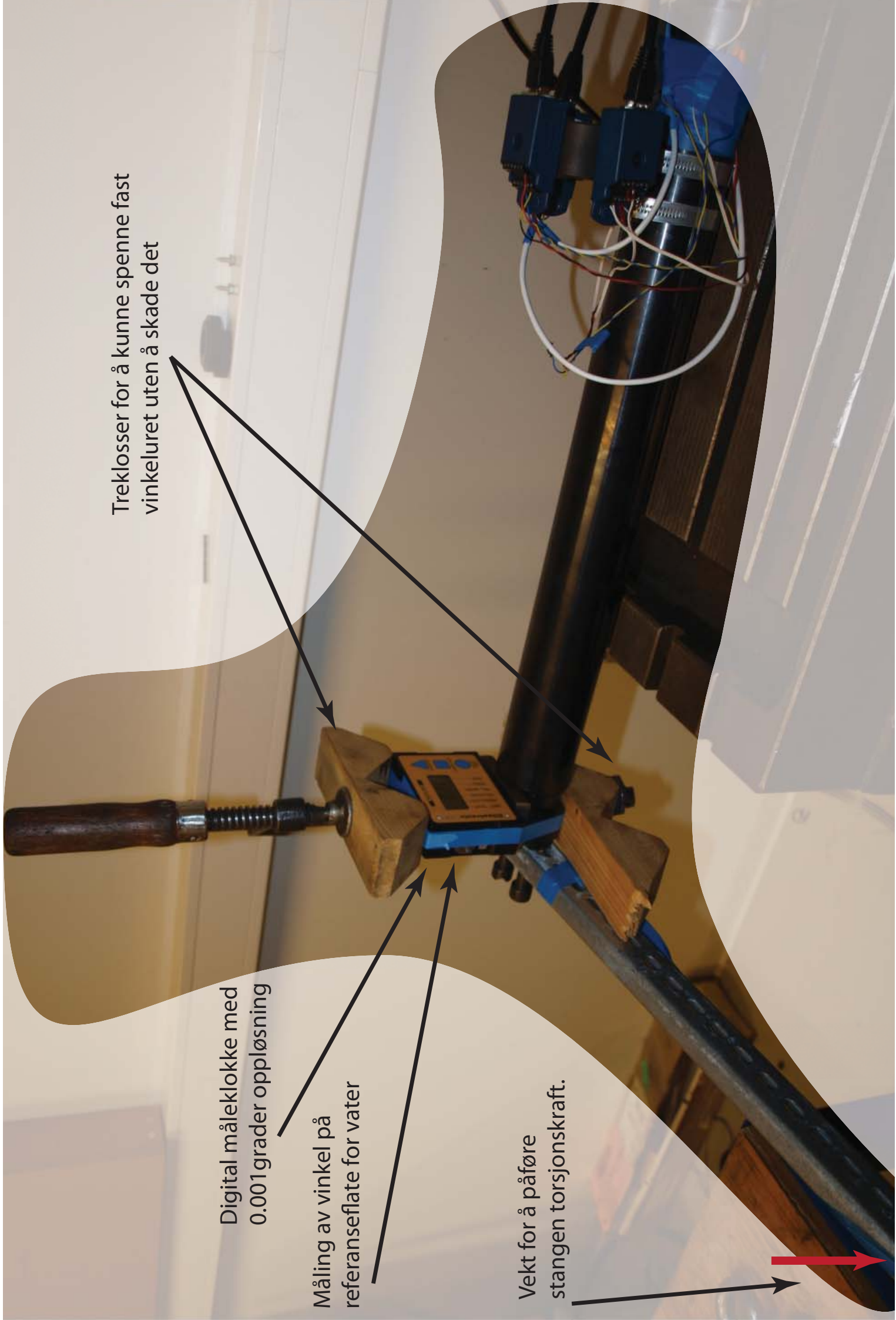
Trykk for å bøye ut stangen.

Treklosser for å kunne spenne fast  
vinkeluret uten å skade det

Digital måleklokke med  
0.001grader oppløsning

Måling av vinkel på  
referanseflate for vater

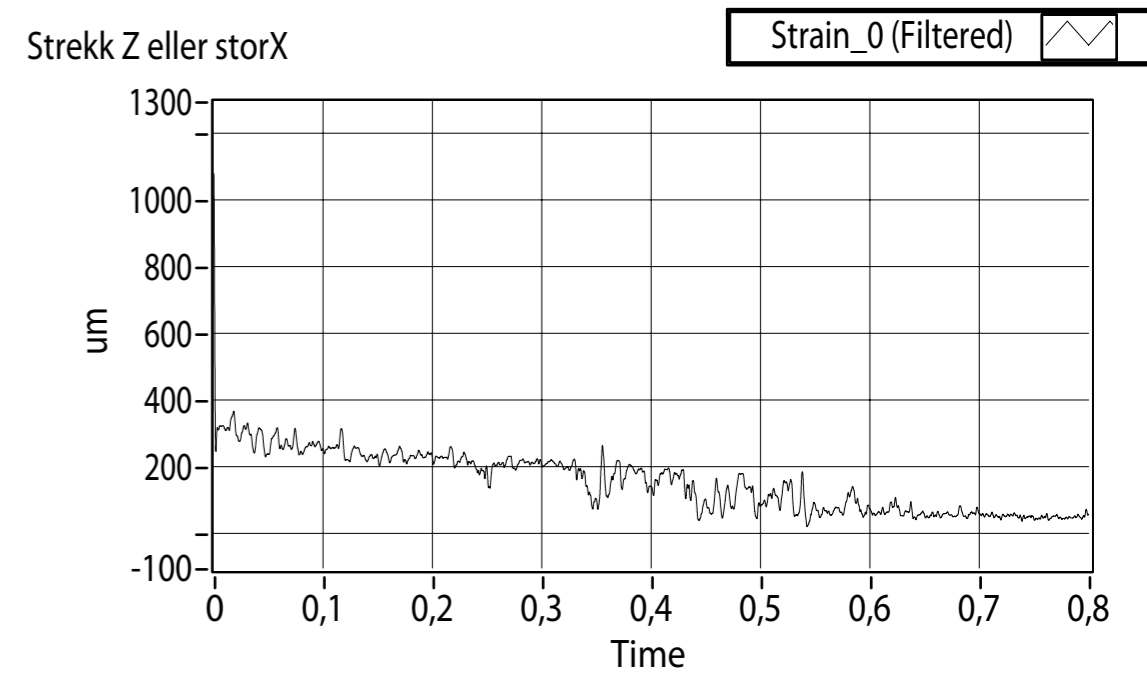
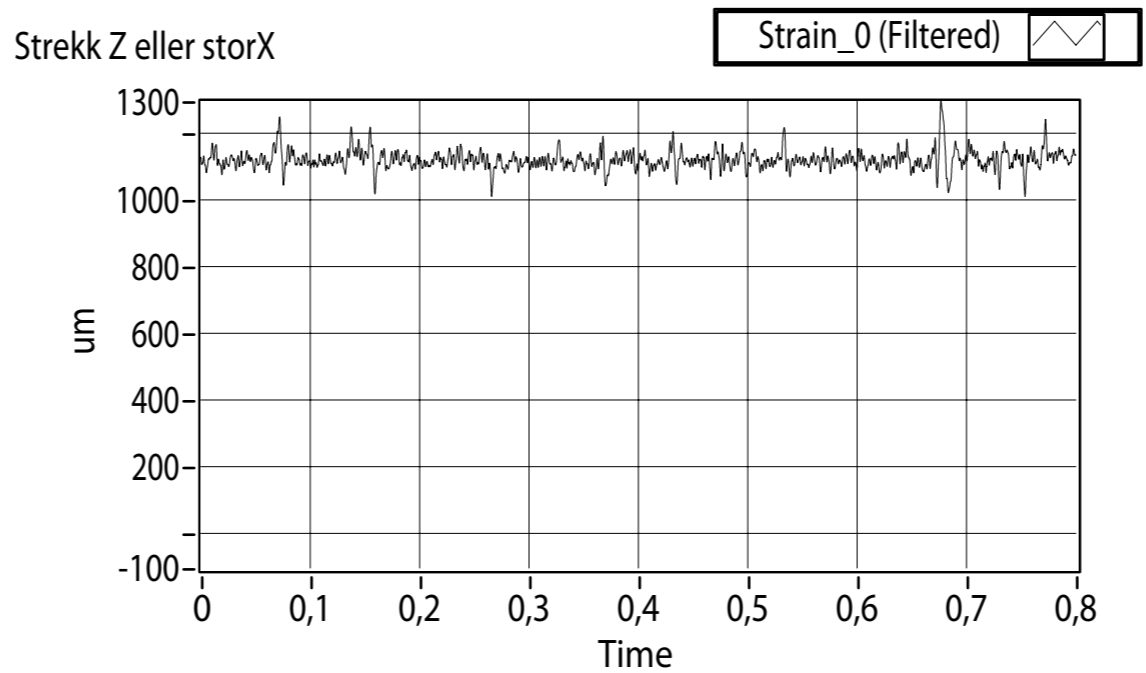
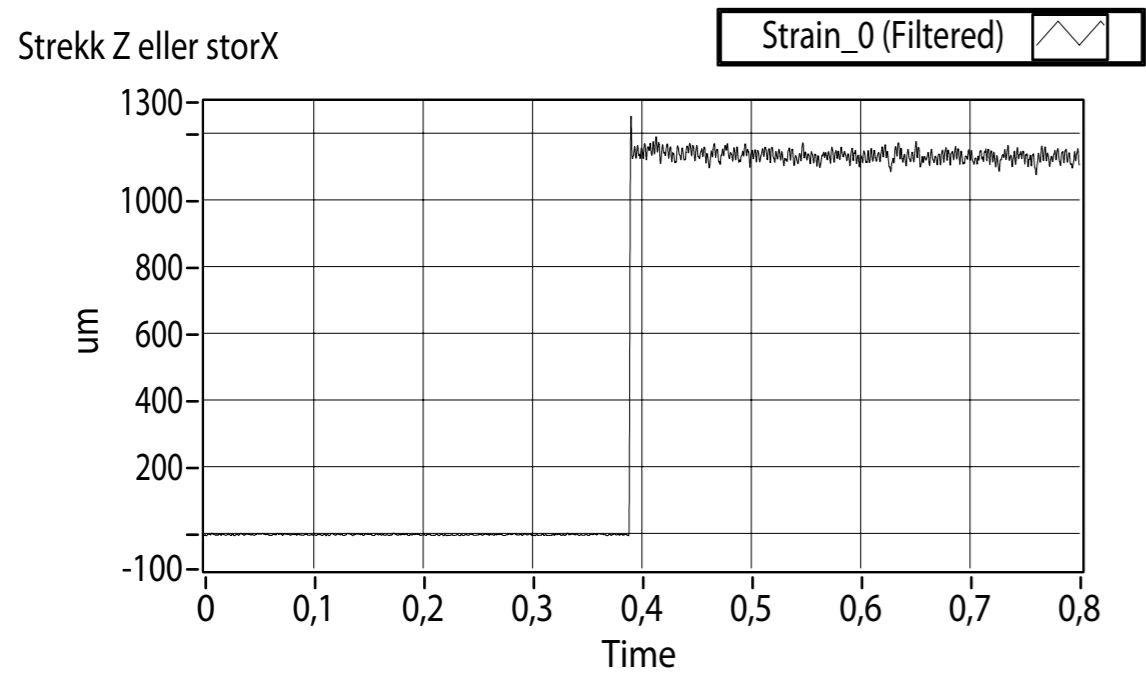
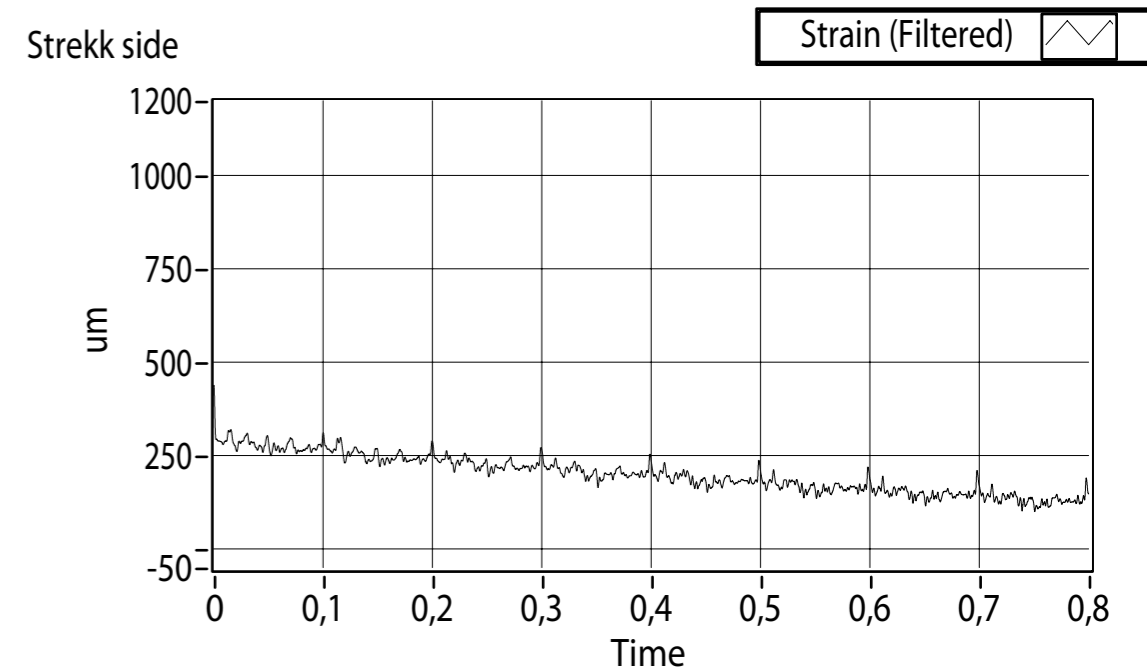
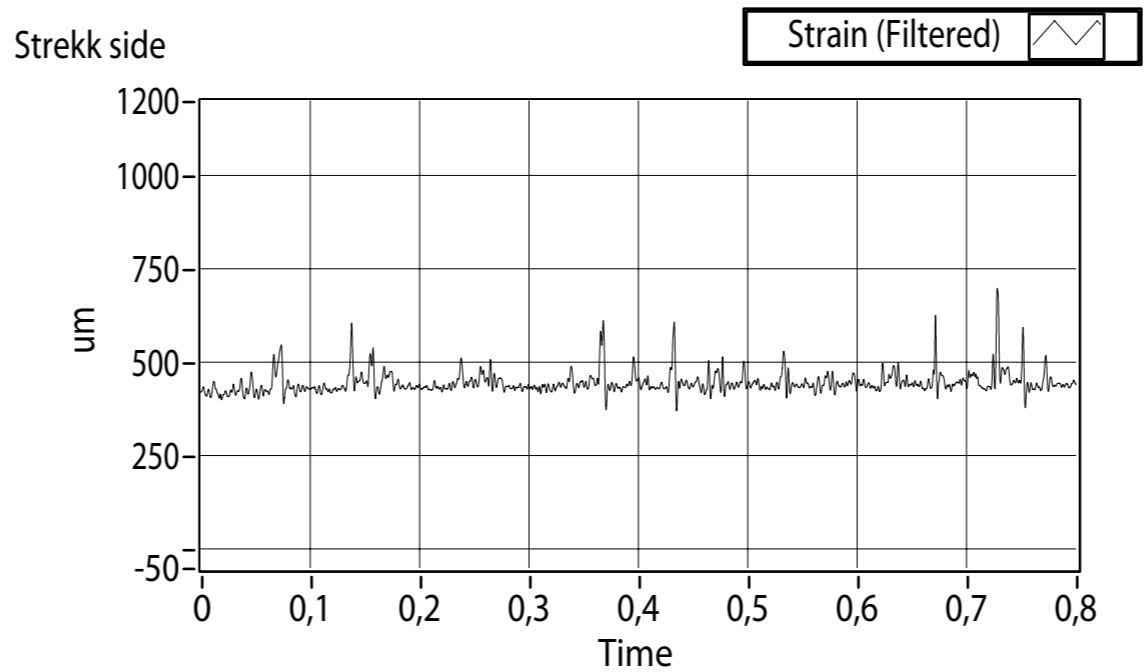
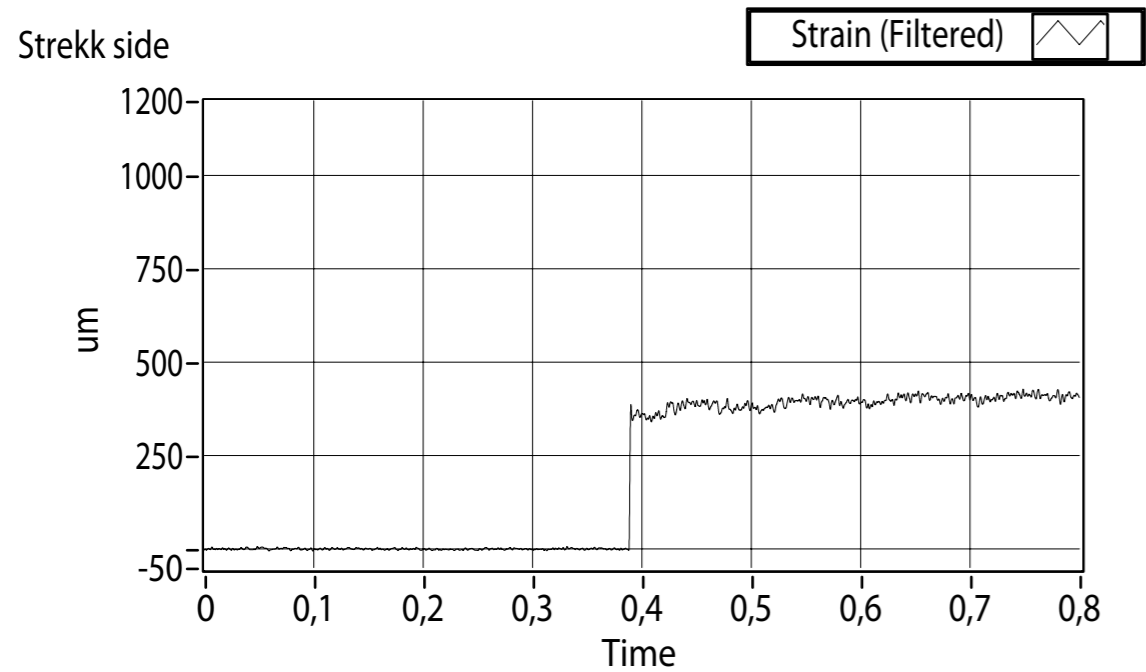
Vekt for å påføre  
stangen torsjonskraft.



# Vedlegg

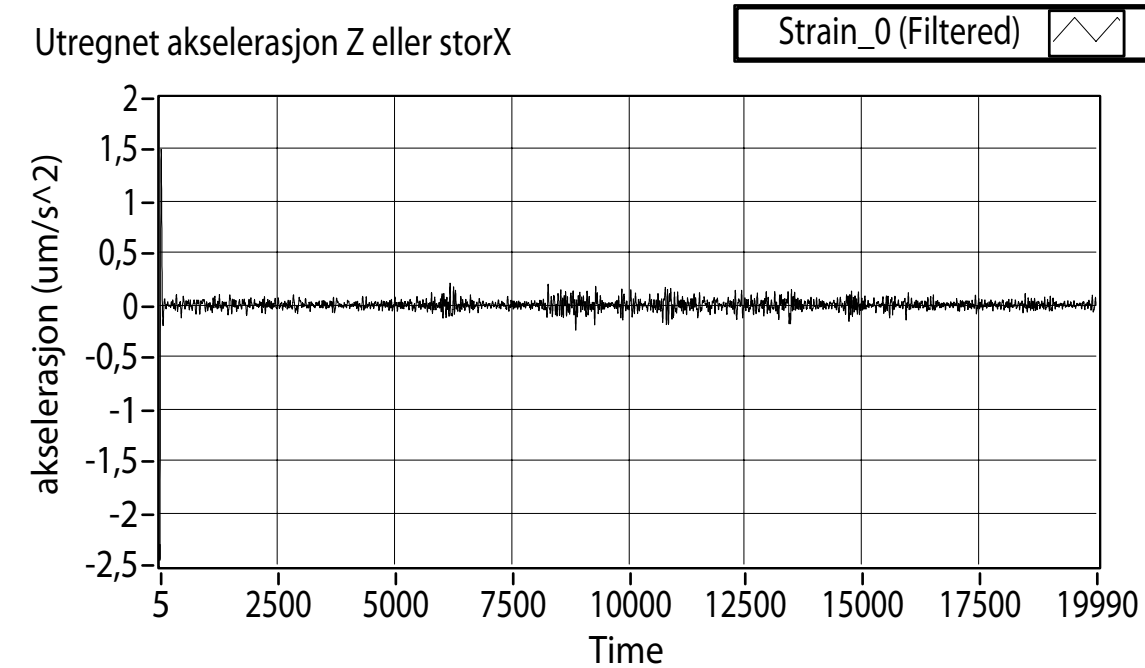
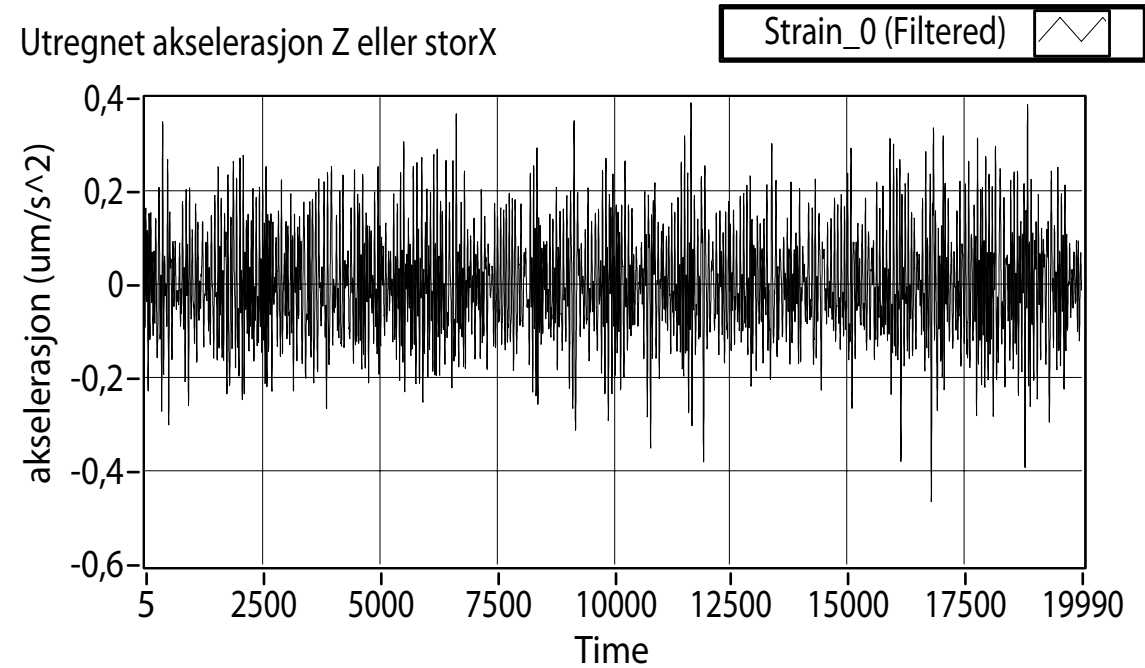
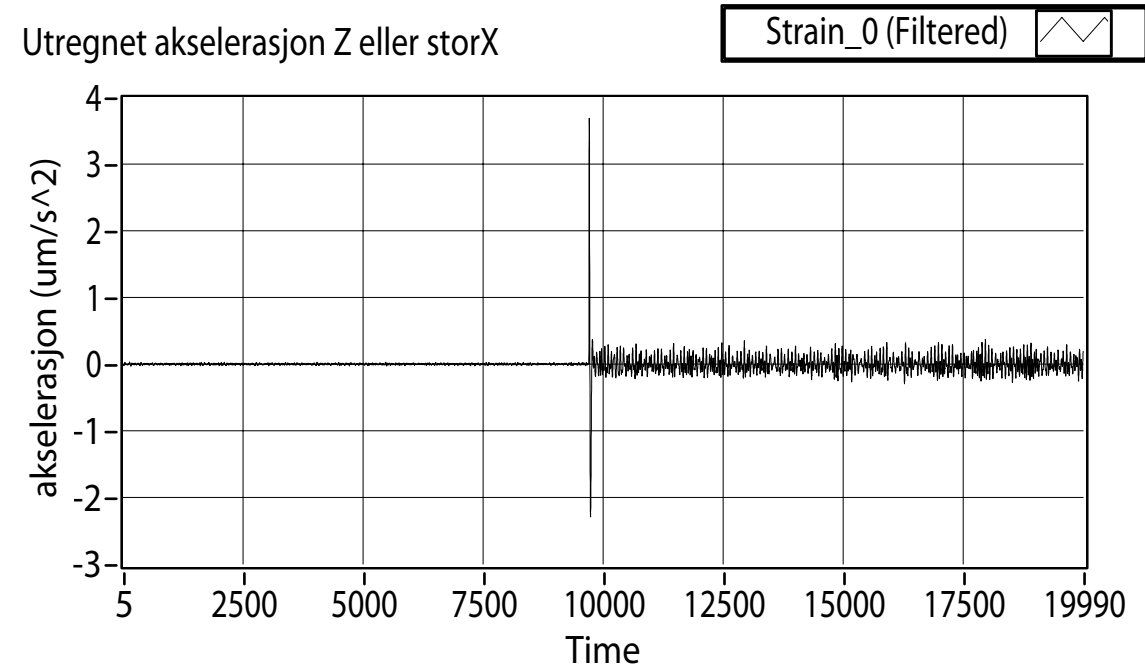
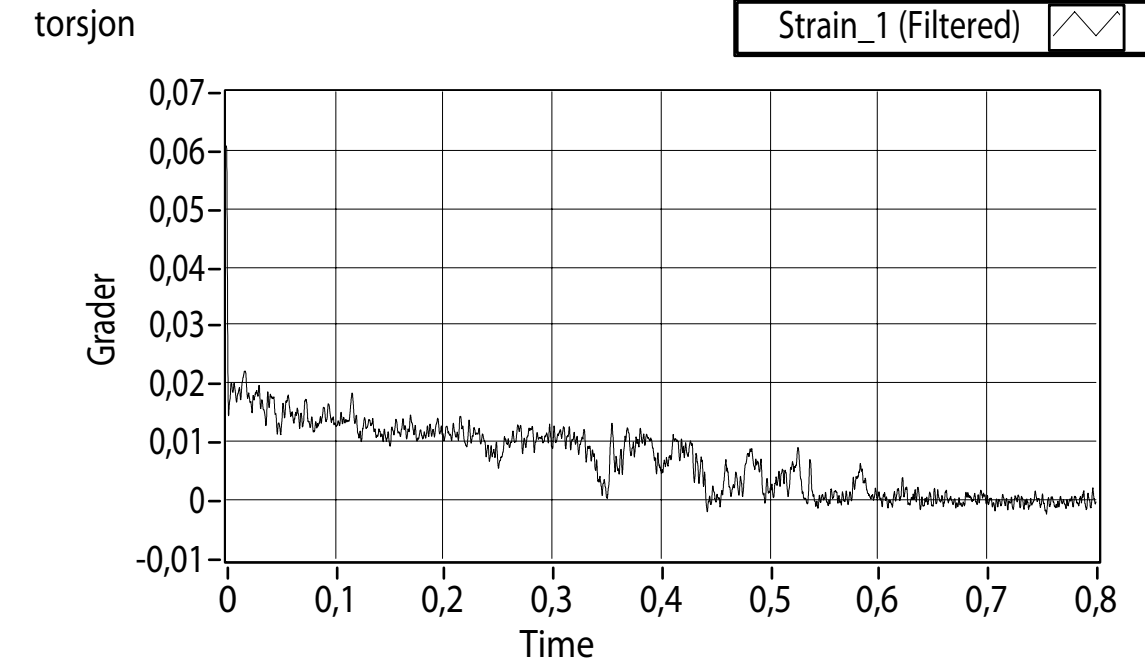
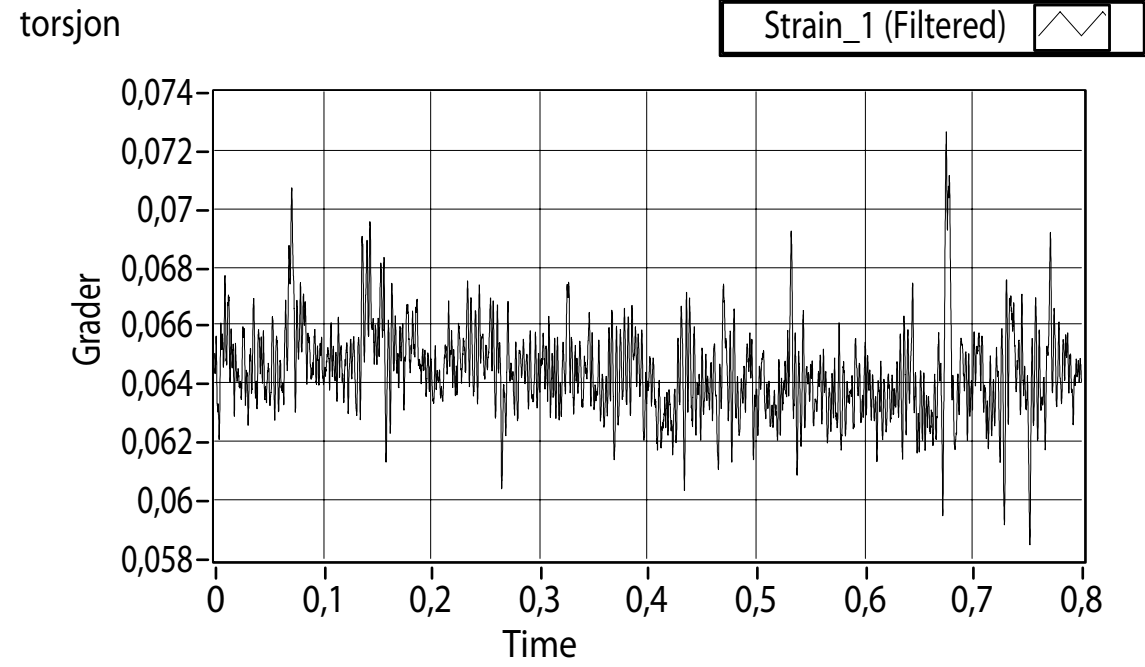
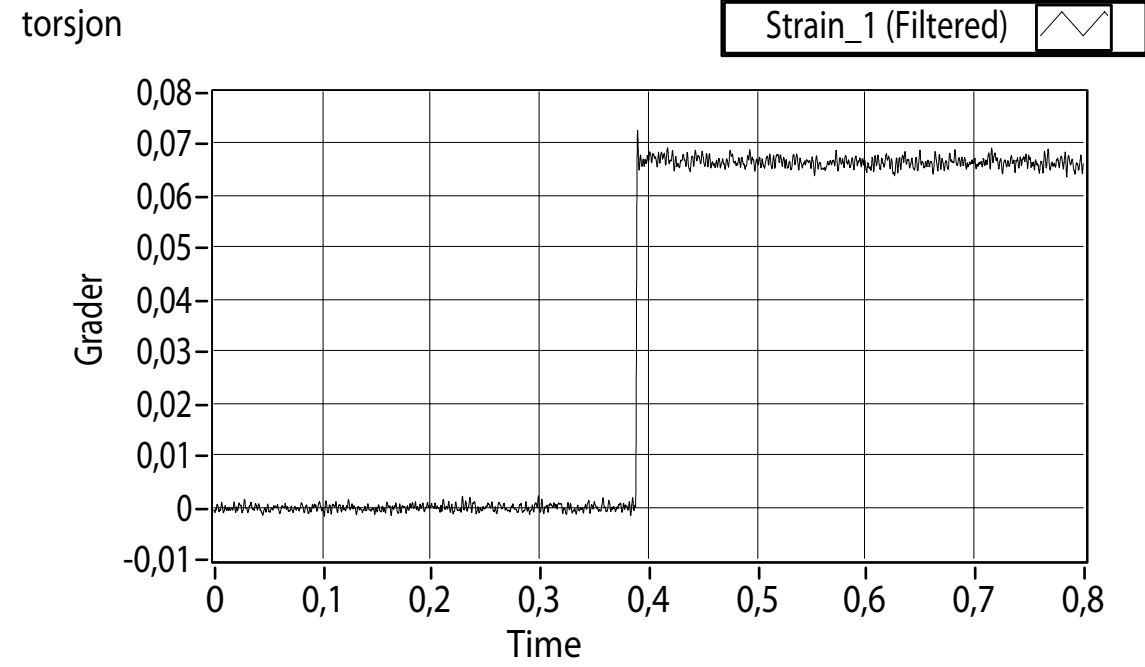
1. Bilder fra testing
2. **Grafer fra test i dreiebenk**
3. Python-program
4. Arduino-program
5. C-program
6. LabView-program
7. Datablad for lim HBM z70
8. Forstudierapport

0,8mm skjær, 3mm kutt

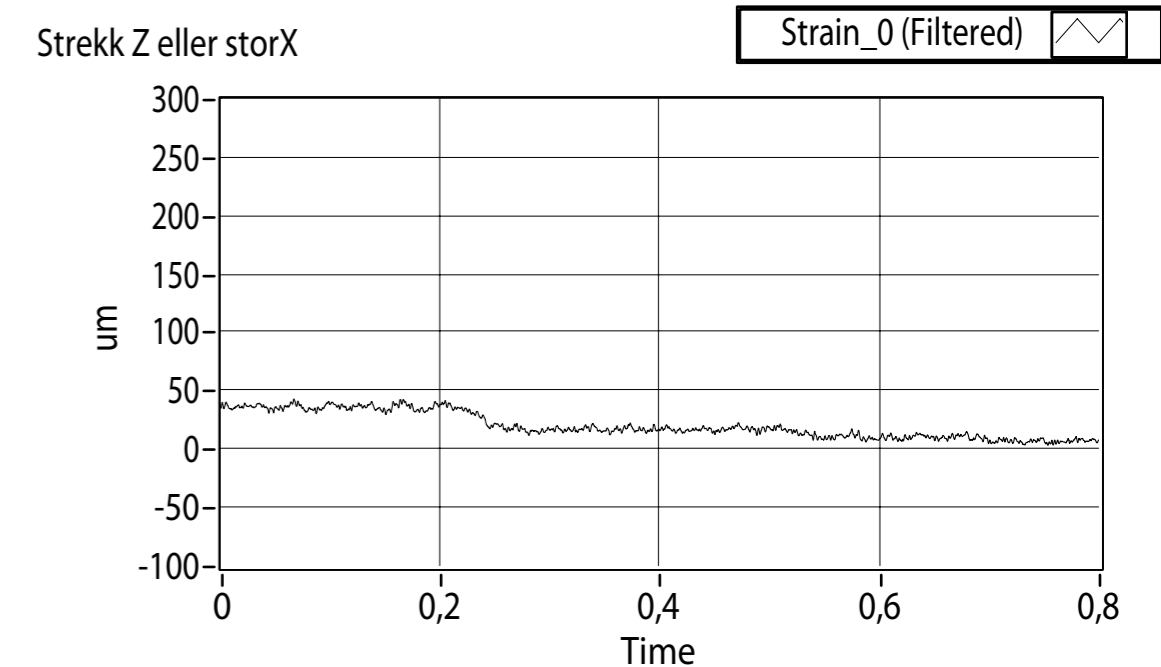
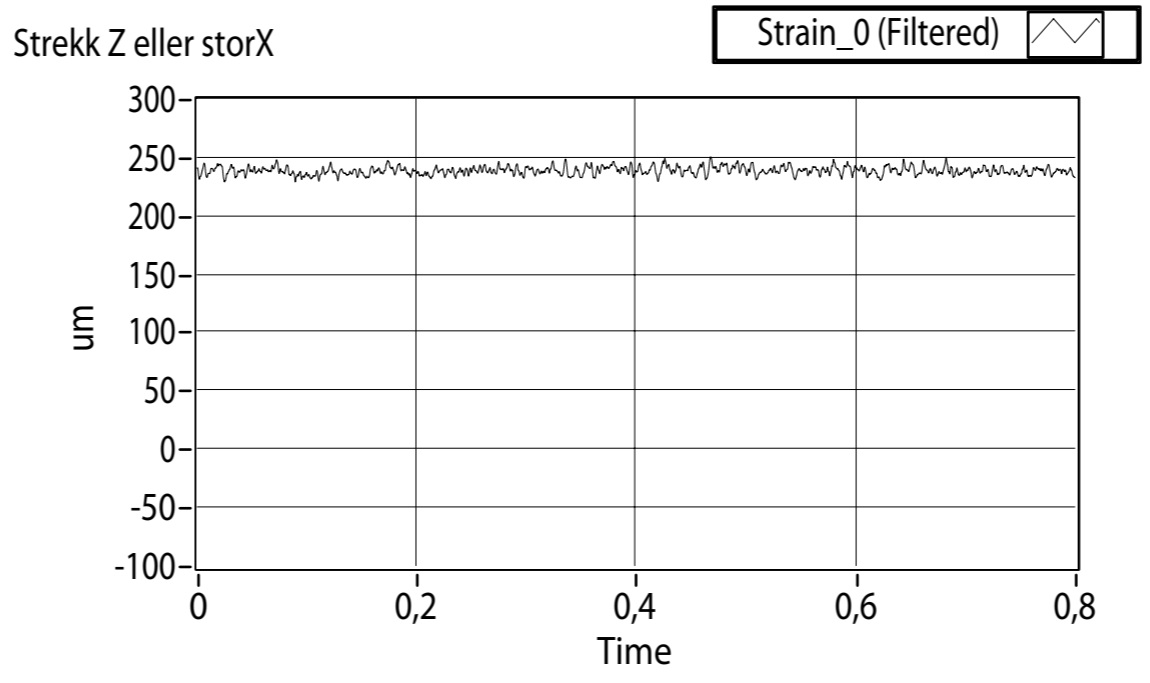
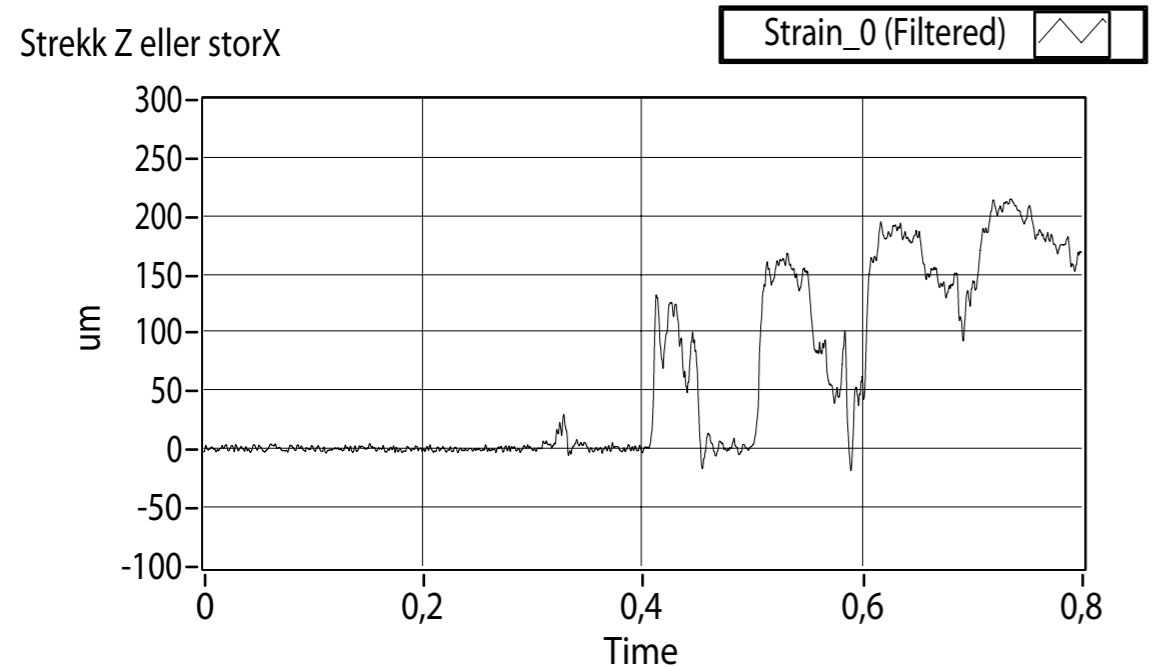
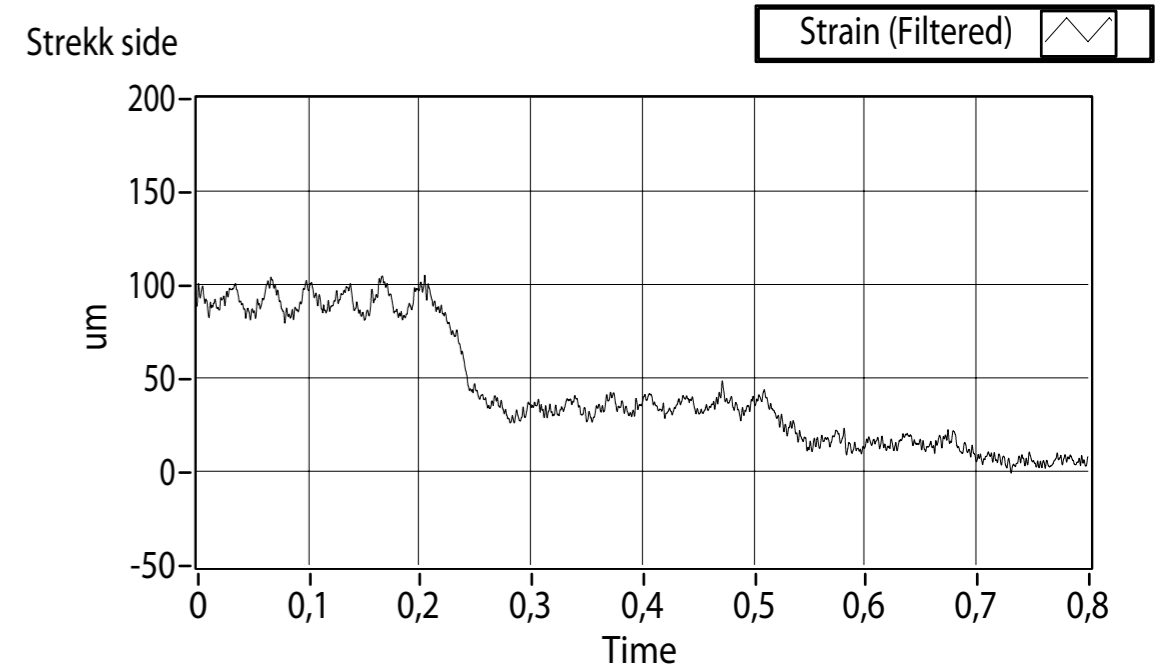
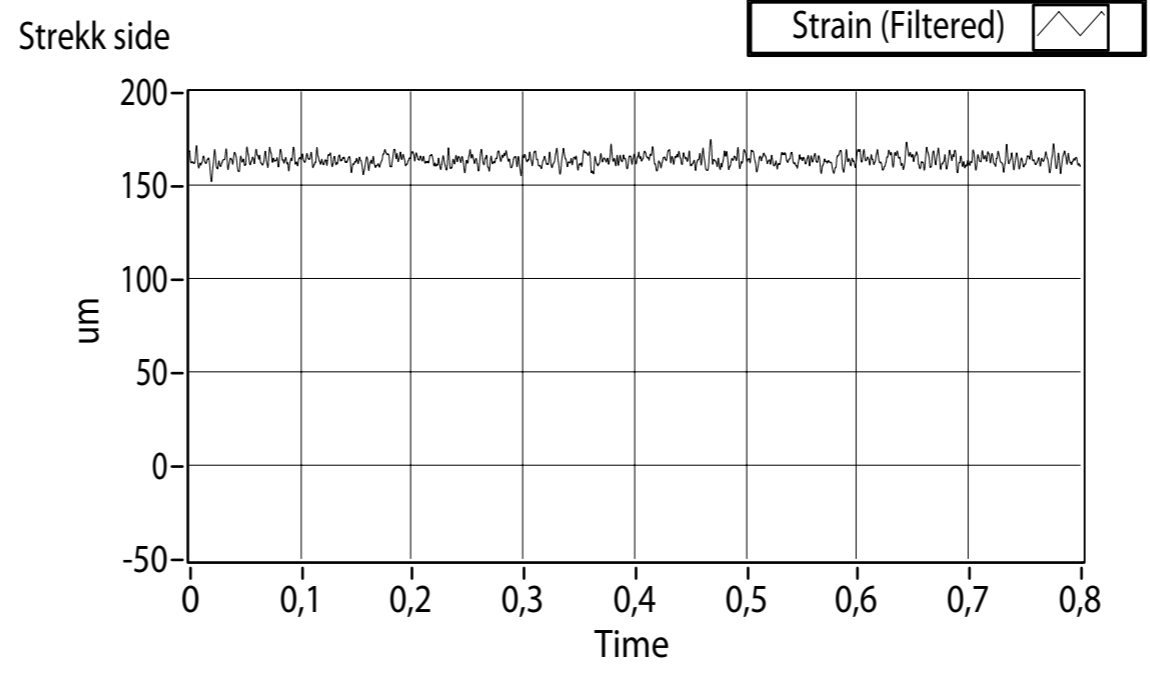
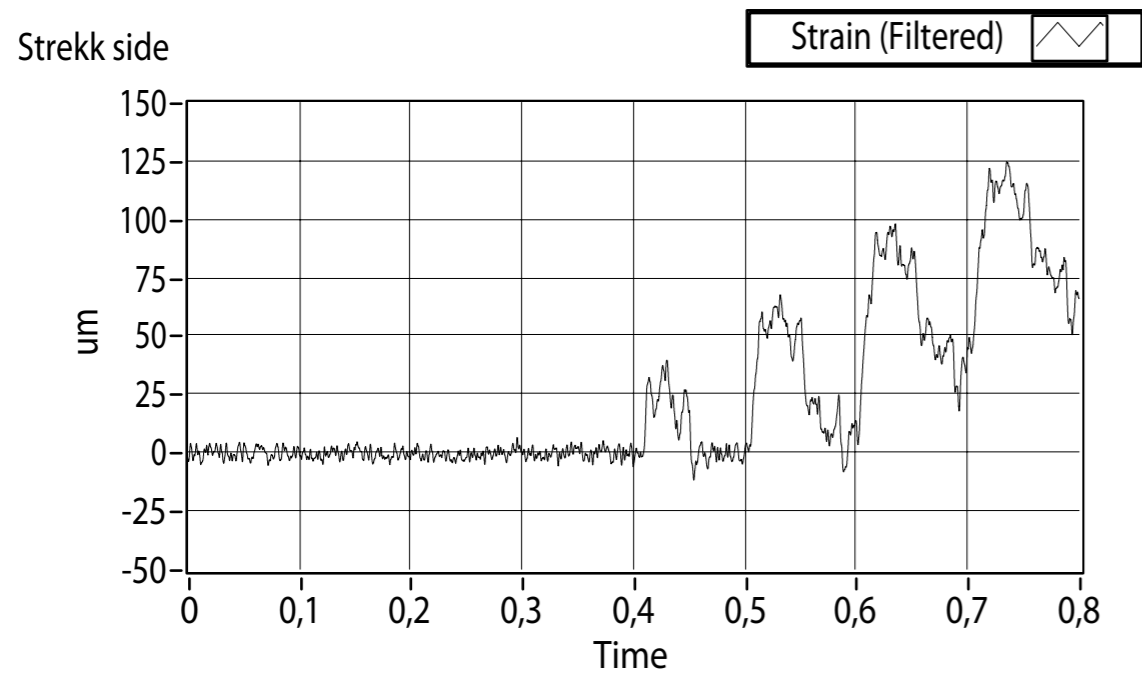




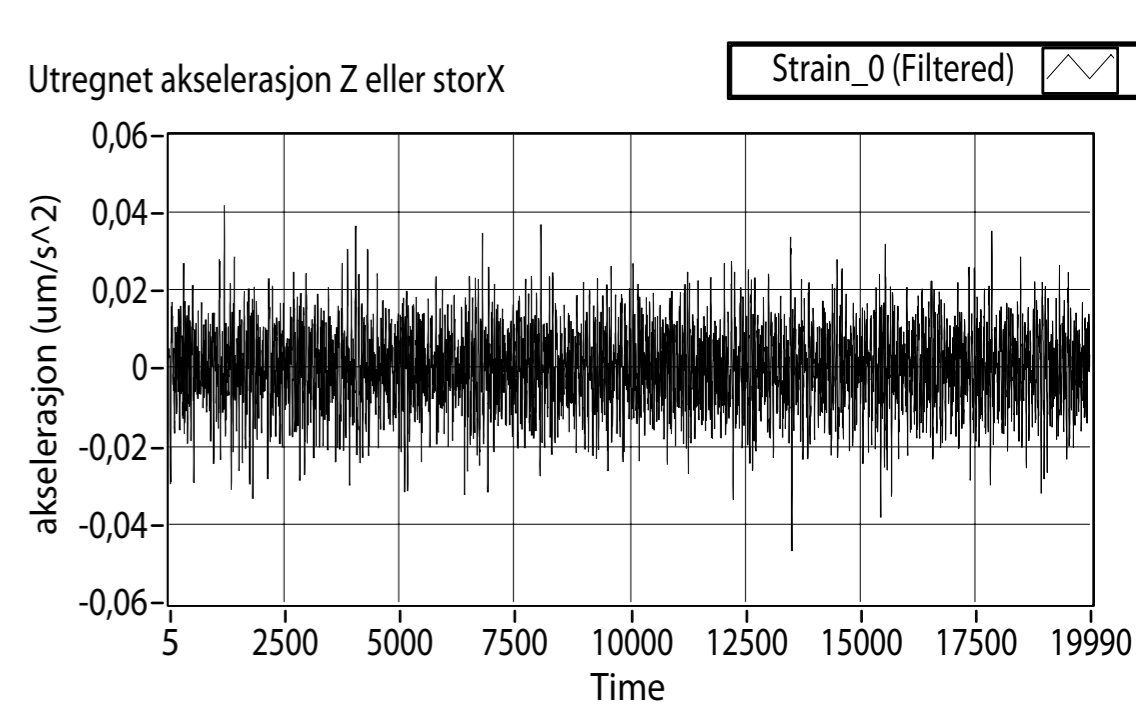
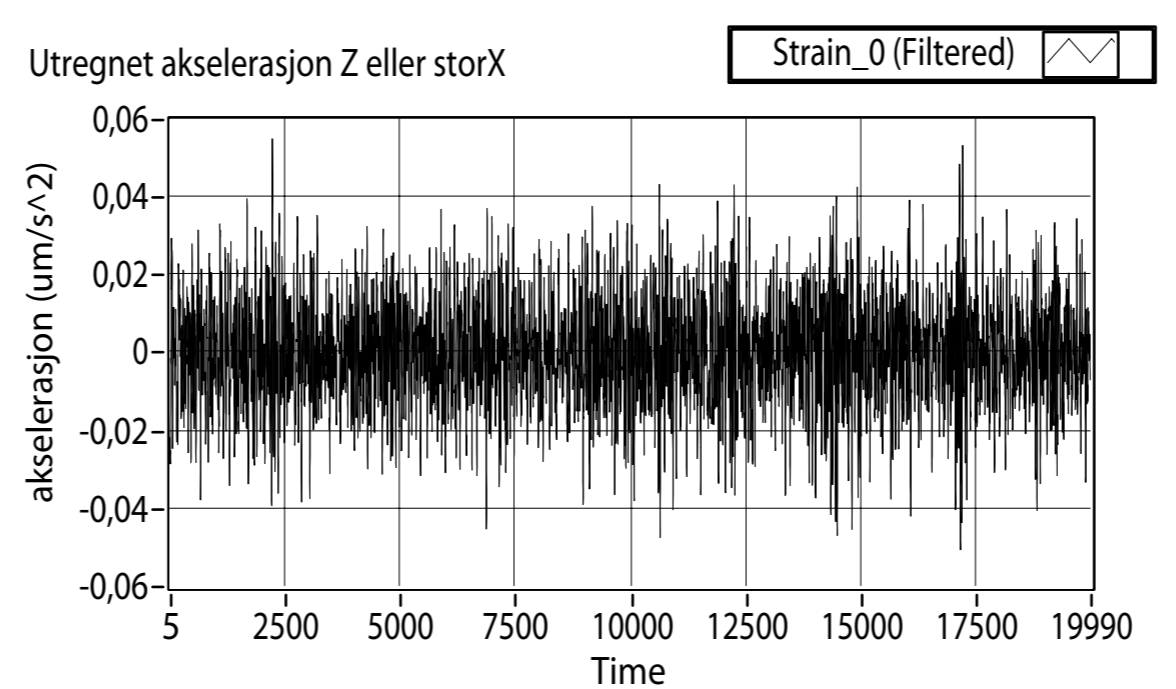
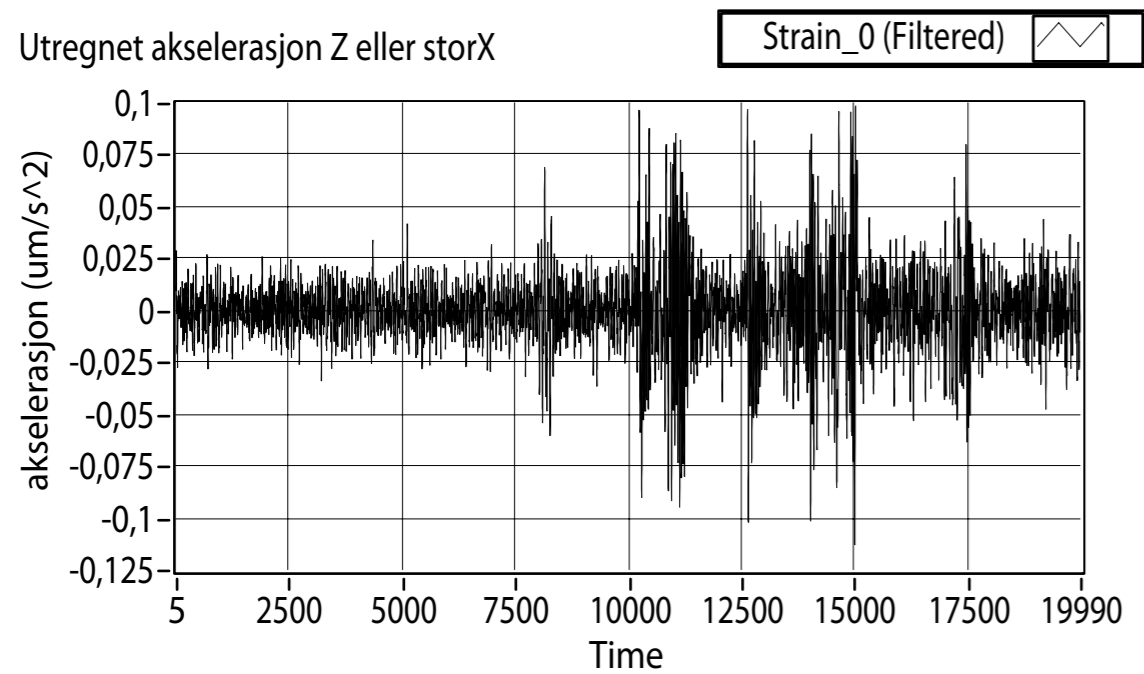
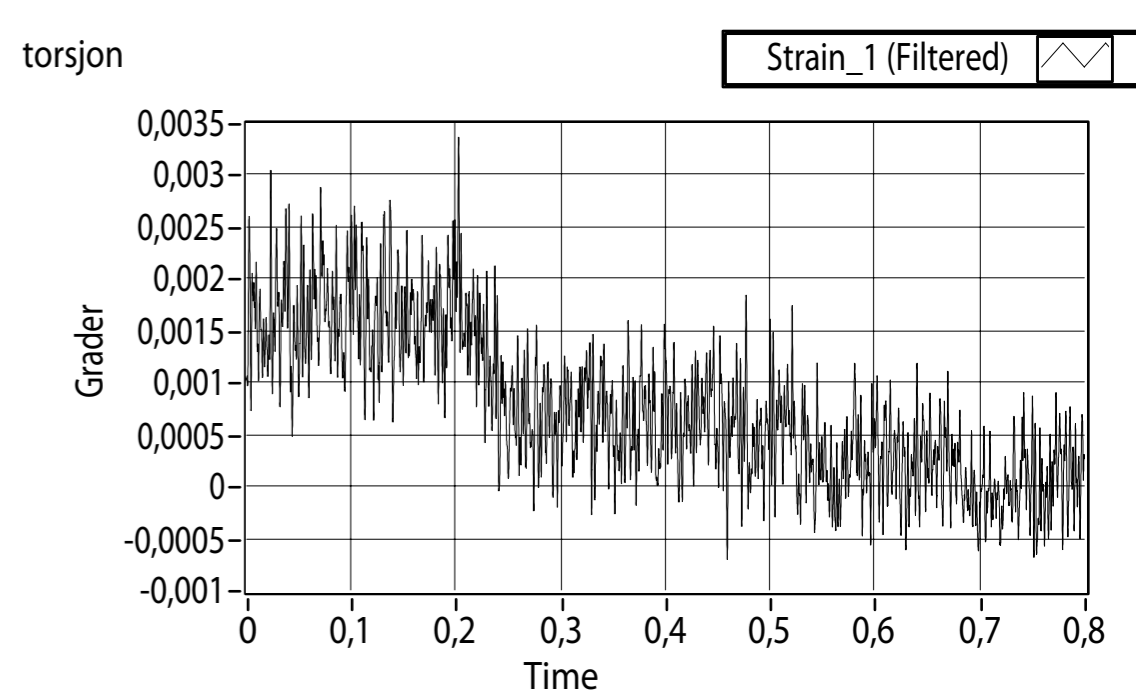
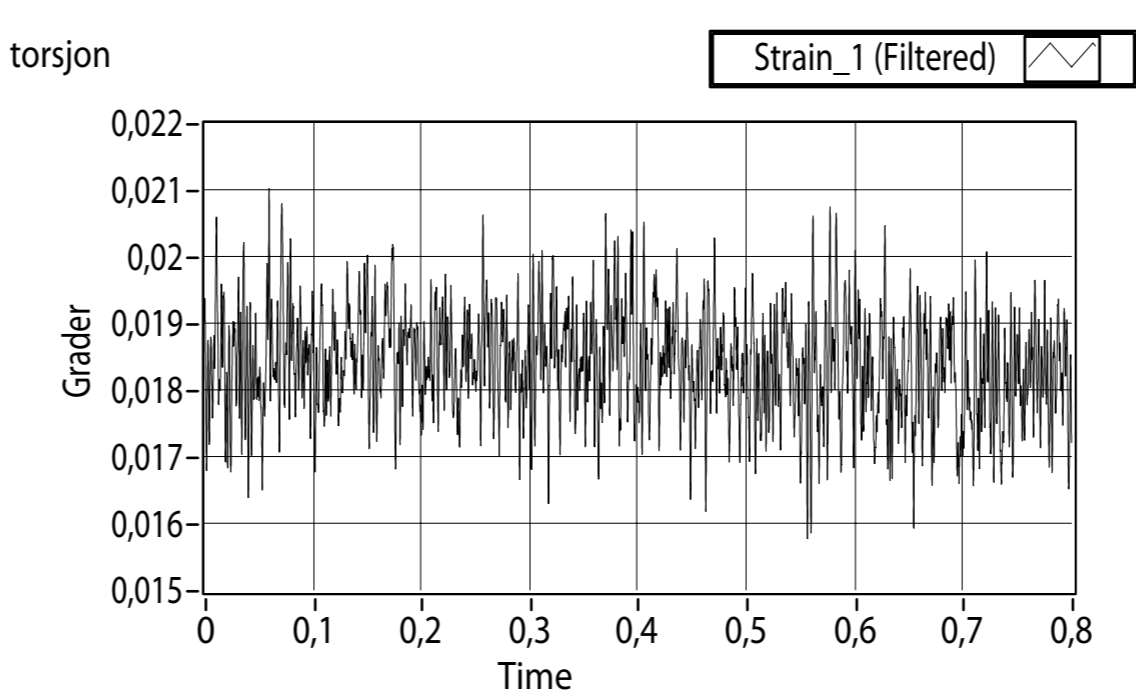
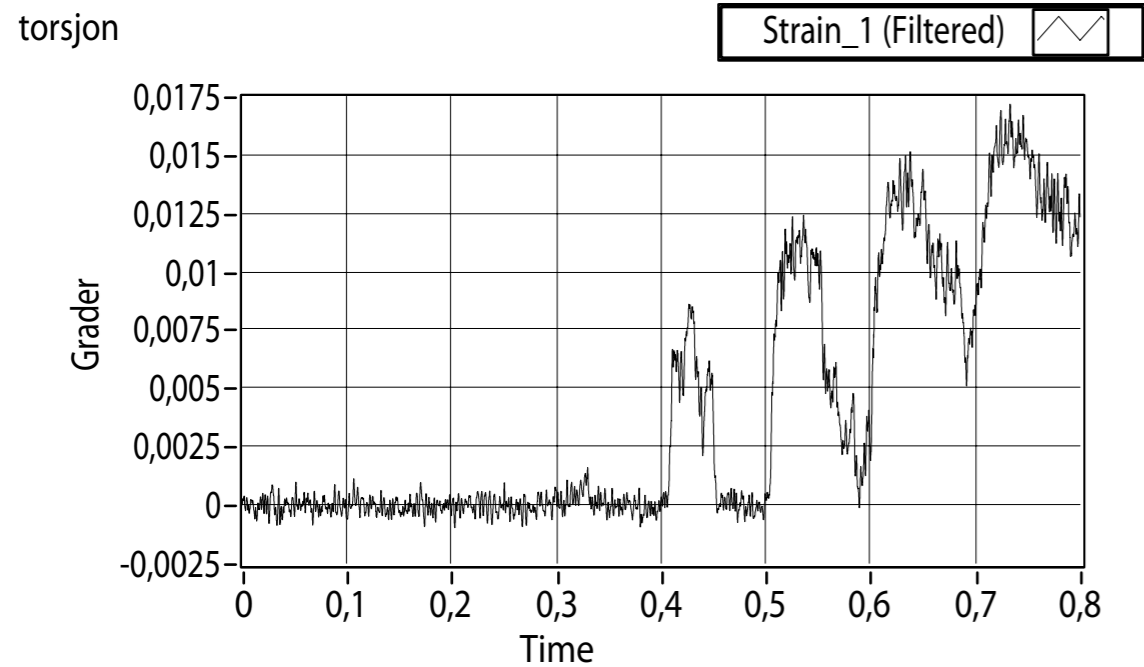
0,8mm skjær, 3mm kutt



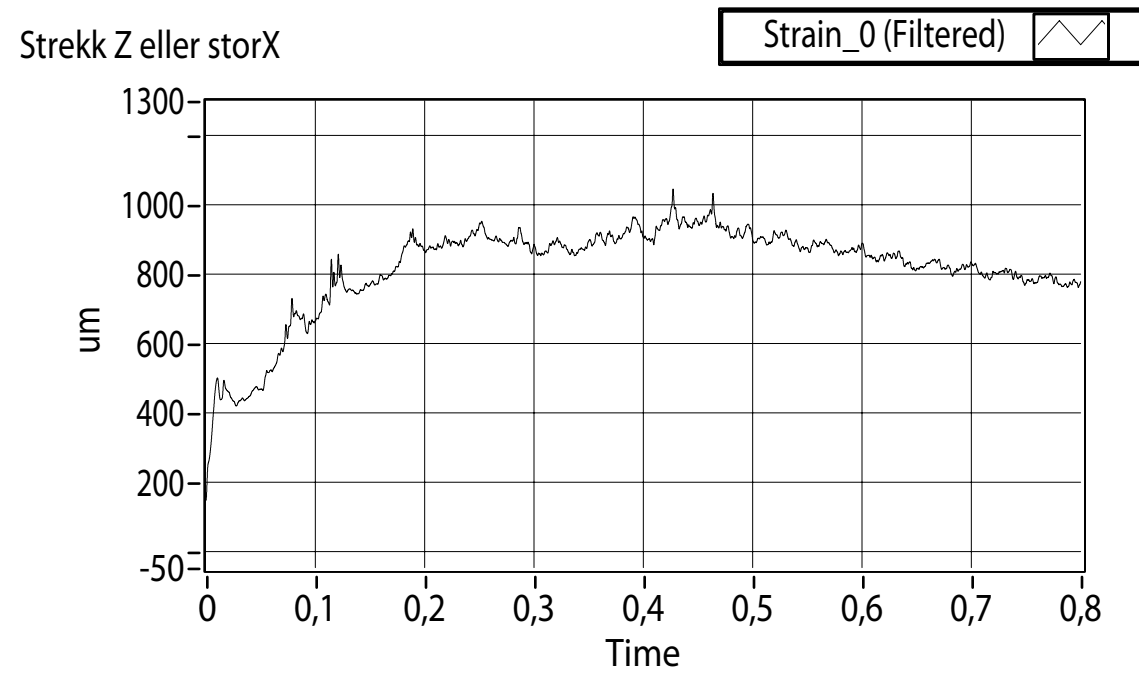
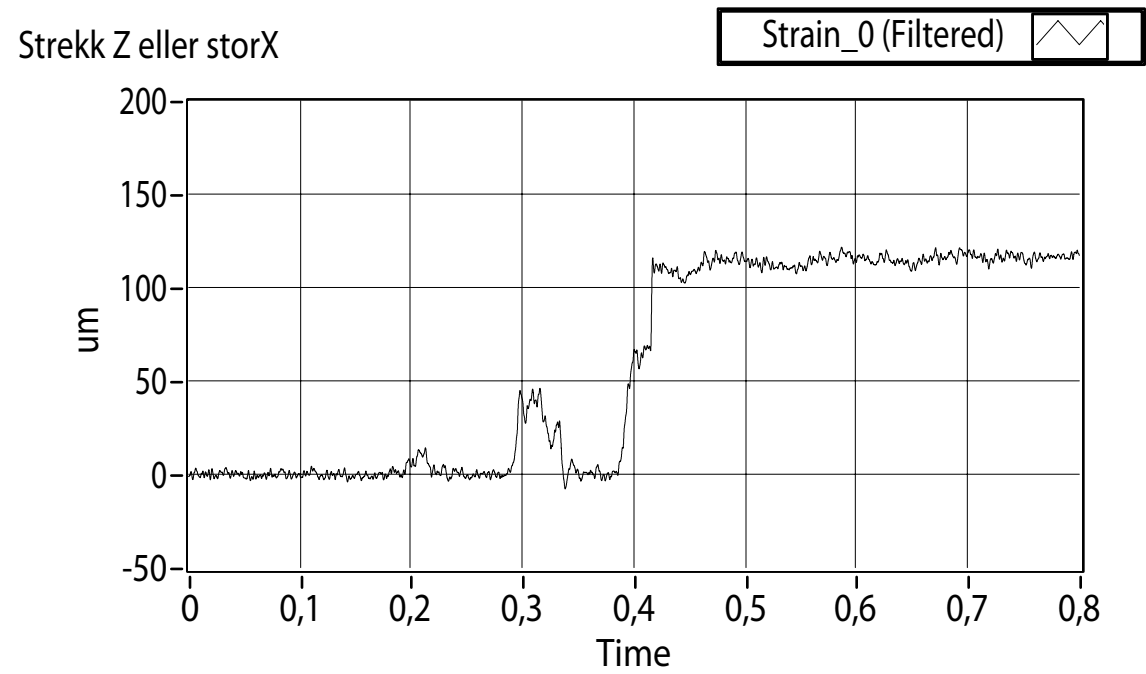
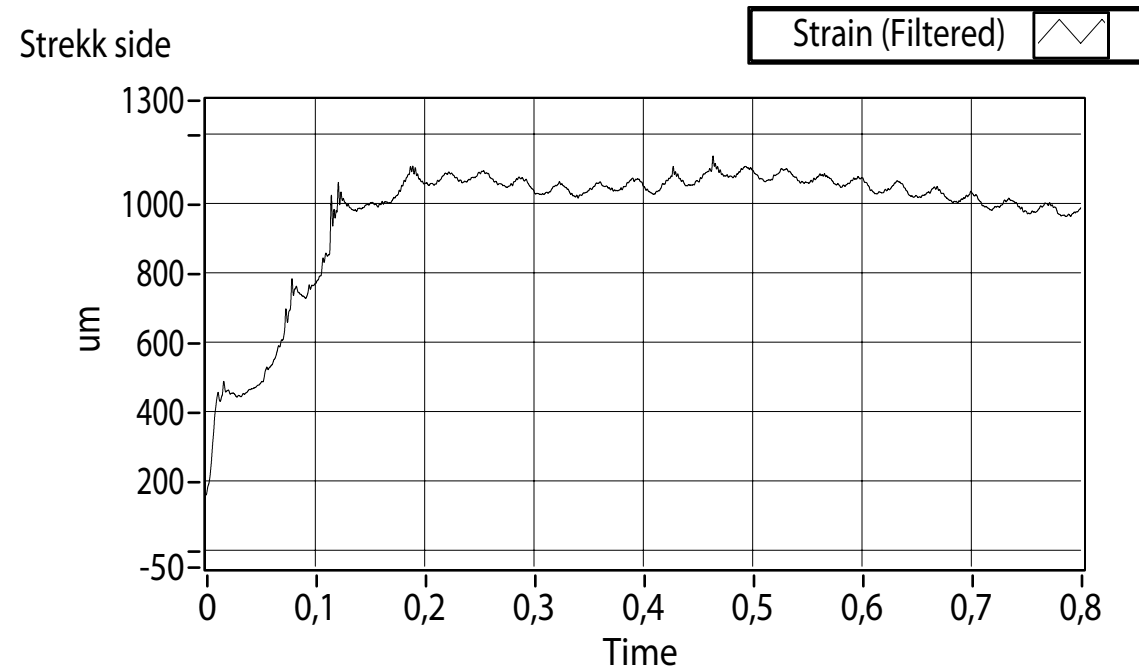
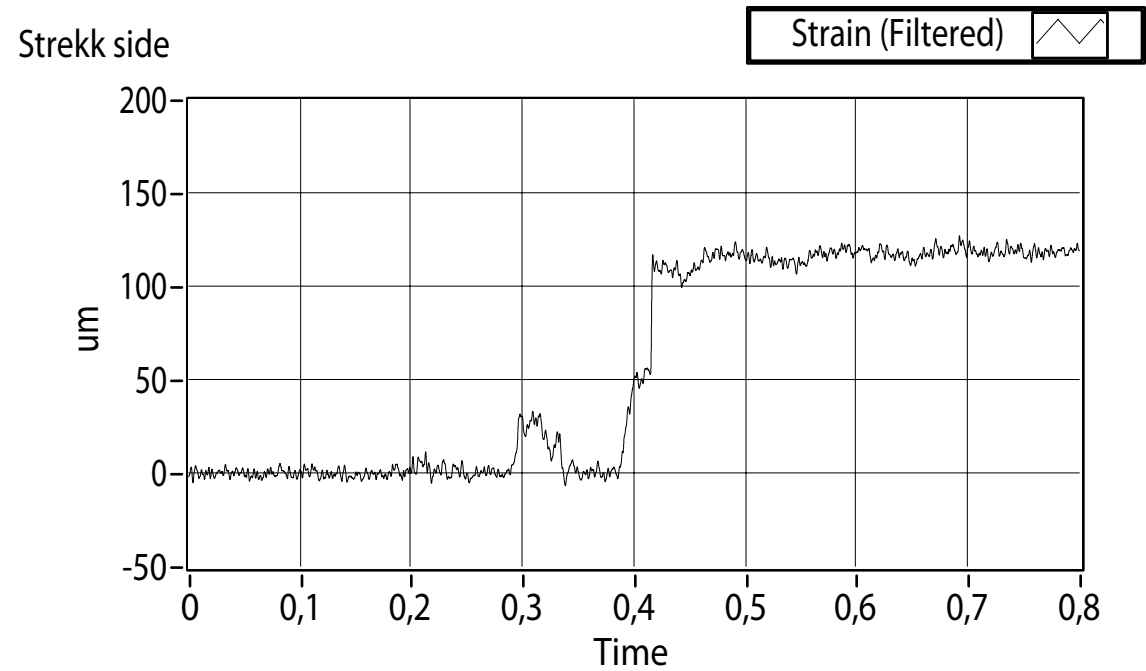
0,8mm skjær, 1mm kutt



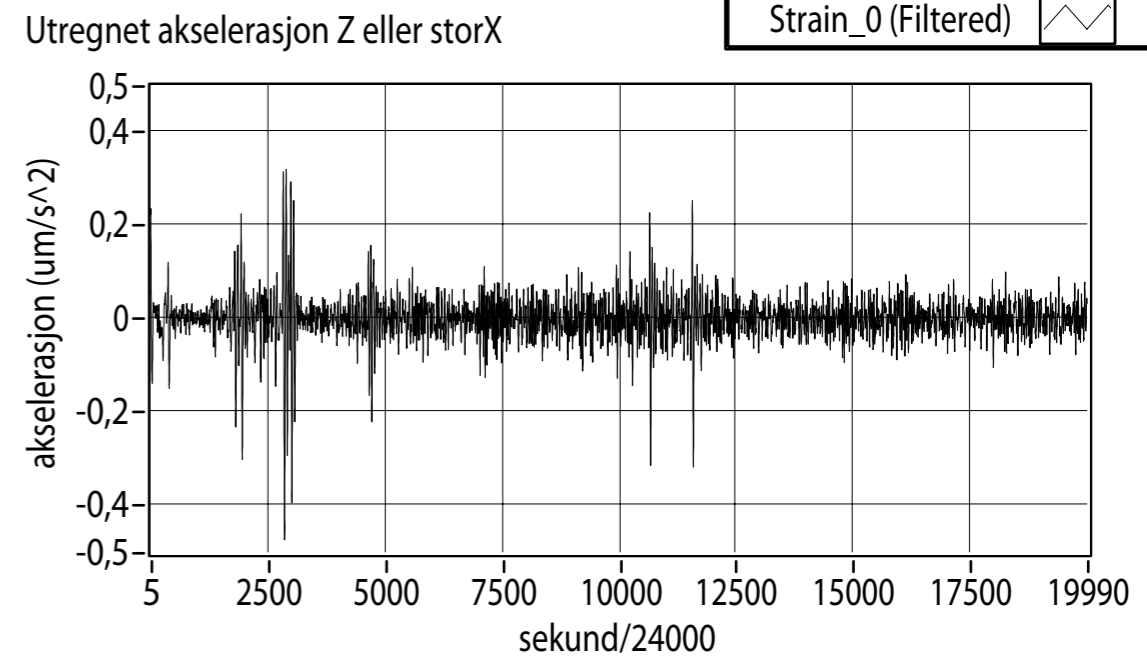
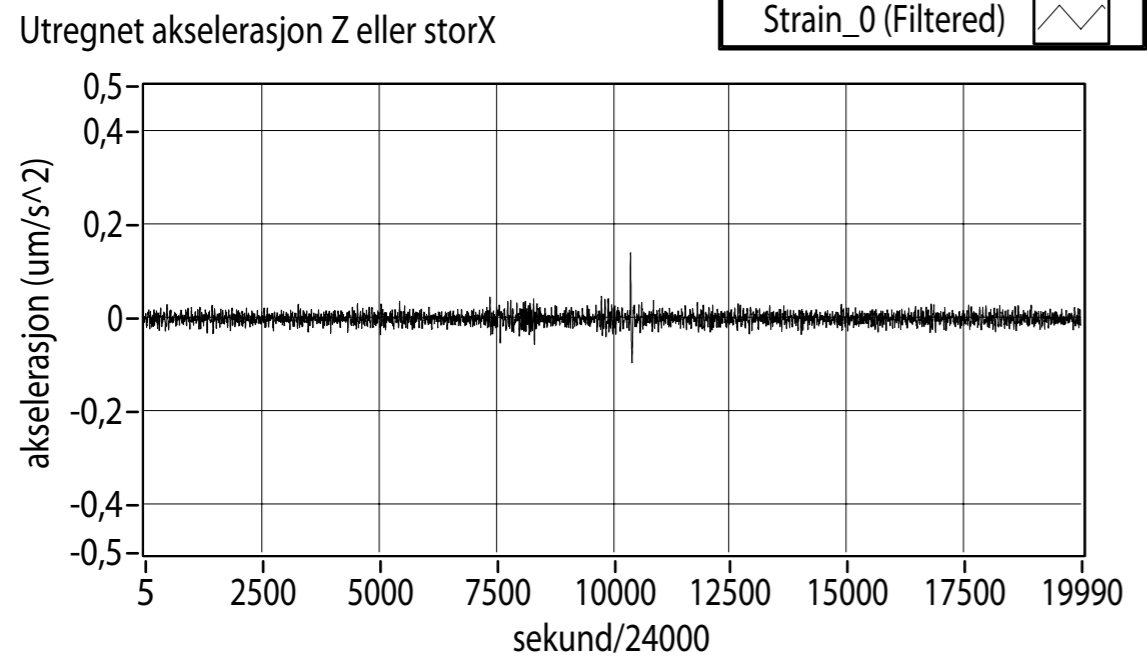
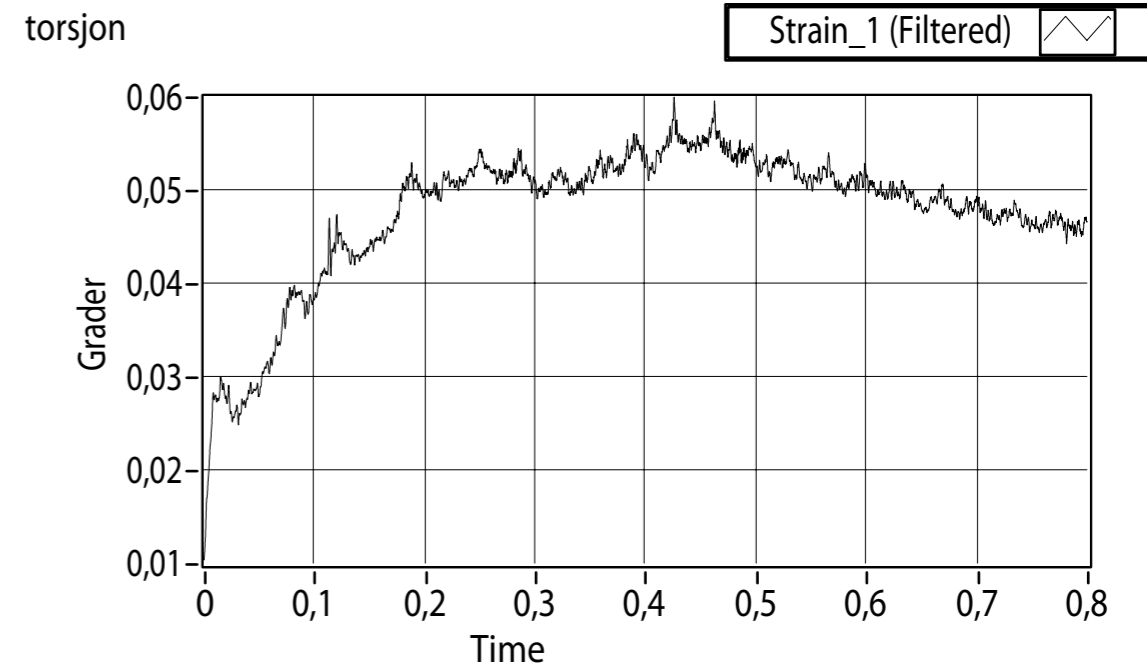
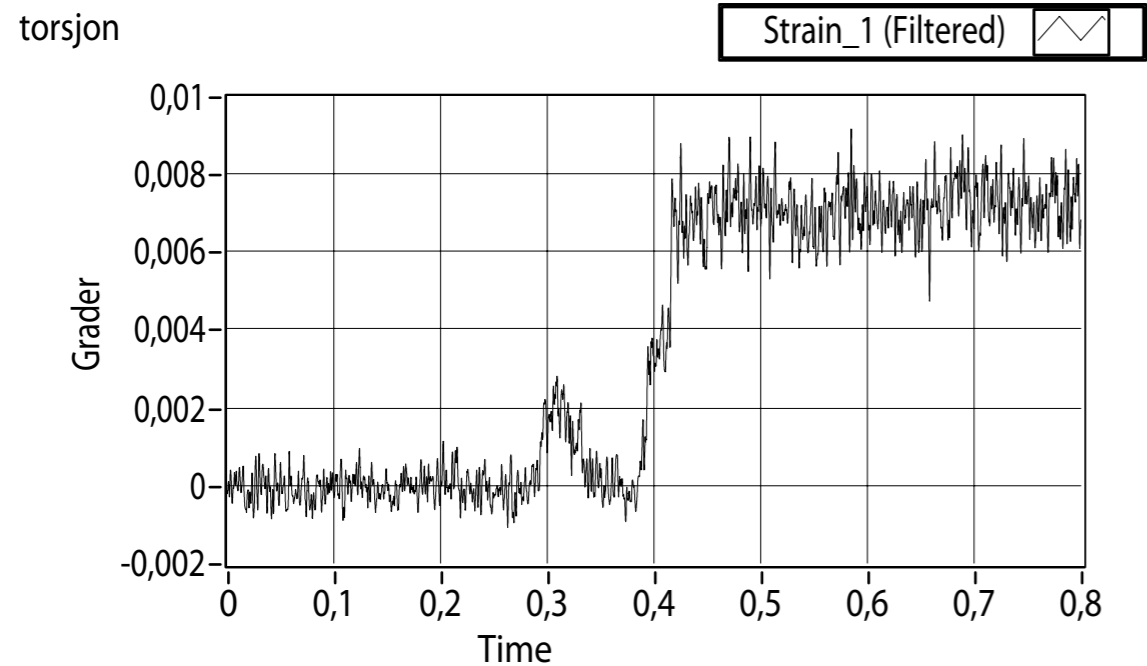
0,8mm skjær, 1mm kutt



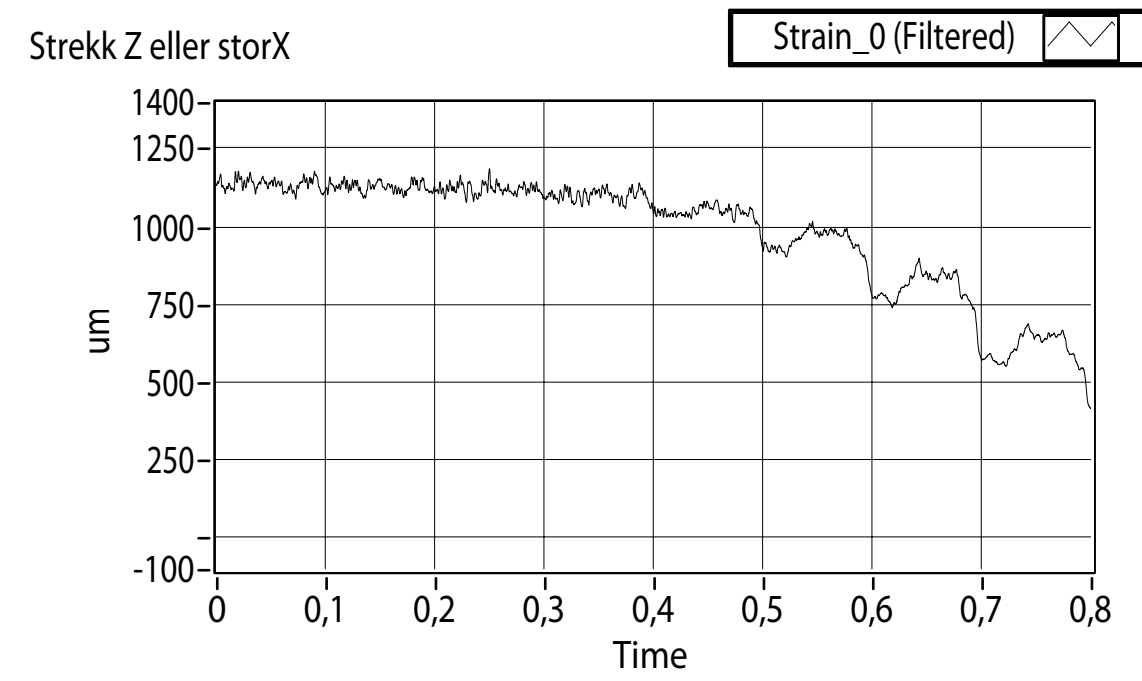
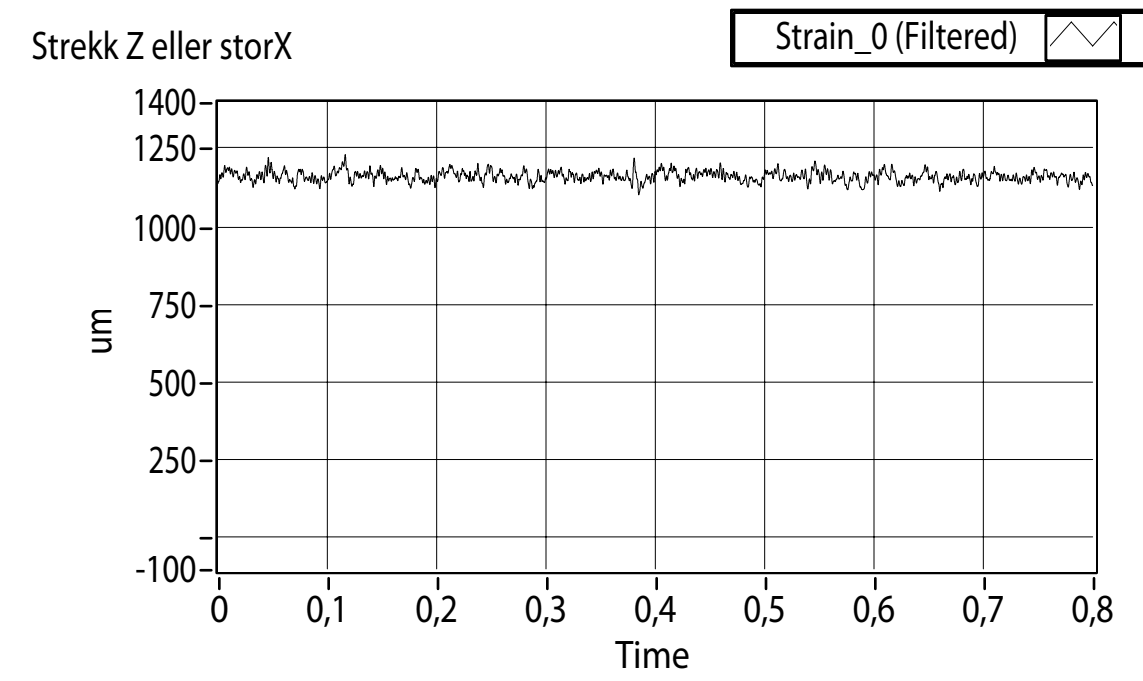
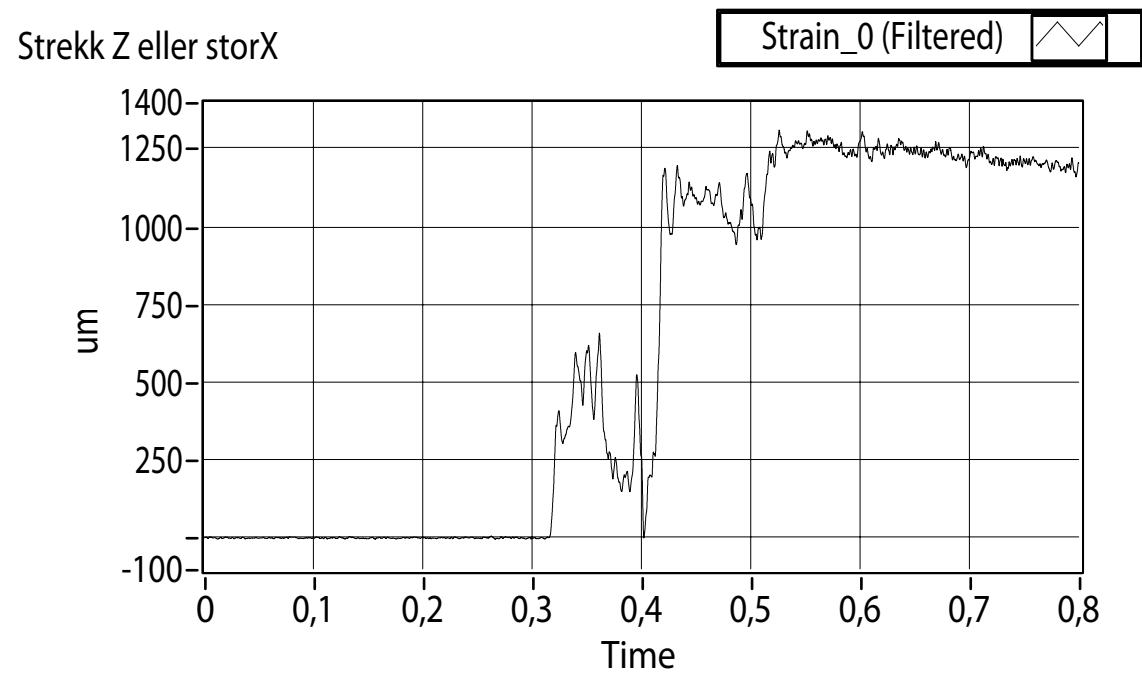
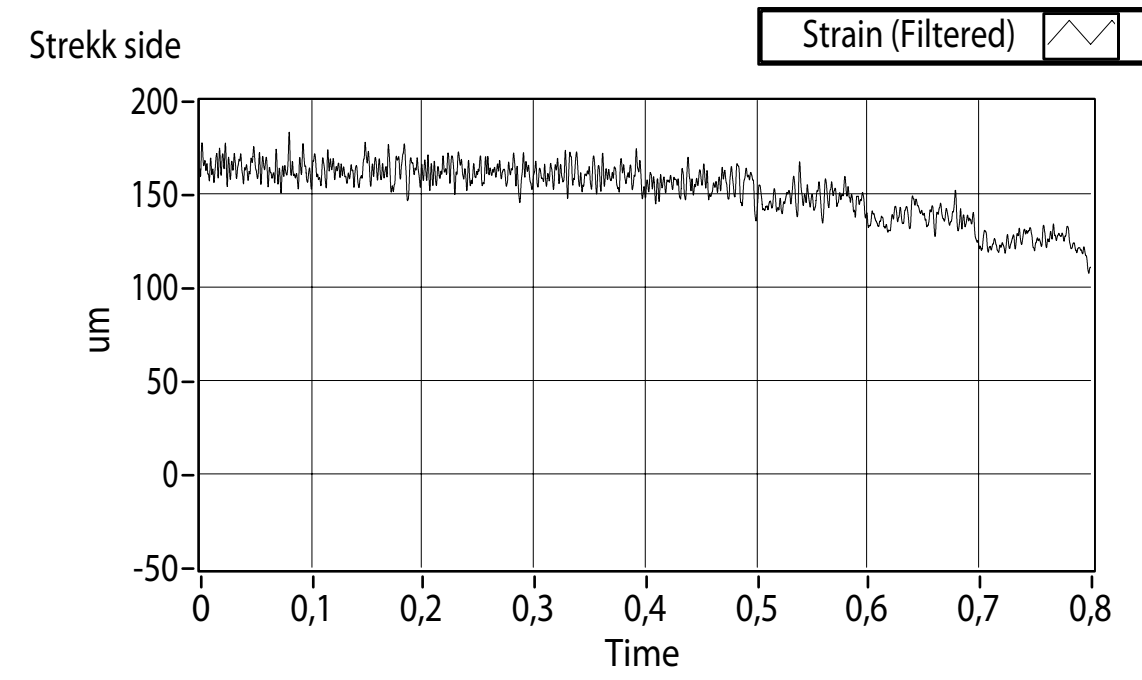
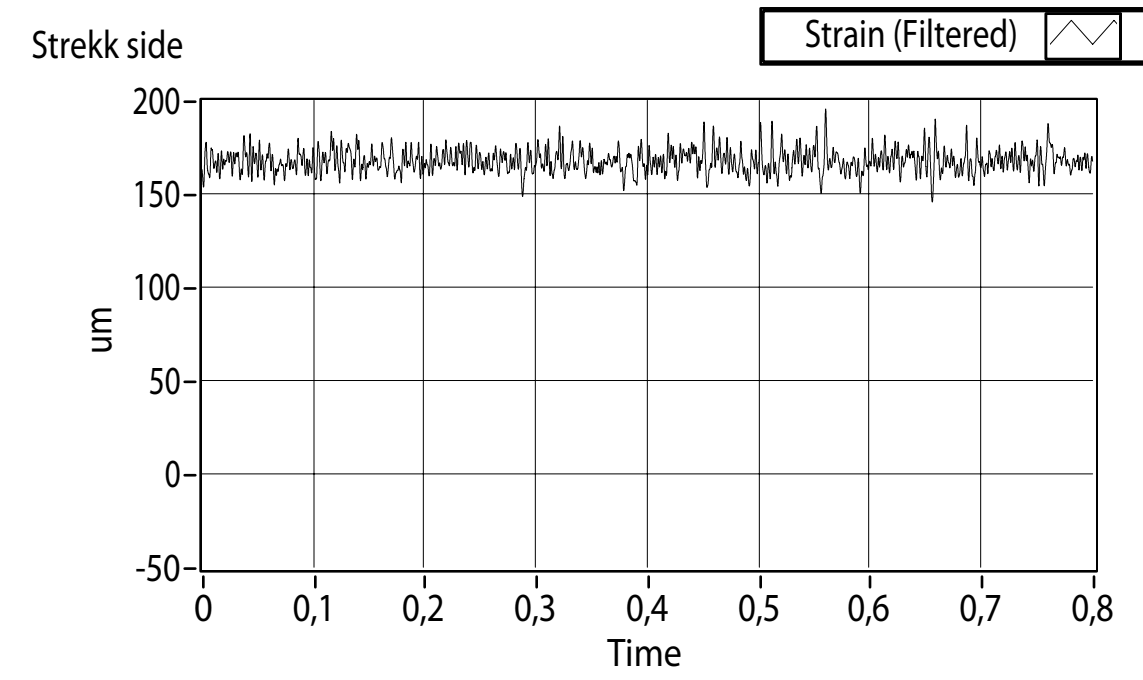
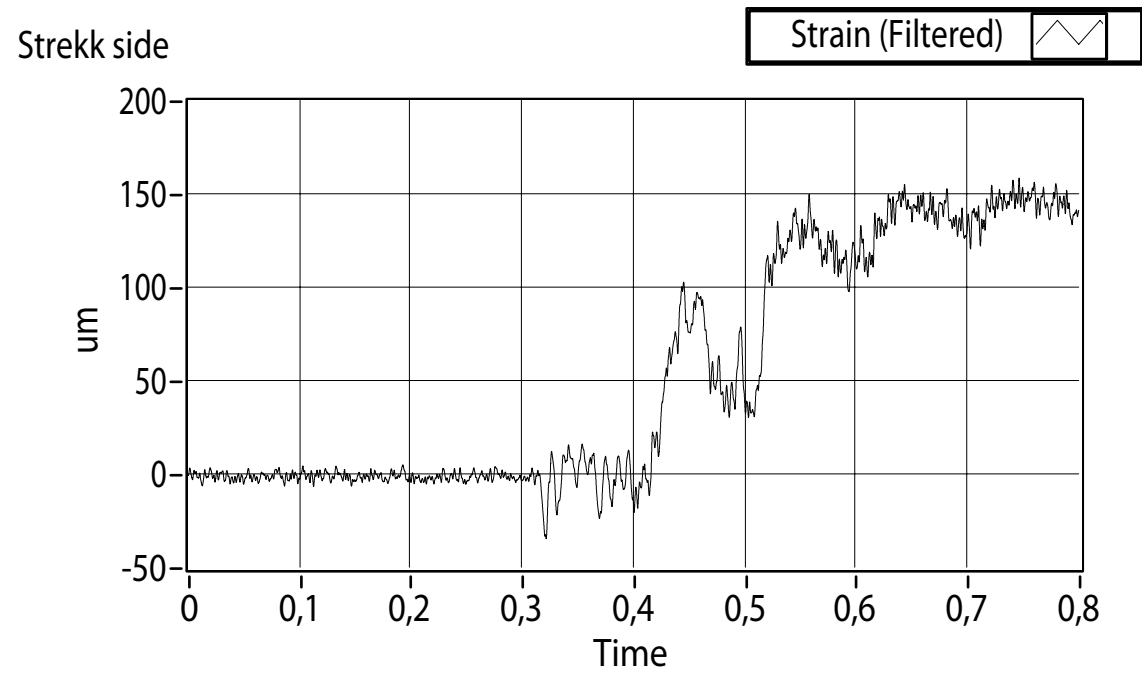
0,8mm skjær, 0,5mm kutt



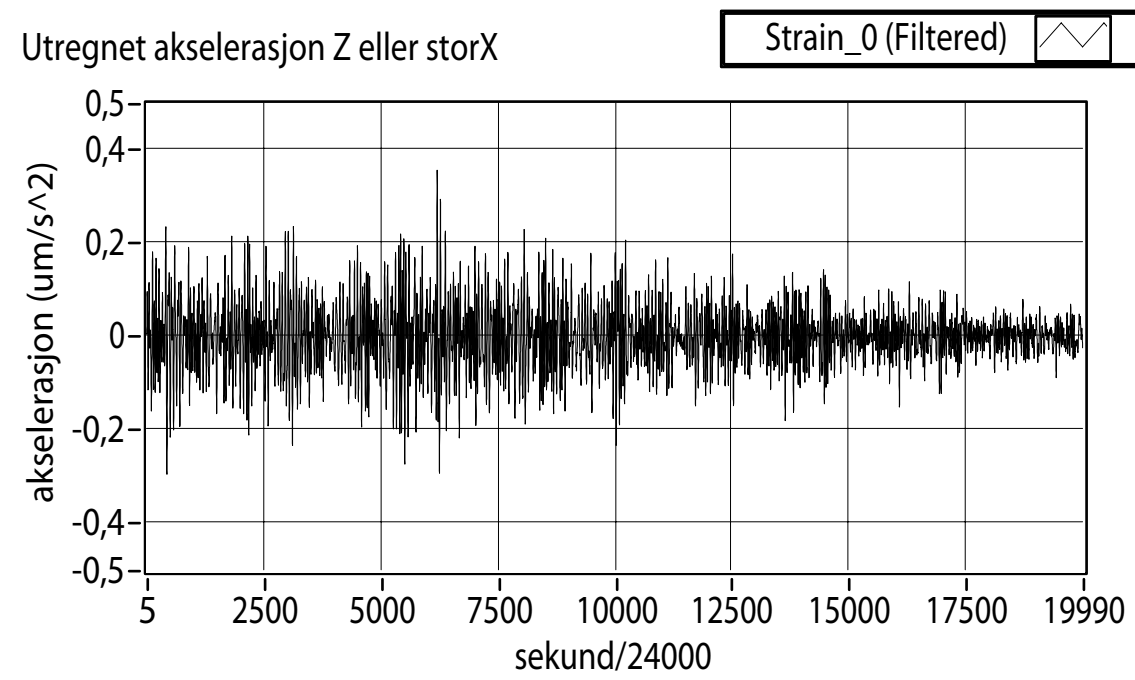
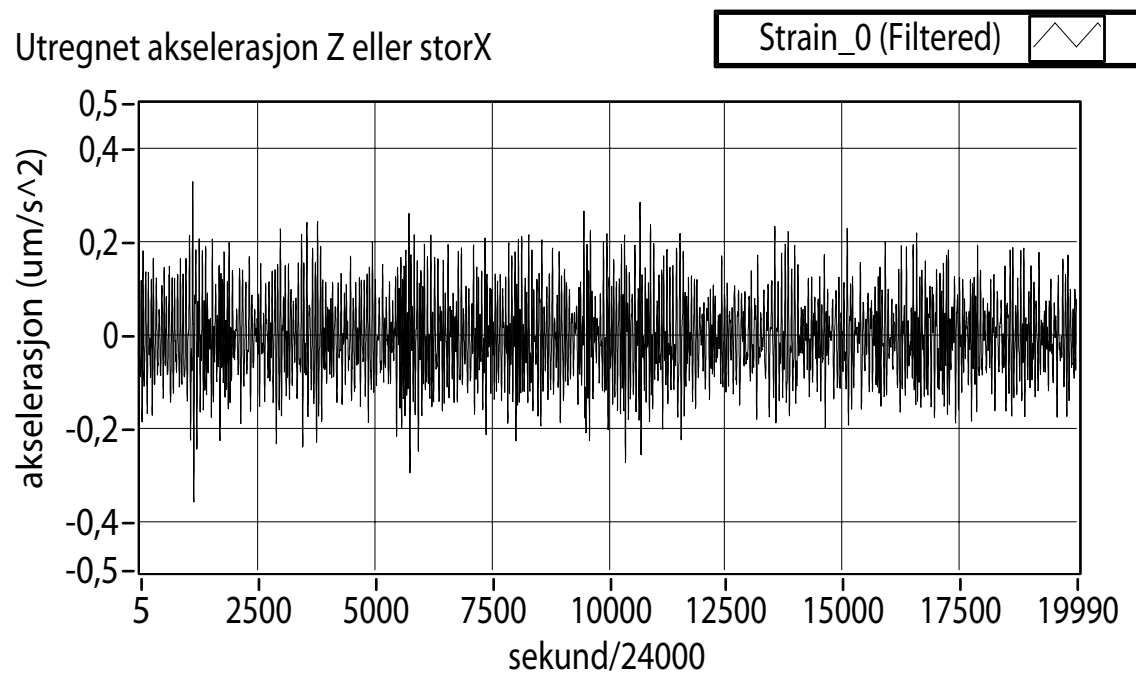
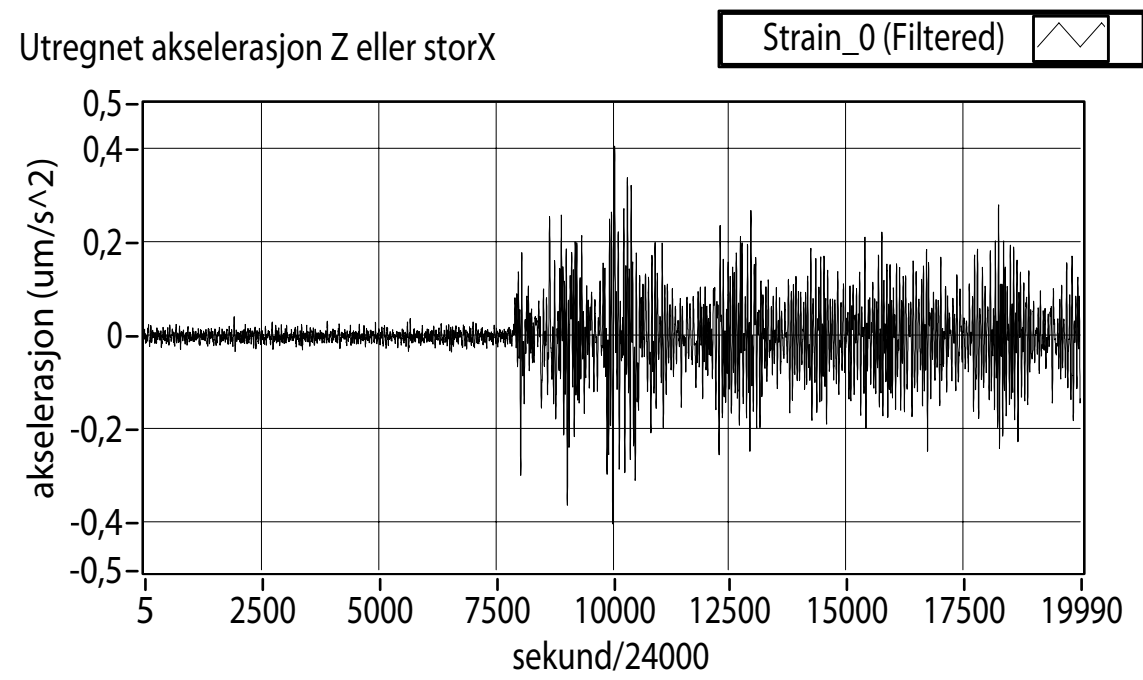
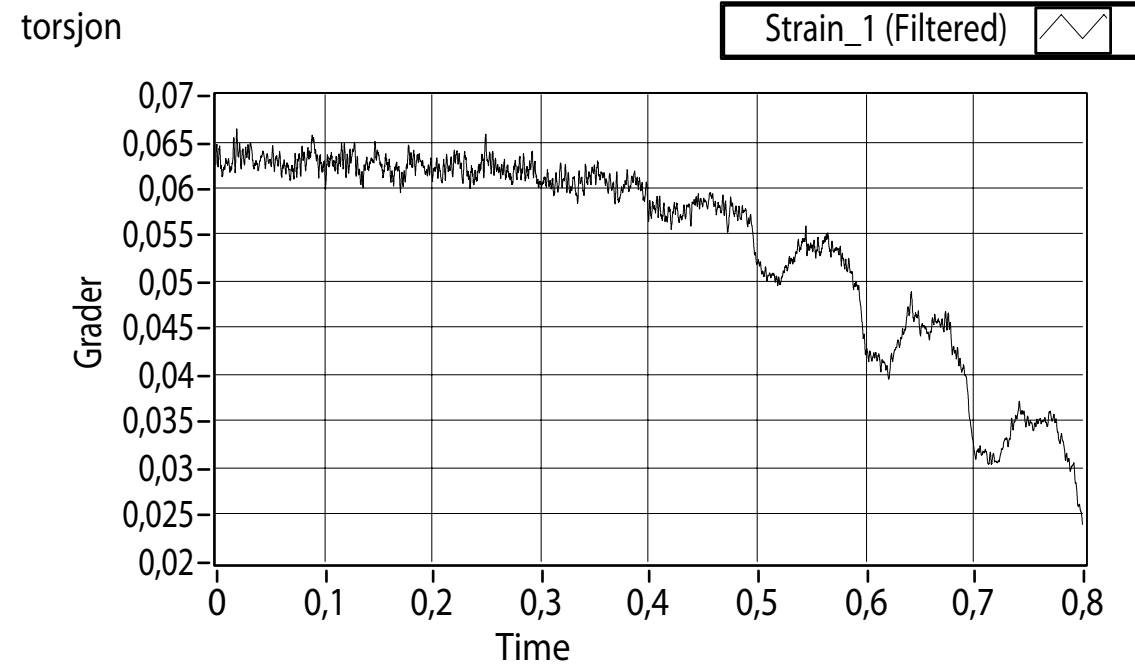
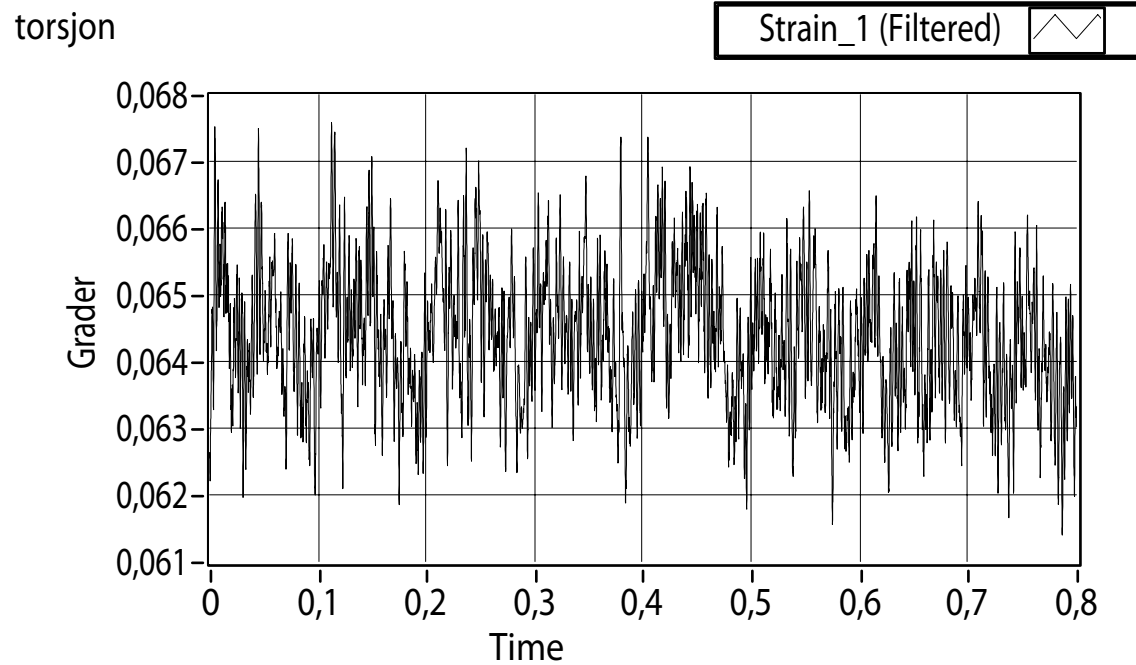
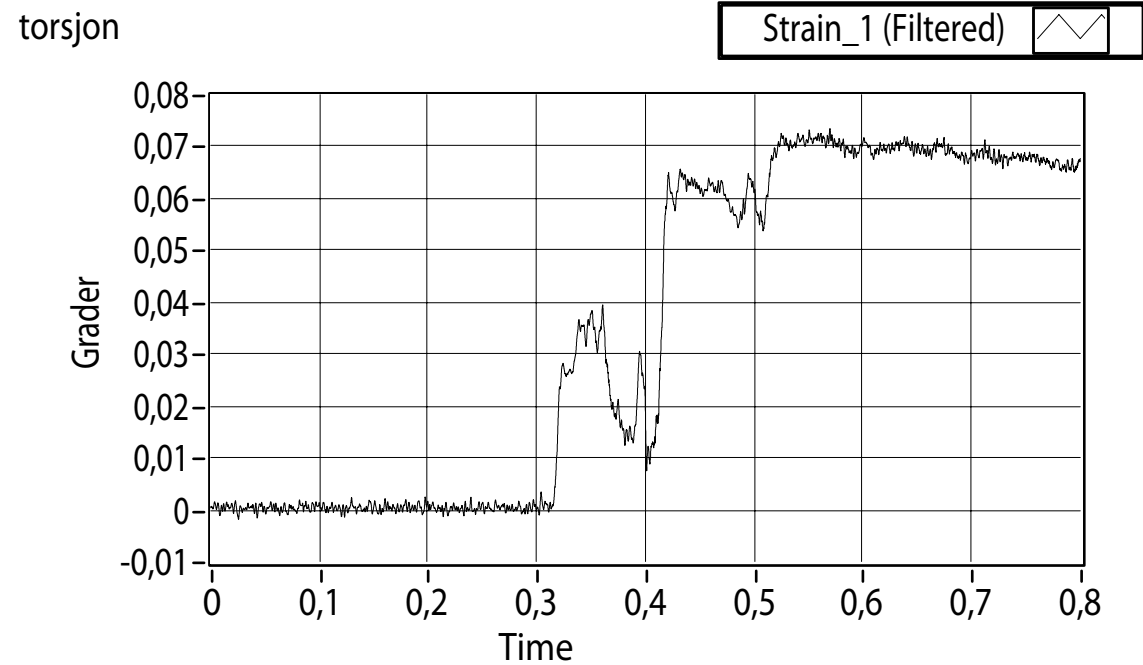
0,8mm skjær, 0,5mm kutt



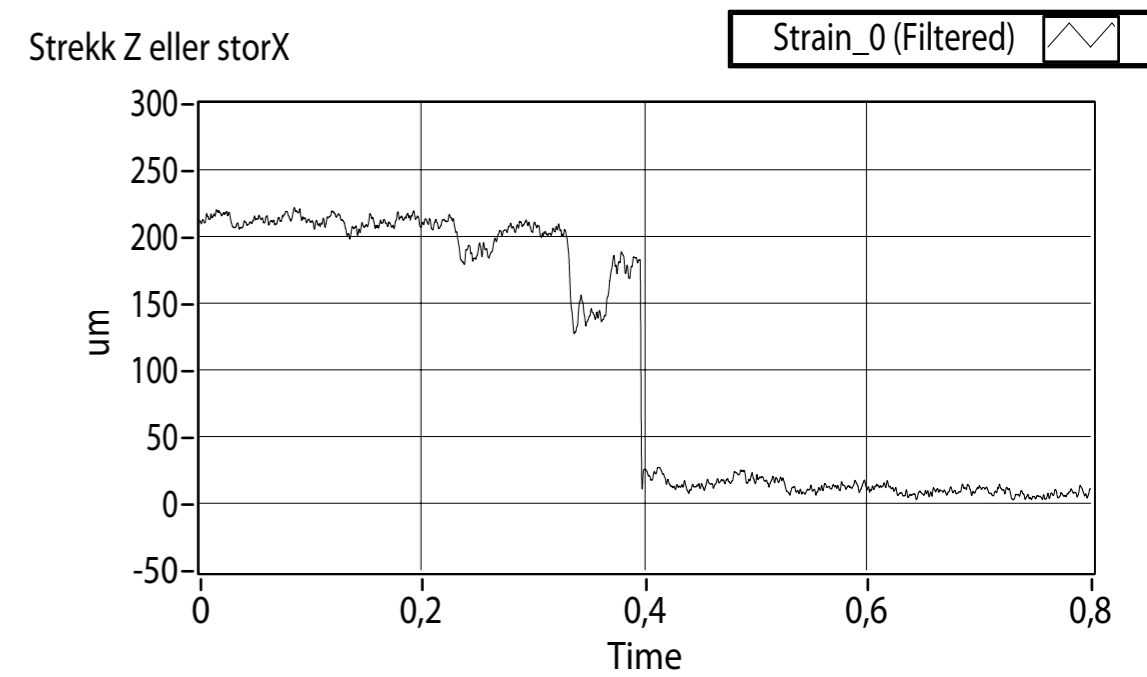
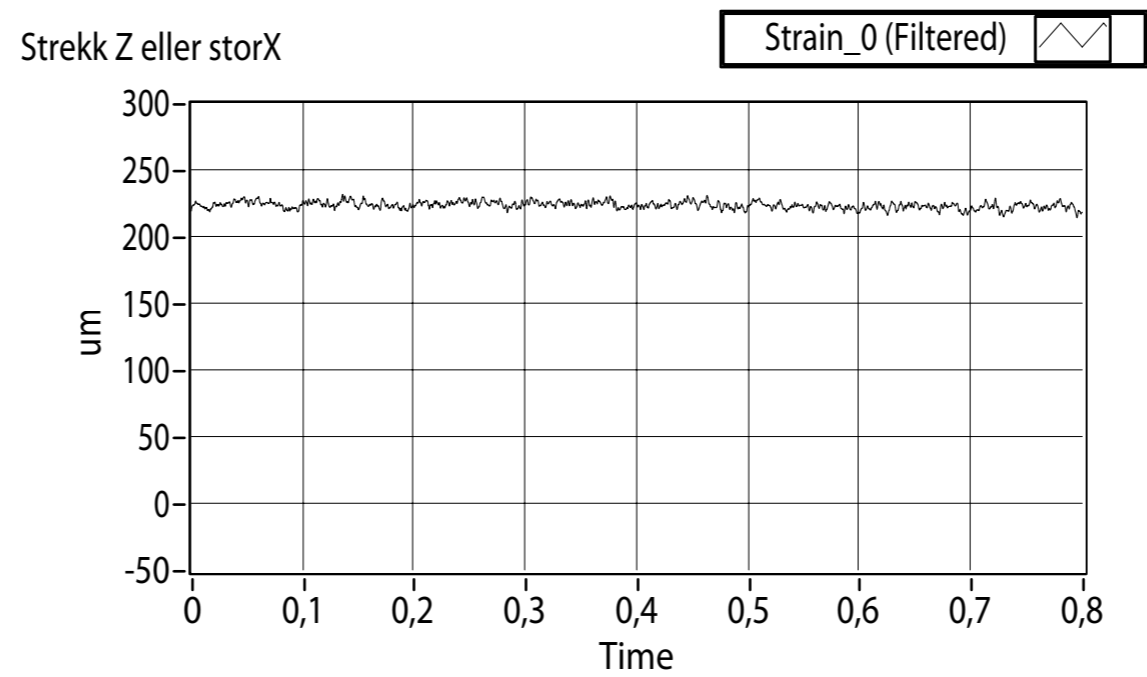
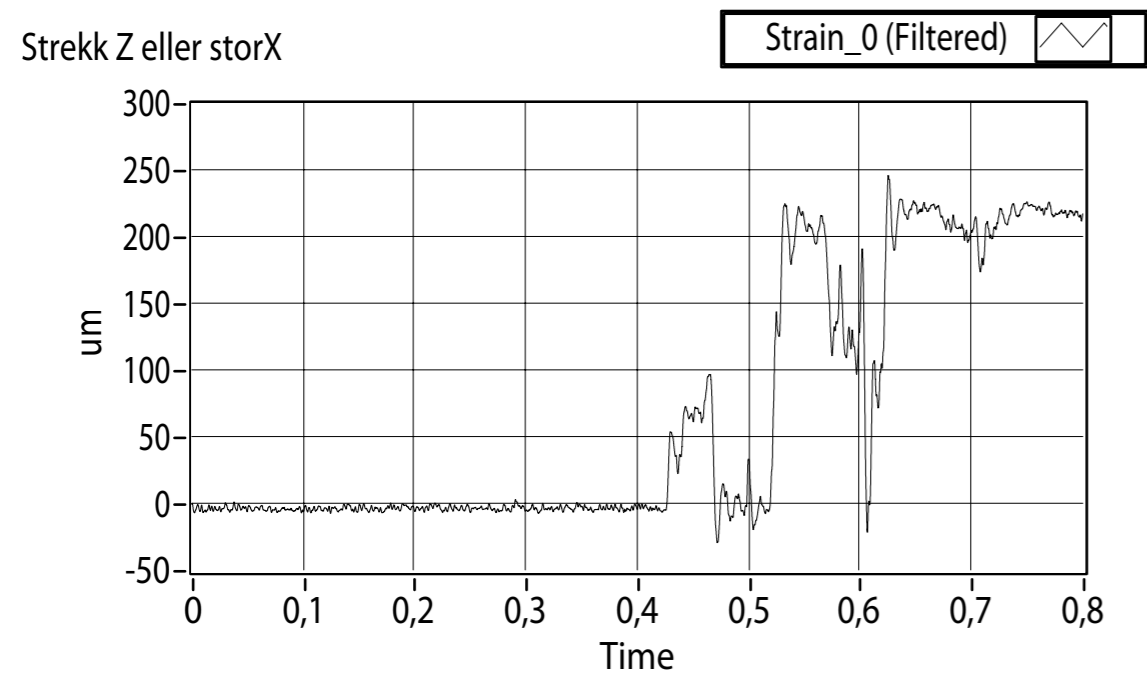
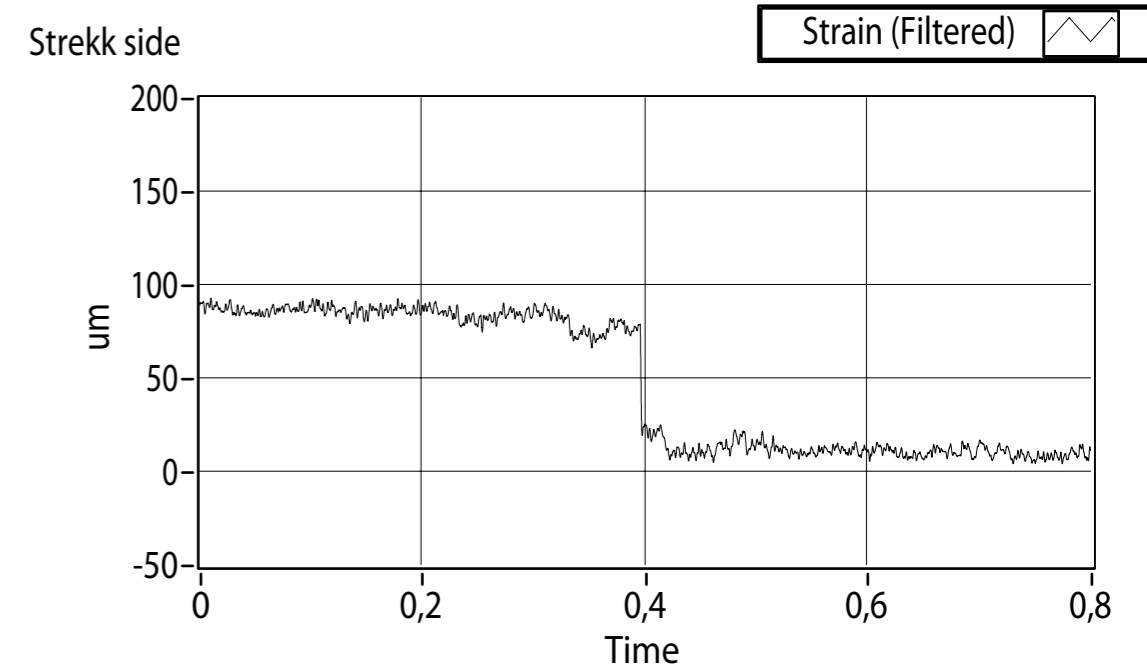
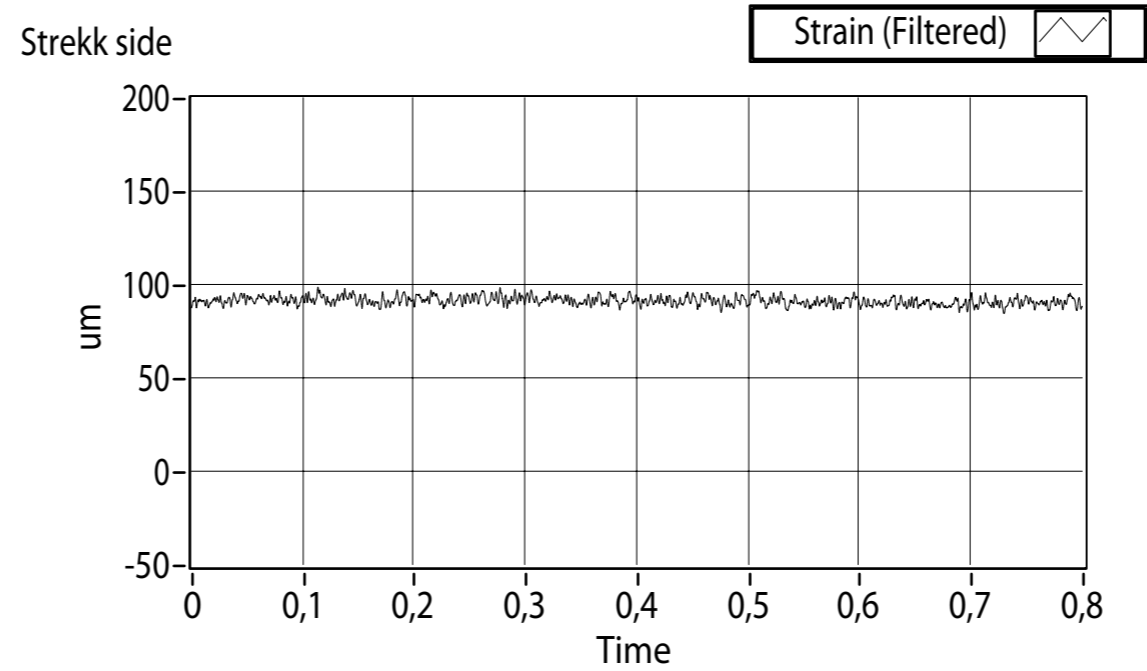
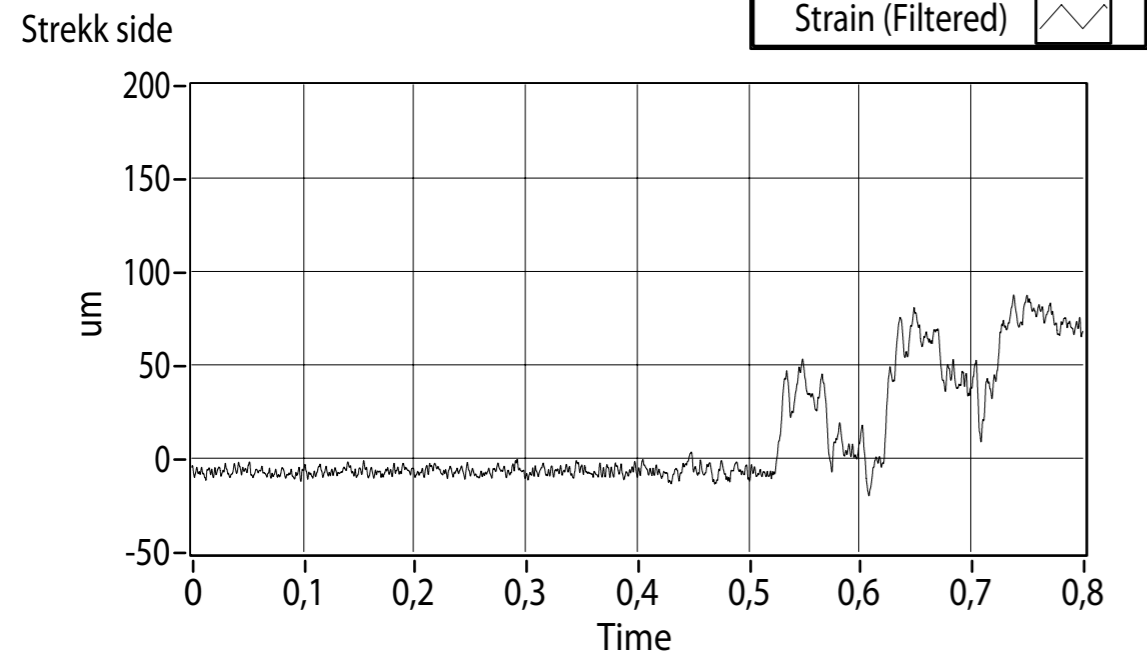
0,4mm skjær, 3mm kutt



0,4mm skjær, 3mm kutt

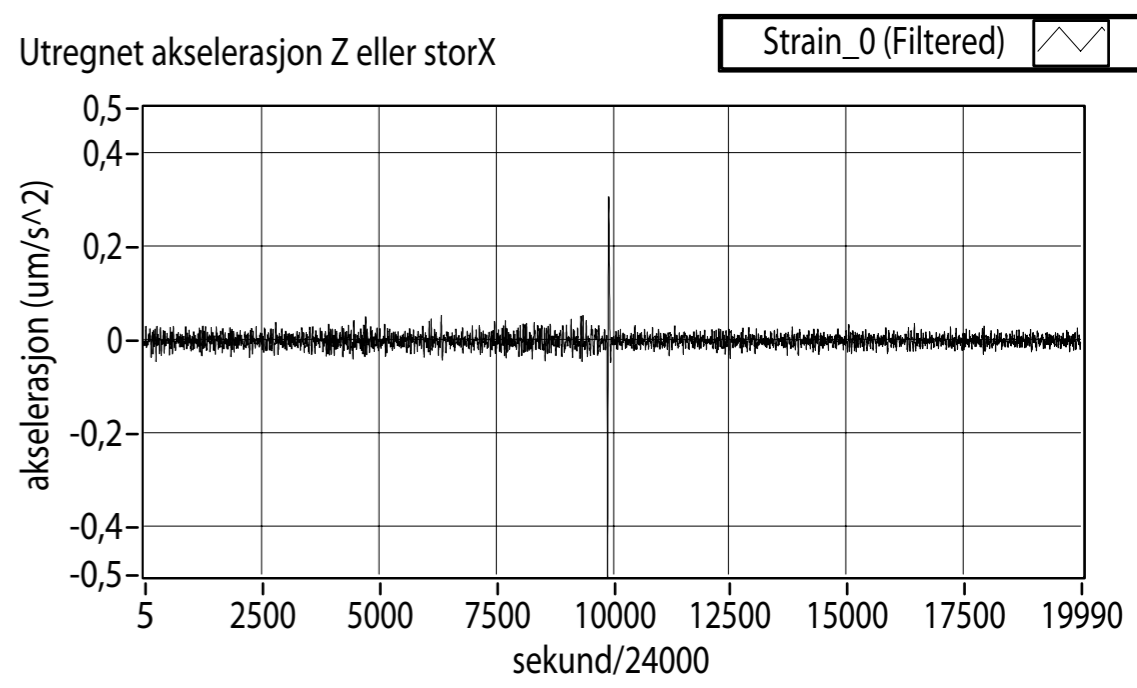
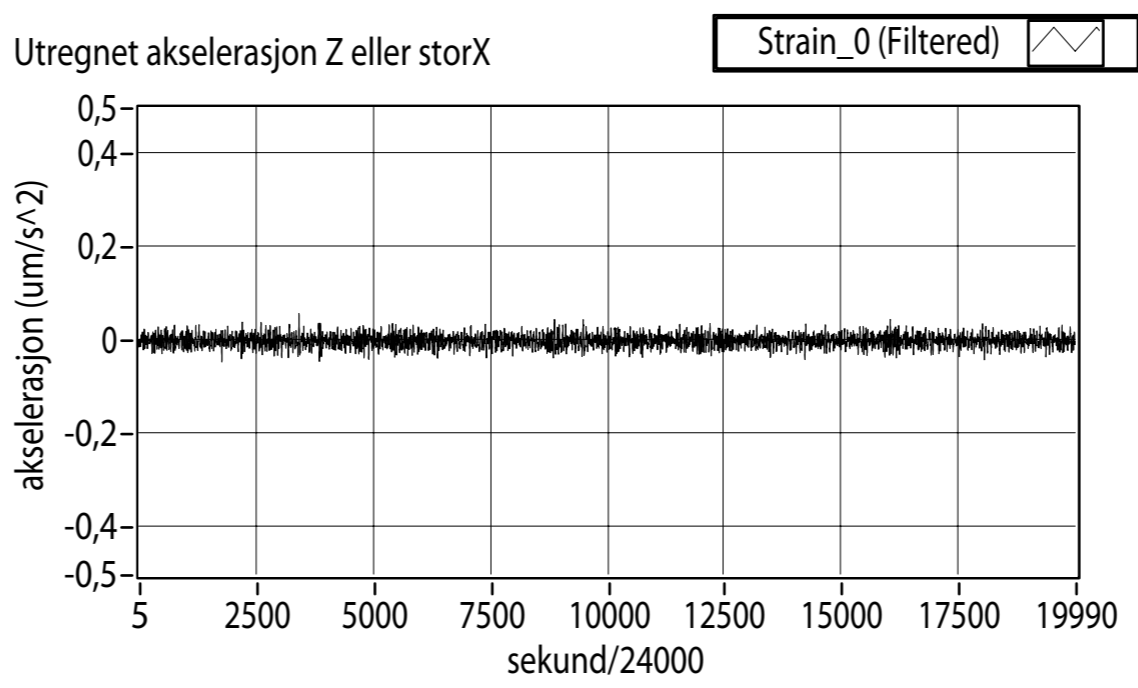
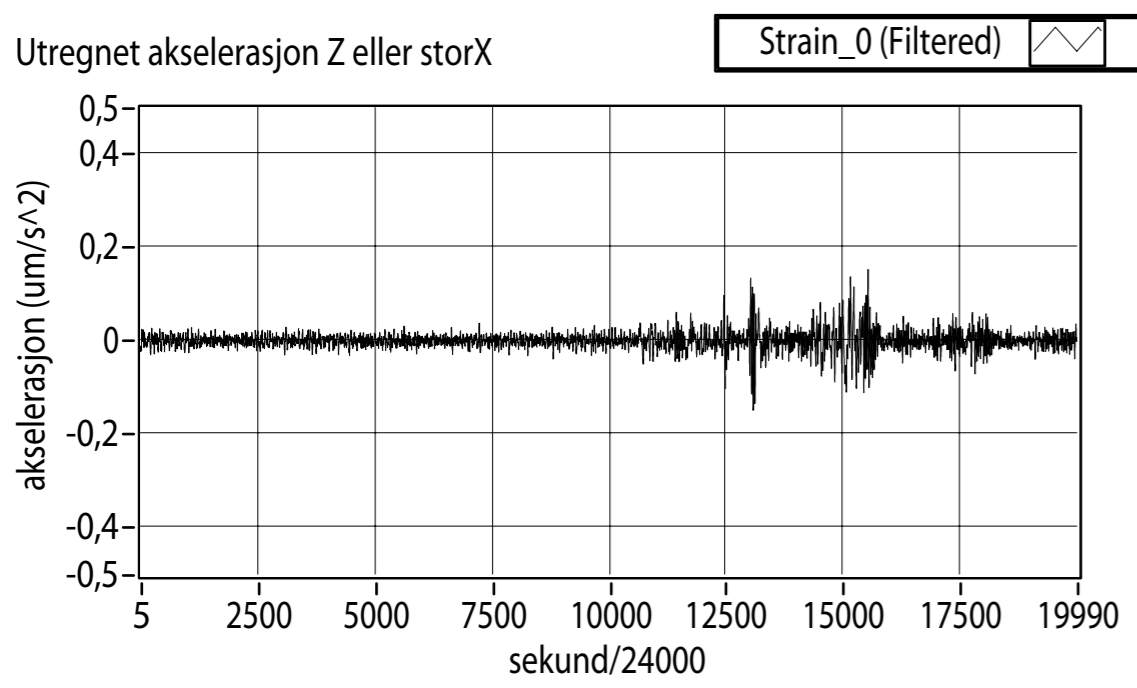
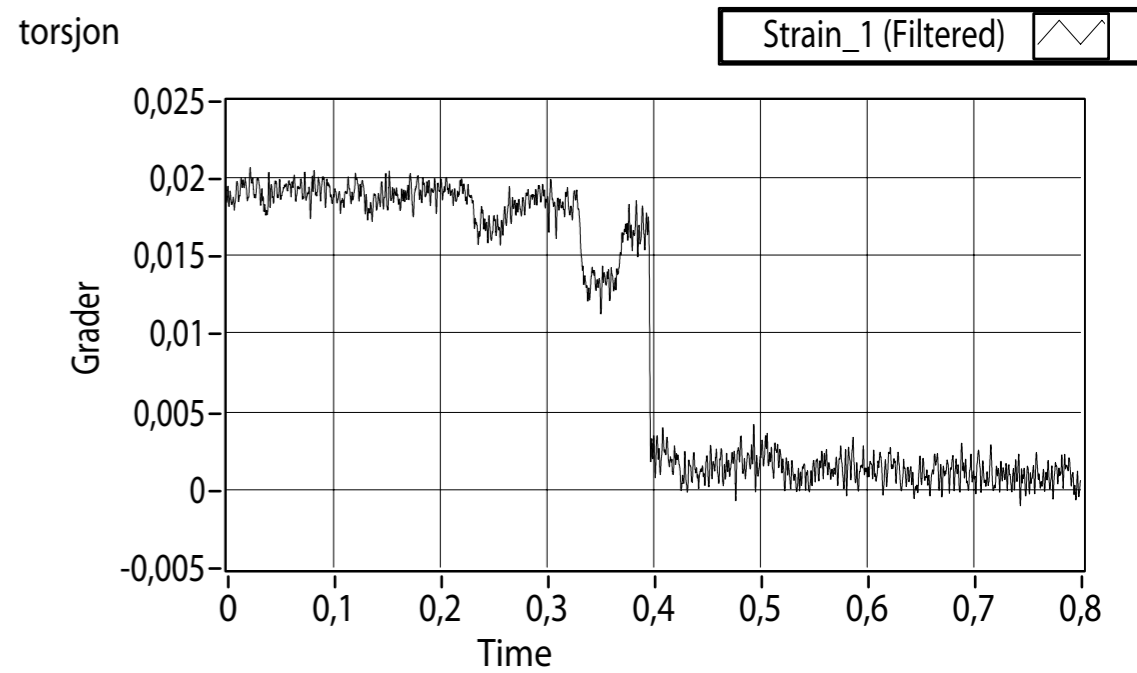
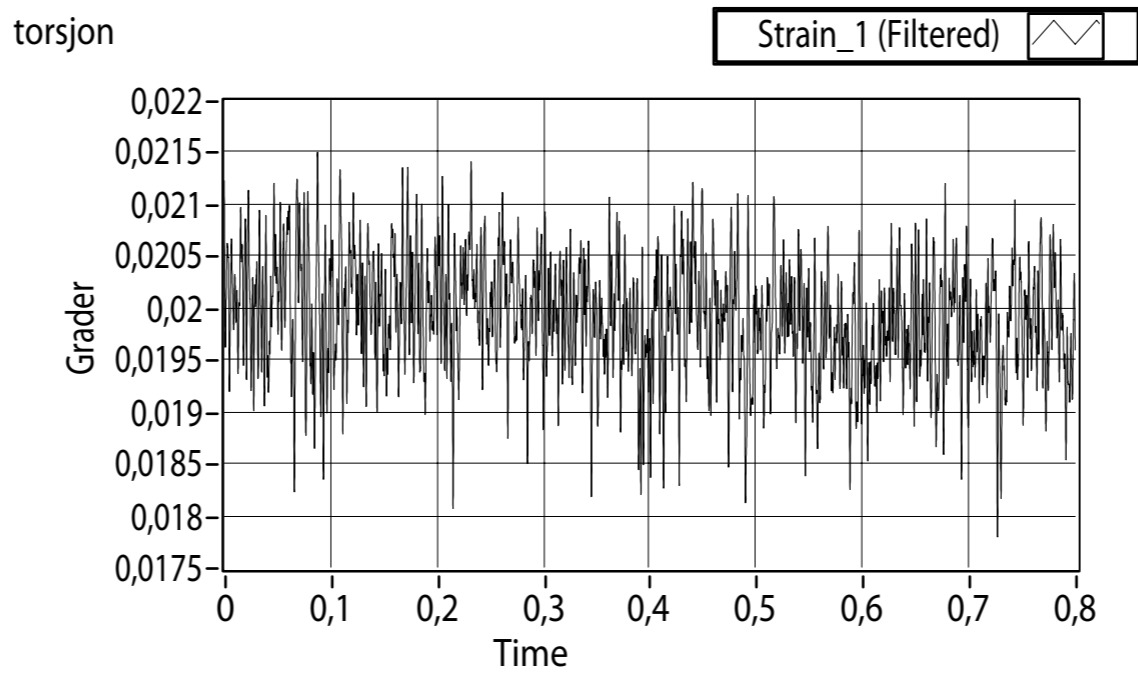
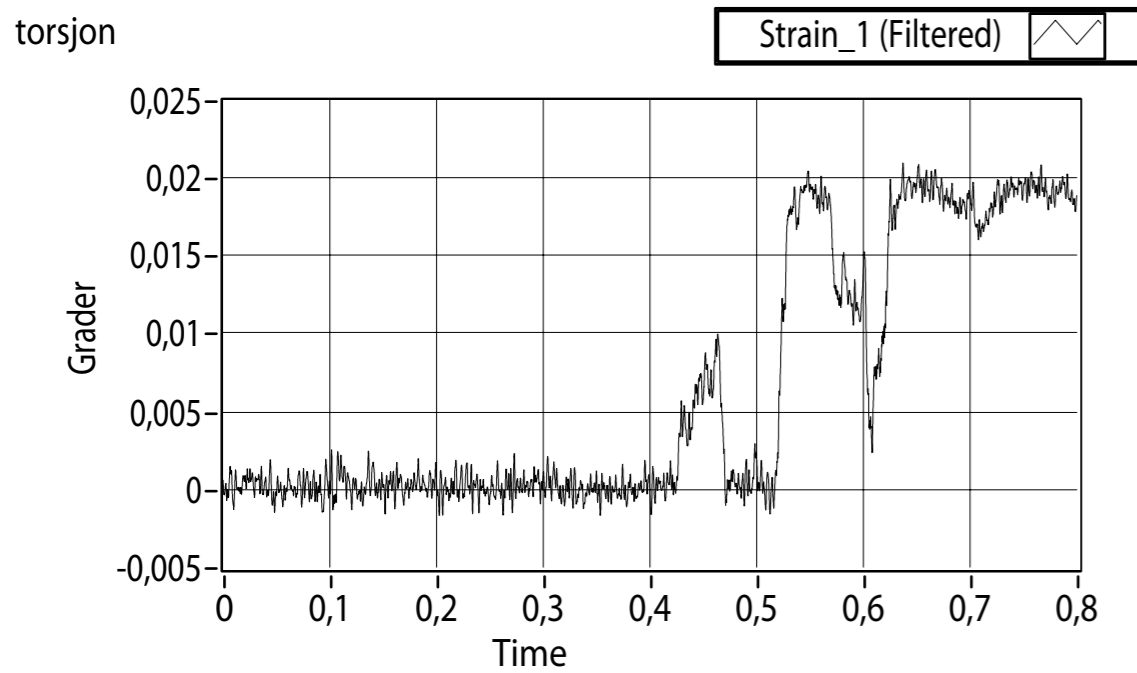


0,4mm skjær, 1mm kutt

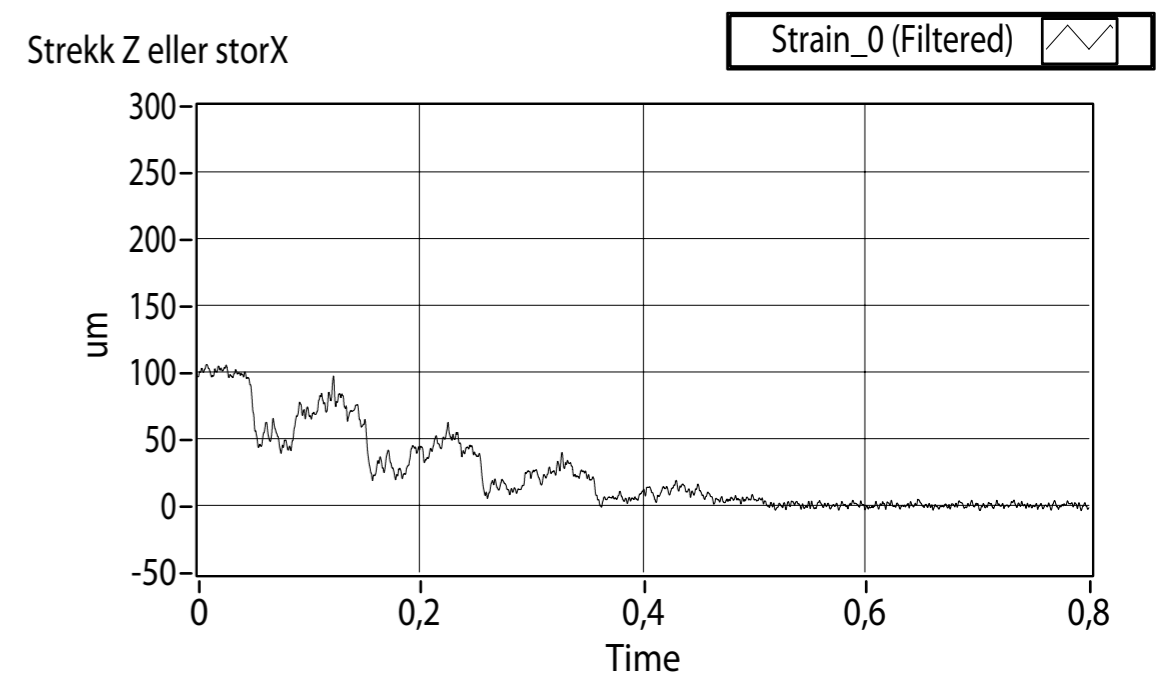
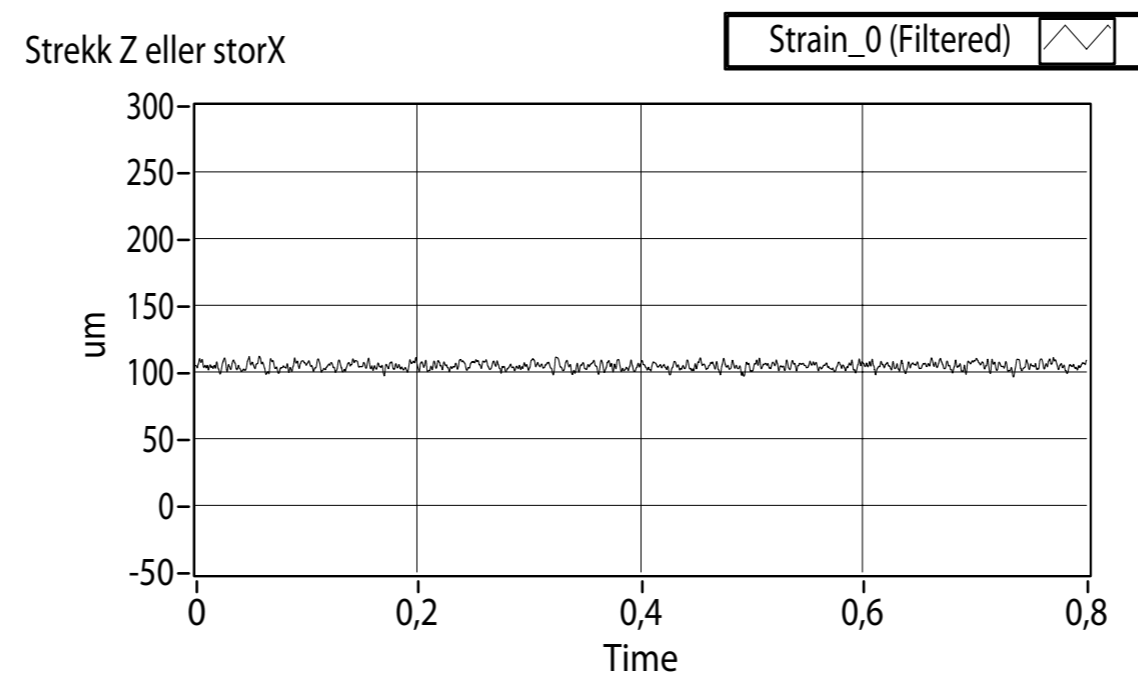
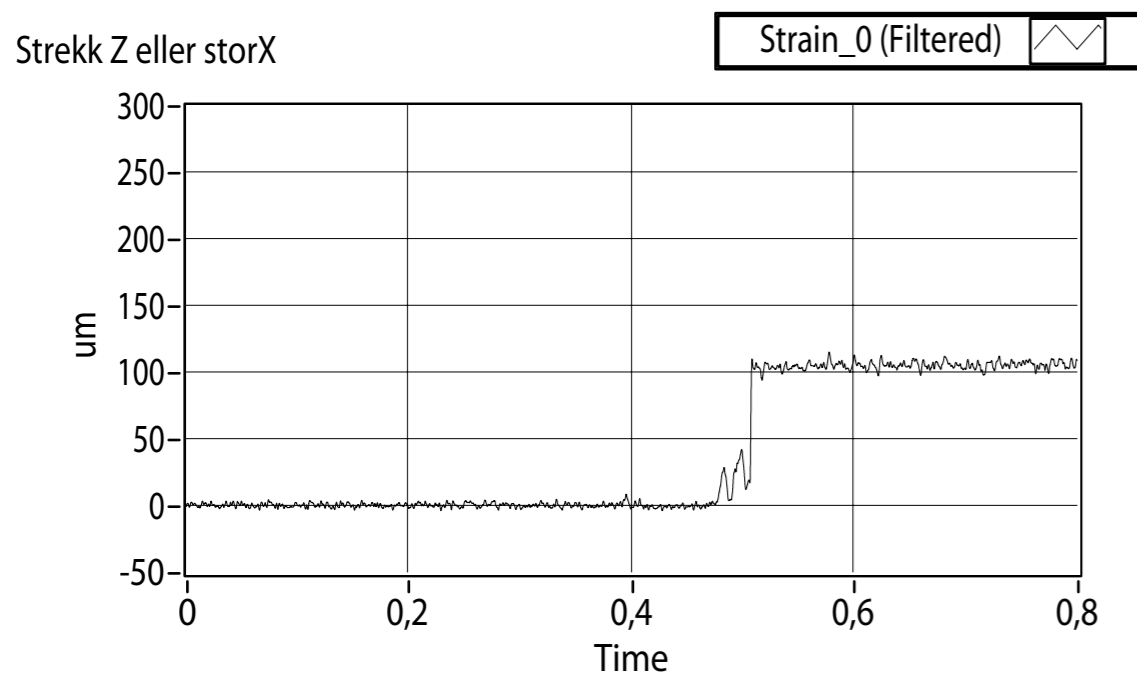
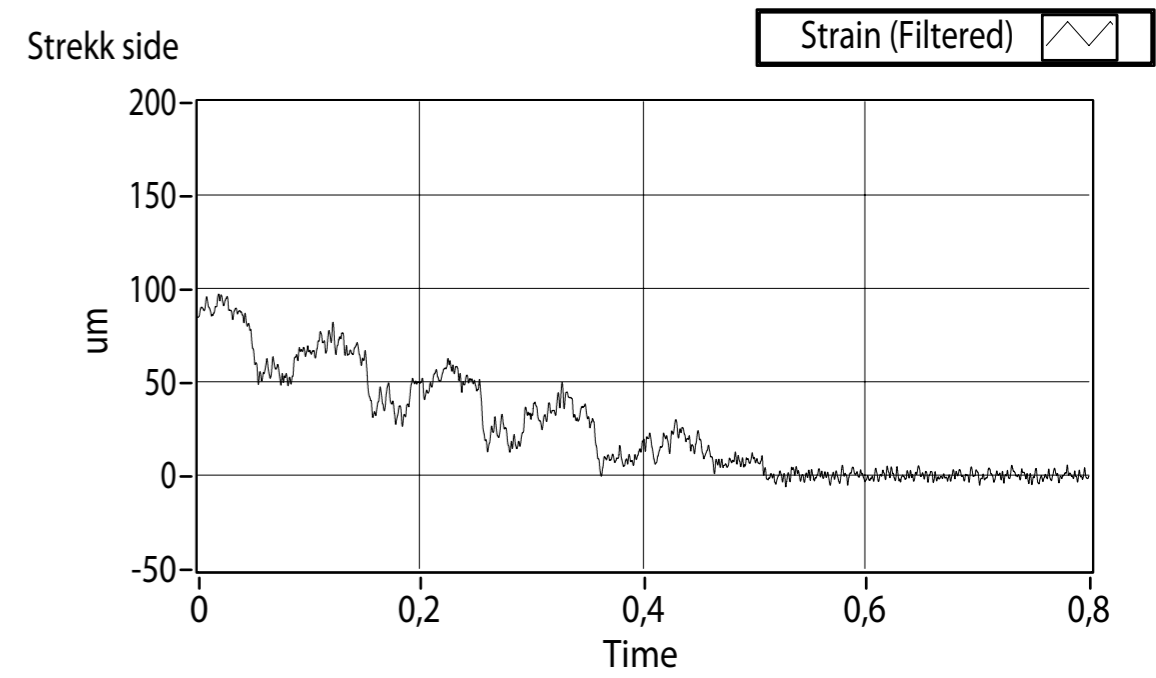
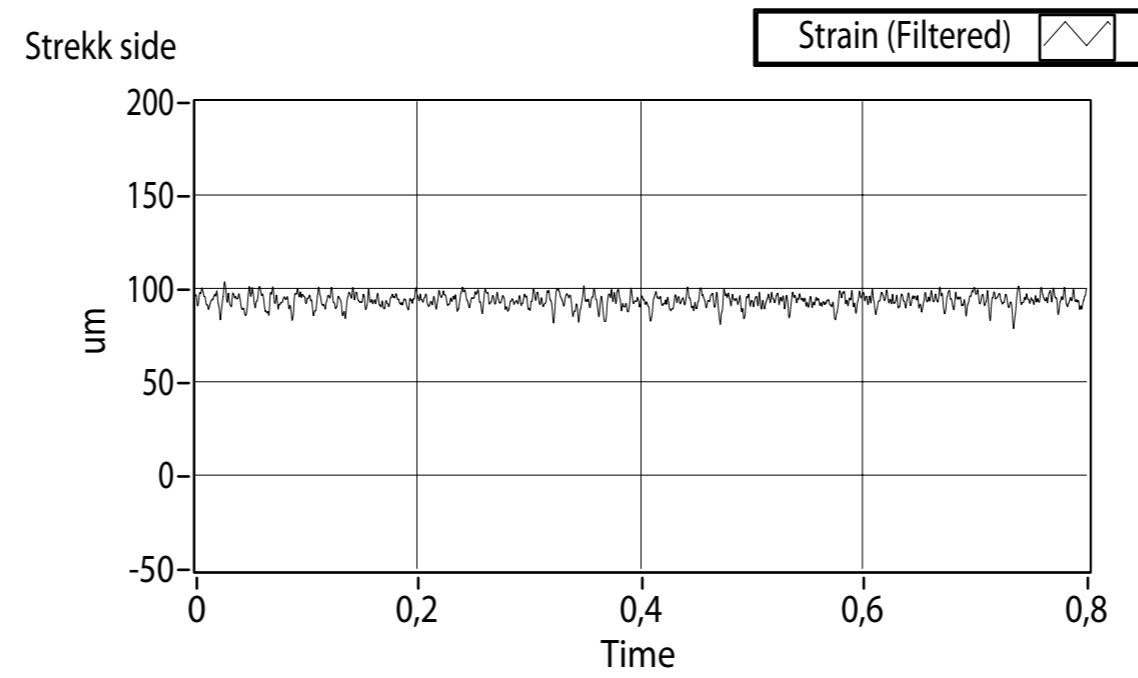
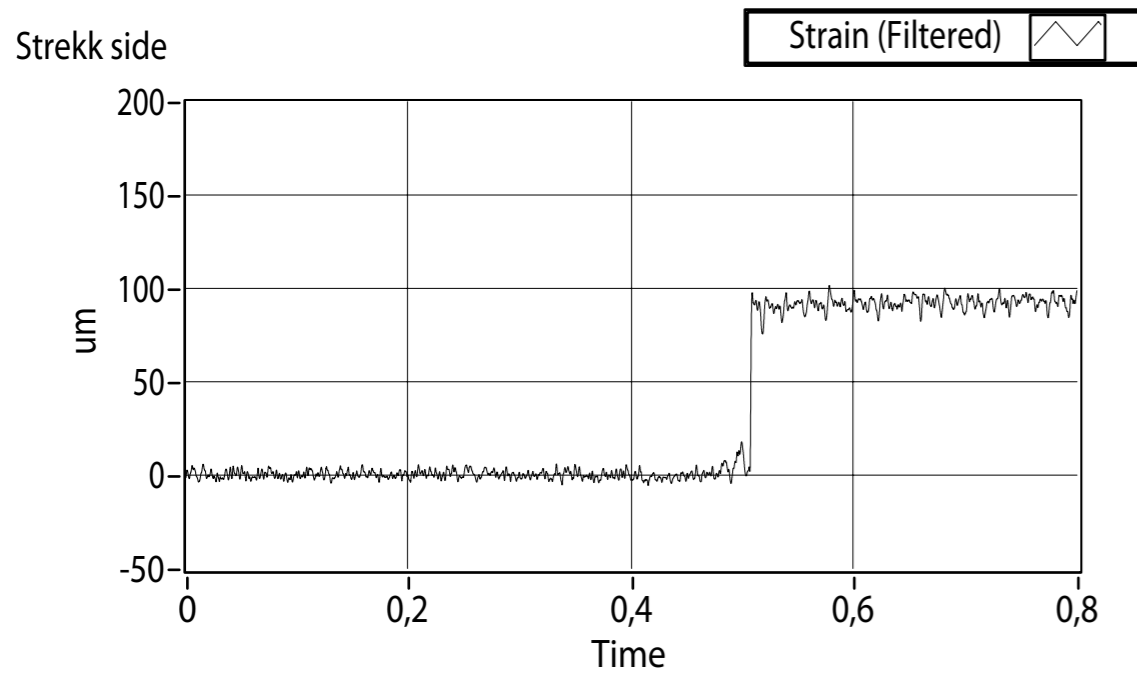




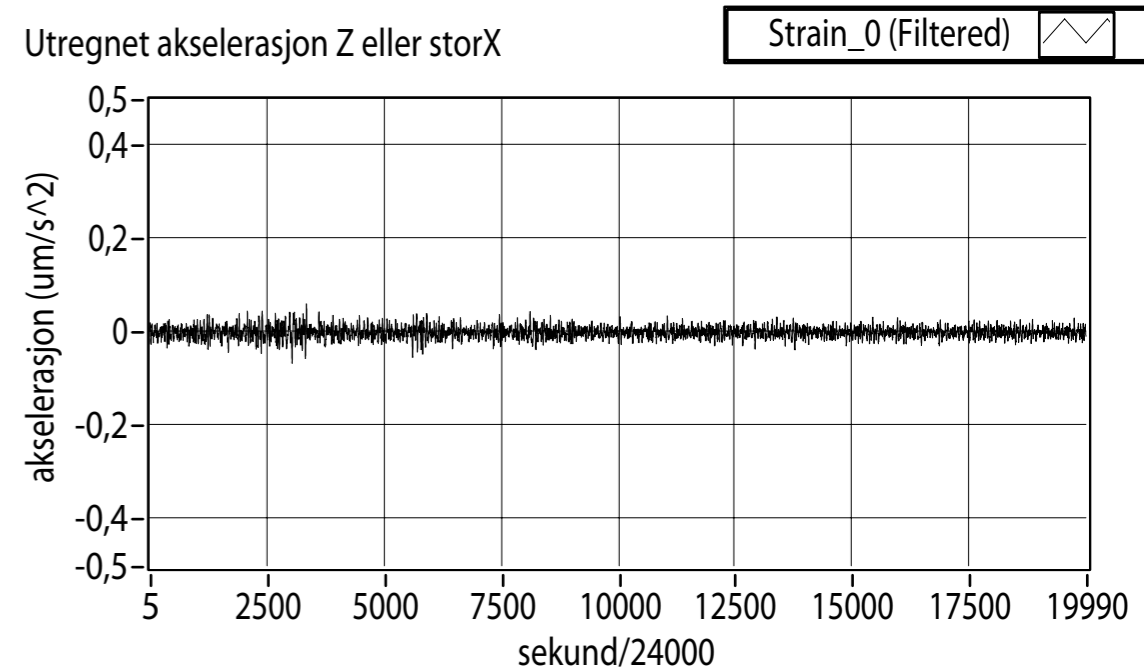
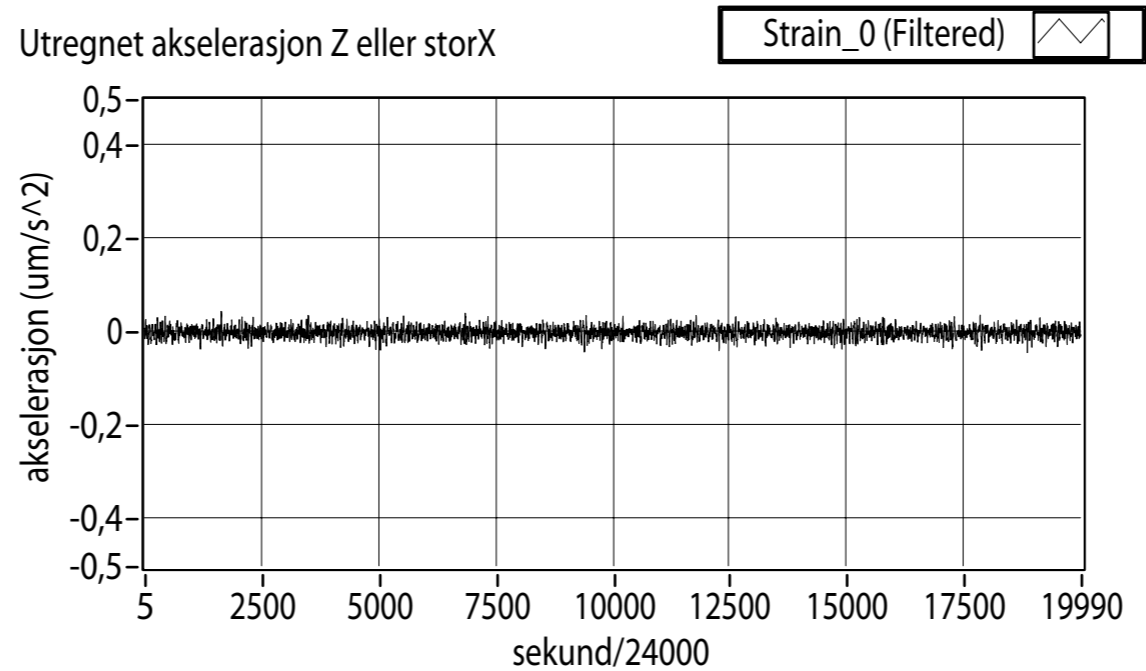
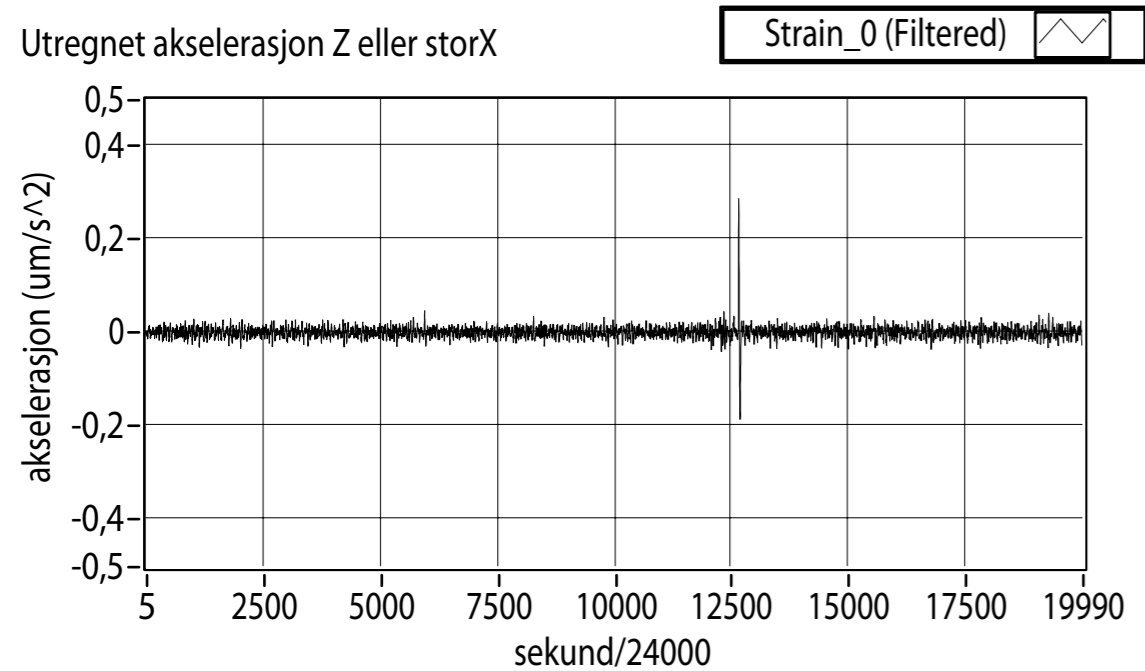
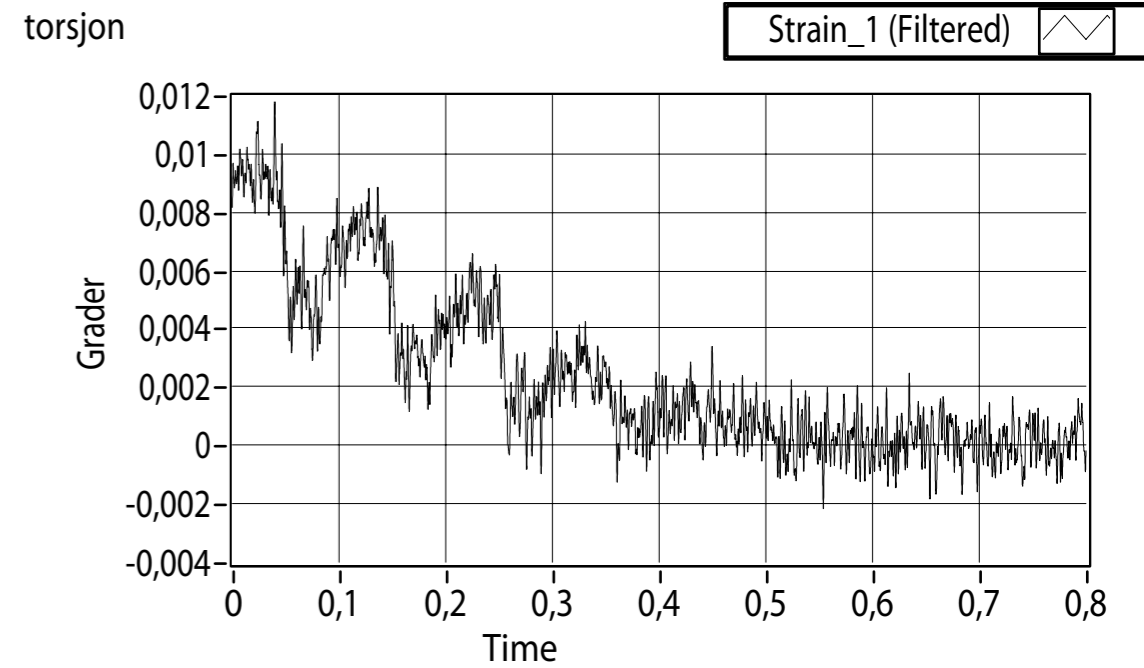
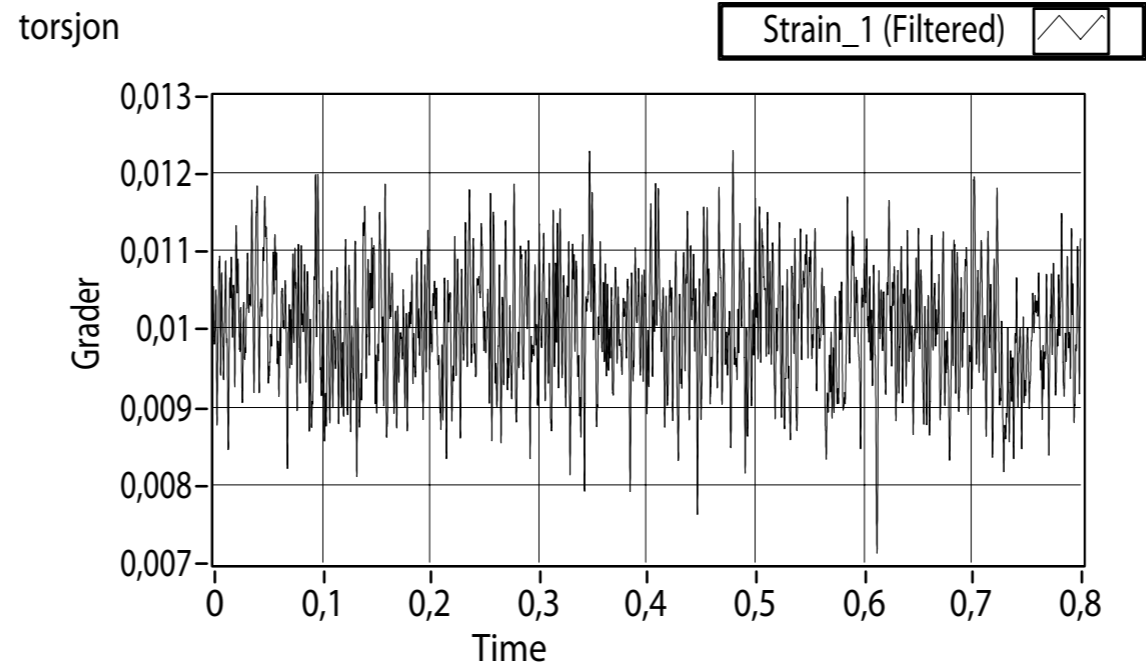
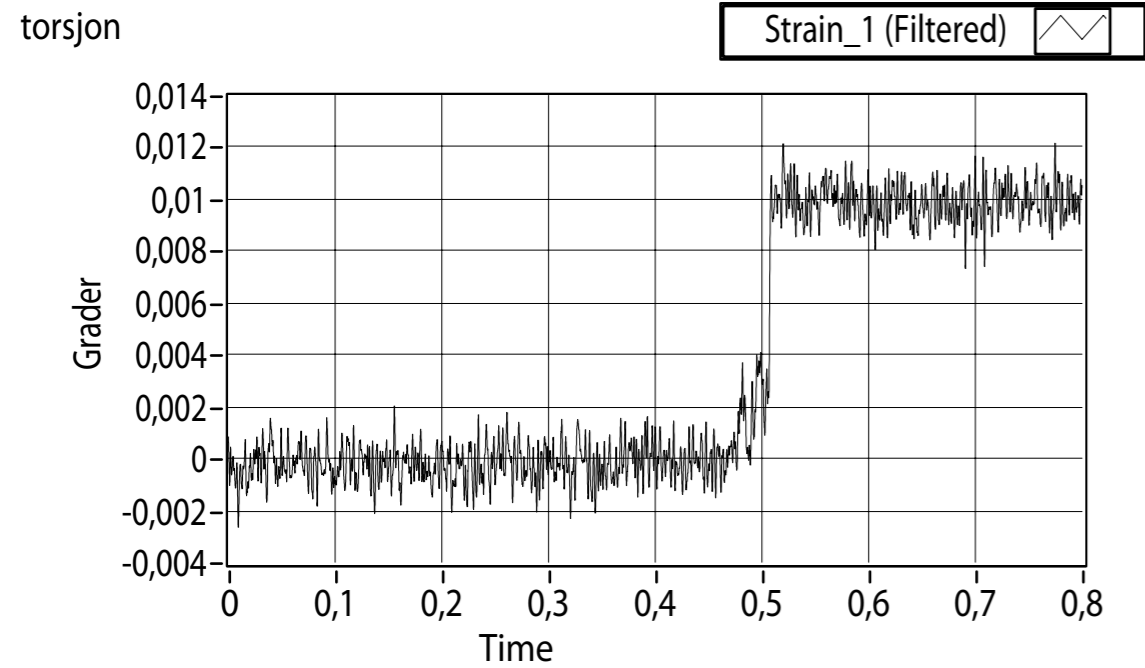
0,4mm skjær, 1mm kutt



0,4mm skjær, 0,5mm kutt



0,4mm skjær, 0,5mm kutt



# Vedlegg

1. Bilder fra testing
2. Grafer fra test i dreiebenk
3. **Python-program**
4. Arduino-program
5. C-program
6. LabView-program
7. Datablad for lim HBM z70
8. Forstudierapport

```
# Det trengs python med pyserial og pygame installert
import threading
import time
import serial
import sys
import pygame

class FeederThread(threading.Thread):
    running = True
    addPoint = None
    # Vil en bruke gjennomsnitt av flere målinger kan det gjøres her:
    average = 2

    # Leser inn sinalet
    def getReading(self):
        x = self.s.readline()
        print "x:",x
        y = int(x)
        if len(str(y))>3:
            #print "For lang"
            print 'omstart'
            self.s.close()
            return self.run()
            #return self.getReading()
        else:
            #o = y
            #print 'o:',o
            return y

#Hvis vi vil ha gjennomsnittresultat gjøres det her.
    def averageReadings(self, average):
        sum = 0.0
        for i in xrange(average):
            sum += self.getReading()
        return sum / average

zero = 100
slope = 10

    def readingToMM(self, o):
        return (o - self.zero)/self.slope

    def run(self):
        self.s = serial.Serial("/dev/ttyUSB0", 115200)
        self.s.readline()

        print "Måler nullpunkt..."
        self.zero = self.averageReadings(50)
        print "Nullpunkt = ", self.zero

        while self.running:
            o = self.averageReadings(self.average)
            o = self.readingToMM(o)

            if self.addPoint:
                self.addPoint(o)
```

```
class Plotter:
    bgcolor = (255,255,255)
    linecolor = (0,0,255)
    linewidth = 3
    textcolor = (0,0,0)
    textsize = 30

    def handleEvents(self):
        for event in pygame.event.get():
            if event.type is pygame.QUIT:
                self.feeder.running = False
                sys.exit()
            elif event.type is pygame.MOUSEBUTTONDOWN:
                self.clearHistory()

    def clearHistory(self):
        self.history = [0.0 for x in xrange(self.width)]

    def generatePoints(self):
        history = self.history
        return [(i, self.verticalTransform(history[i])) for i in xrange(len(history))]

    def addPoint(self, q):
        if self.history:
            self.history.pop(0)
            self.history.append(q)

    def __init__(self, feeder):
        self.size = self.width, self.height = 1280,960
        self.feeder = feeder
        self.clearHistory()
        self.feeder.addPoint = self.addPoint

    def calculateVerticalScale(self):
        self.top = max(max(self.history), 0)
        self.bot = min(min(self.history), 0)
        rg = (self.top-self.bot) * 1.2

        if rg > 0:
            self.vscale = self.height / rg
            self.vzero = int(self.height * ((self.top-0)/(self.top-self.bot) + 0.1)/1.2)
        else:
            self.vscale = 1
            self.vzero = self.height / 2

    def verticalTransform(self, q):
        return self.vzero - self.vscale * q

# Hovedkode for plotting av graf
def main(self):
    # Pygame display
```

```
pygame.init()
pygame.font.init()
screen = pygame.display.set_mode(self.size)

# mater
self.feeder.start()

# Her har jeg et bakgrunnsbilde som er helt hvitt
background = pygame.image.load("background.jpg").convert_alpha()

font = pygame.font.SysFont("Verdana", self.textsize)

k = 0
while True:
    # akser
    self.calculateVerticalScale()

# Tegne graf:
    # bakgrunn
    screen.blit(background, (0,0))
    # data punkter
    pygame.draw.lines(screen, self.linecolor, False, self.generatePoints(), self.
linewidth)
    # text
    content = "Raadata: %.2f" % self.history[-1]
    text = font.render(content, True, self.textcolor)
    textsize0 = font.size(content)
    screen.blit(text, ((self.width - textsize0[0])/2,10))

    content = "Toppavlesning: %.2f" % max(self.history)
    text = font.render(content, True, self.textcolor)
    textsize1 = font.size(content)
    screen.blit(text, ((self.width - textsize1[0])/2,10 + textsize0[1] + 10))

    content = "Nedboying"
    text = font.render(content, True, self.textcolor)
    textsize2 = font.size(content)
    screen.blit(text, ((self.width - textsize2[0])/2,self.height-textsize2[1]-10))

    # done å tegne... doublebuffer!
    pygame.display.flip()

    self.handleEvents()

# Hovedløkken i programmet

if __name__ == "__main__":
    feeder = FeederThread()
    if len(sys.argv)>1:
        feeder.average = int(sys.argv[1])
    plotter = Plotter(feeder)
    plotter.main()
```

# Vedlegg

1. Bilder fra testing
2. Grafer fra test i dreiebenk
3. Python-program
4. **Arduino-program**
5. C-program
6. LabView-program
7. Datablad for lim HBM z70
8. Forstudierapport



```

#define      utpin1      6;// analog utput pin 6
#define      utpin2      5;// analog utput pin 5
#define      sensorPin   0;// in fra forsterker analog pin 0
int verdi0;
int verdi1;
int finalx;

void setup(){
  // strater seriell kommunikasjon:
  Serial.begin(115200);

  // Setter utsignalene:
  pinMode(utpin1, OUTPUT);
  pinMode(utpin2, OUTPUT);
  digitalWrite(utpin1, LOW);
  digitalWrite(utpin2, LOW);
}

void loop()
{
  //Setter polaritet
  digitalWrite(utpin1, LOW);
  digitalWrite(utpin2, HIGH);
  delayMicroseconds(60);
  //leser inn verdi 1
  verdi0 =analogRead(sensorPin);

  //Skifter polaritet
  digitalWrite(utpin1, HIGH);
  digitalWrite(utpin2, LOW);
  delayMicroseconds(60);
  //leser inn verdi 2
  verdi1 =analogRead(sensorPin);
  delayMicroseconds(60);

  //Lager sluttverdi
  finalx = ((verdi0 - verdi1)/2)

  //Sender sluttverdi
  Serial.println(finalx);
}

```

# Vedlegg

1. Bilder fra testing
2. Grafer fra test i dreiebenk
3. Python-program
4. Arduino-program
5. **C-program**
6. LabView-program
7. Datablad for lim HBM z70
8. Forstudierapport

```
// Strekk.c
// Program til ATmega168 for bruk av strekkklapp-målinger
// Vegard Brøtan - vegardbr@stud.ntnu.no

//definerer klokkefrekvens
#define F_CPU 14745600

//avr-filer
#include <stdio.h>
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <avr/pgmspace.h>
#include <inttypes.h>

#include "../filer/delay.h"
#include "../filer/uart.h"

// PIN Definisjoner:
// PC0 -- analog inn
//
// PD4 - bridge excite
// PD3 - bridge excite

void adc_init() {
    // set analog til digital konverterer
    // for ekstern referanse (5v), ADC0
    ADMUX = 0;

    // Frekvensen til ADCen deles på 128 som gjør at vi her får en klokkeferkvens på
    115.2kHz.
    ADCSRA = (1<<ADEN) | (1<<ADPS2) | (1<<ADPS1) | (1<<ADPS0);

    // oppvarmingsbit
    ADCSRA |= (1<<ADSC);
}

uint16_t adc_read() {
    // nullstiller ADC
    ADCSRA |= (1<<ADSC);

    // Les fra ADC.. Vent på konvertering
    while(ADCSRA & (1<<ADSC)) {
        // Vent
    }
    // Bit borte

    // Les fra ADCL/ADCH registrene, og kombiner resultatet
    // ADCL må leses først
    uint16_t result = ADCL;
    uint16_t temp = ADCH;
    result = result + (temp<<8);

    return result;
}

int main() {
    // setter PD3, PD4 som utsignal
```

```
DDRD |= (1<<PD3) | (1<<PD4);

adc_init();

// init serial port
uart_init();
FILE uart_stream = FDEV_SETUP_STREAM(uart_putchar, uart_getchar, _FDEV_SETUP_RW);
stdin = stdout = &uart_stream;

int16_t reading1, reading2, finalx;

while(1) {
    // setter polaritet +-
    PORTD |= (1<<PD3);
    PORTD &= ~(1<<PD4);
    // vent sju tidskonstanter. en tidskonstant = 1/115,2kHz = 8.68us
    delay_us(60);
    // les
    //avlesning = adc_read();
    // printf_P(PSTR("a%d "), adc_read());
    reading1 = adc_read();

    // setter polaritet -+
    PORTD |= (1<<PD4);
    PORTD &= ~(1<<PD3);
    // vent sju tidskonstanter. en tidskonstant = 1/115,2kHz = 8.68us
    delay_us(60);
    //leser nytt signal
    reading2 = adc_read();
    //Se ligning 6.1 i oppgaven:
    finalx = ((reading1 - reading2)/2);
    // send over seriell port
    printf_P(PSTR("%d\n"),finalx);
    delay_ms(5);
}

return 0;
}
```

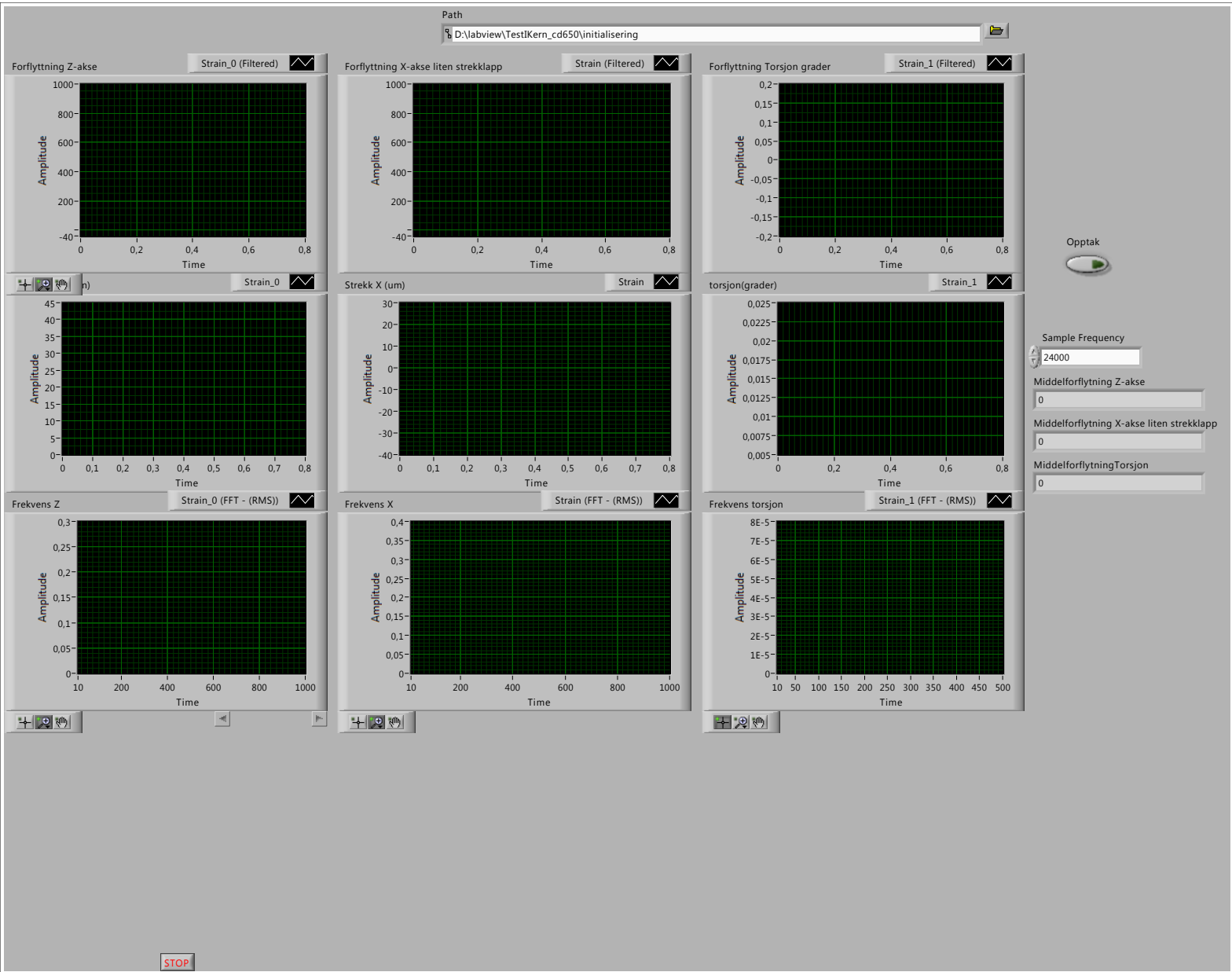
# Vedlegg

1. Bilder fra testing
2. Grafer fra test i dreiebenk
3. Python-program
4. Arduino-program
5. C-program
6. **LabView-program**
7. Datablad for lim HBM z70
8. Forstudierapport

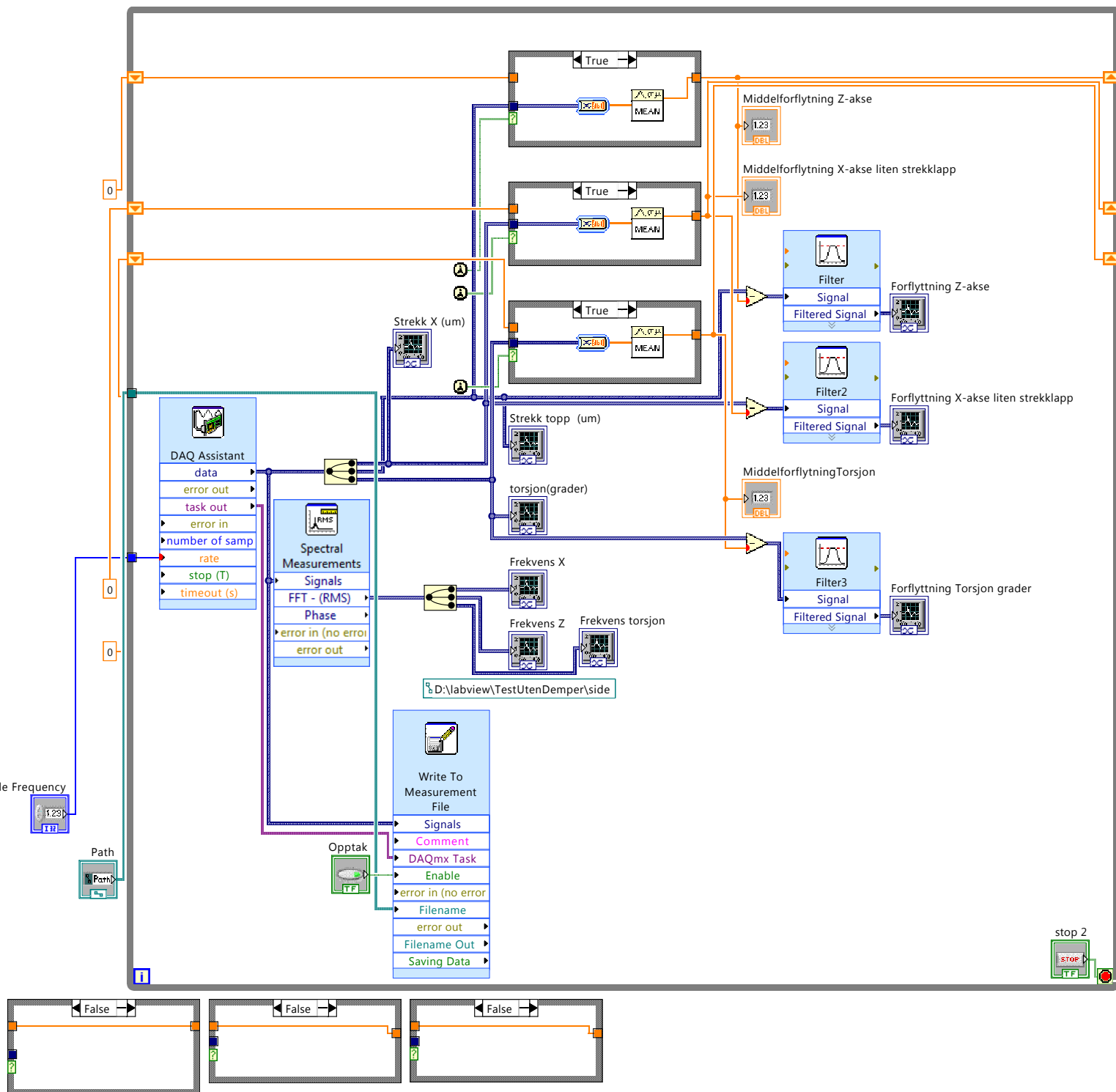
# measure\_finished - Brukt.vi



## Front Panel



# Block Diagram



## Express VI Configuration Information



### Convert from Dynamic Data2

Convert from Dynamic Data

Converts the dynamic data type to numeric, Boolean, waveform, and array data types for use with other VIs and functions.



### Convert from Dynamic Data

Convert from Dynamic Data

Converts the dynamic data type to numeric, Boolean, waveform, and array data types for use with other VIs and functions.



### Convert from Dynamic Data3

Convert from Dynamic Data

Converts the dynamic data type to numeric, Boolean, waveform, and array data types for use with other VIs and functions.



### DAQ Assistant

DAQ Assistant

Creates, edits, and runs tasks using NI-DAQmx. Refer to the NI-DAQmx Readme for a complete listing of devices NI-DAQmx supports.

When you place this Express VI on the block diagram, the DAQ Assistant launches to create a new task. After you create a task, you can double-click the DAQ Assistant Express VI to edit that task. For continuous measurement or generation, place a while loop around the DAQ Assistant Express VI.

For continuous single-point input or output, the DAQ Assistant Express VI might not provide optimal performance. Refer to the Cont Acq&Graph Voltage-Single Point Optimization VI in examples\DAQmx\Analog In\Measure Voltage.llb for an example of techniques to create higher-performance, single-point I/O applications.



### Filter3

Filter

Processes signals through filters and windows.

-----

This Express VI is configured as follows:

Filter Type: Lowpass

Cut-Off: 200

IIR/FIR: Infinite Impulse Response (IIR) Filter

Topology: Butterworth

Order: 3



### Filter

Filter

Processes signals through filters and windows.

-----

This Express VI is configured as follows:

Filter Type: Lowpass

Cut-Off: 200

IIR/FIR: Infinite Impulse Response (IIR) Filter

Topology: Butterworth

Order: 3



### Filter2

Filter

Processes signals through filters and windows.

-----

This Express VI is configured as follows:

Filter Type: Lowpass

Cut-Off: 200

IIR/FIR: Infinite Impulse Response (IIR) Filter

Topology: Butterworth

Order: 3





### **Write To Measurement File**

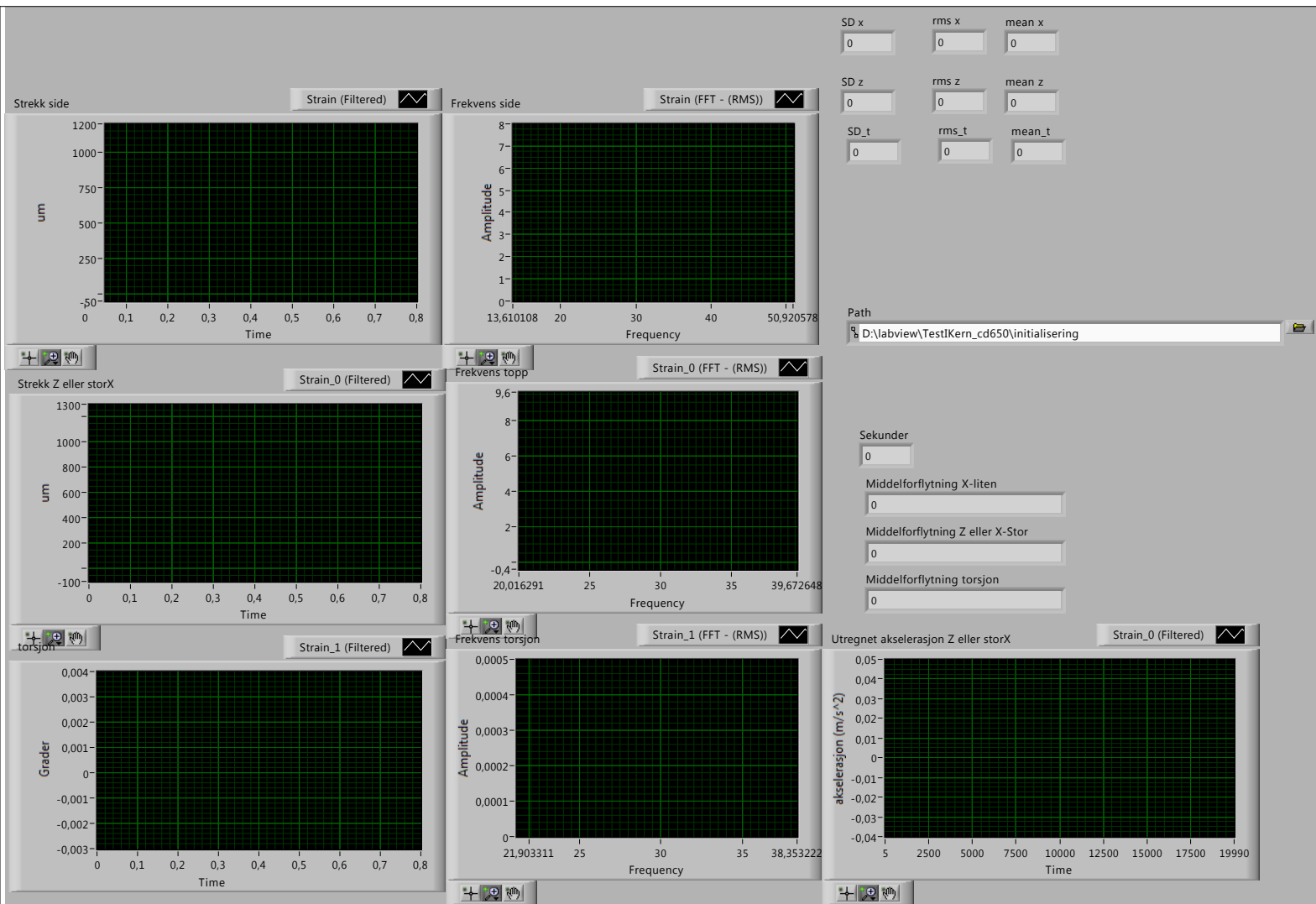
Write To Measurement File

Writes data to text-based measurement files (.lvm) or binary measurement files (.tdm or .tdms).

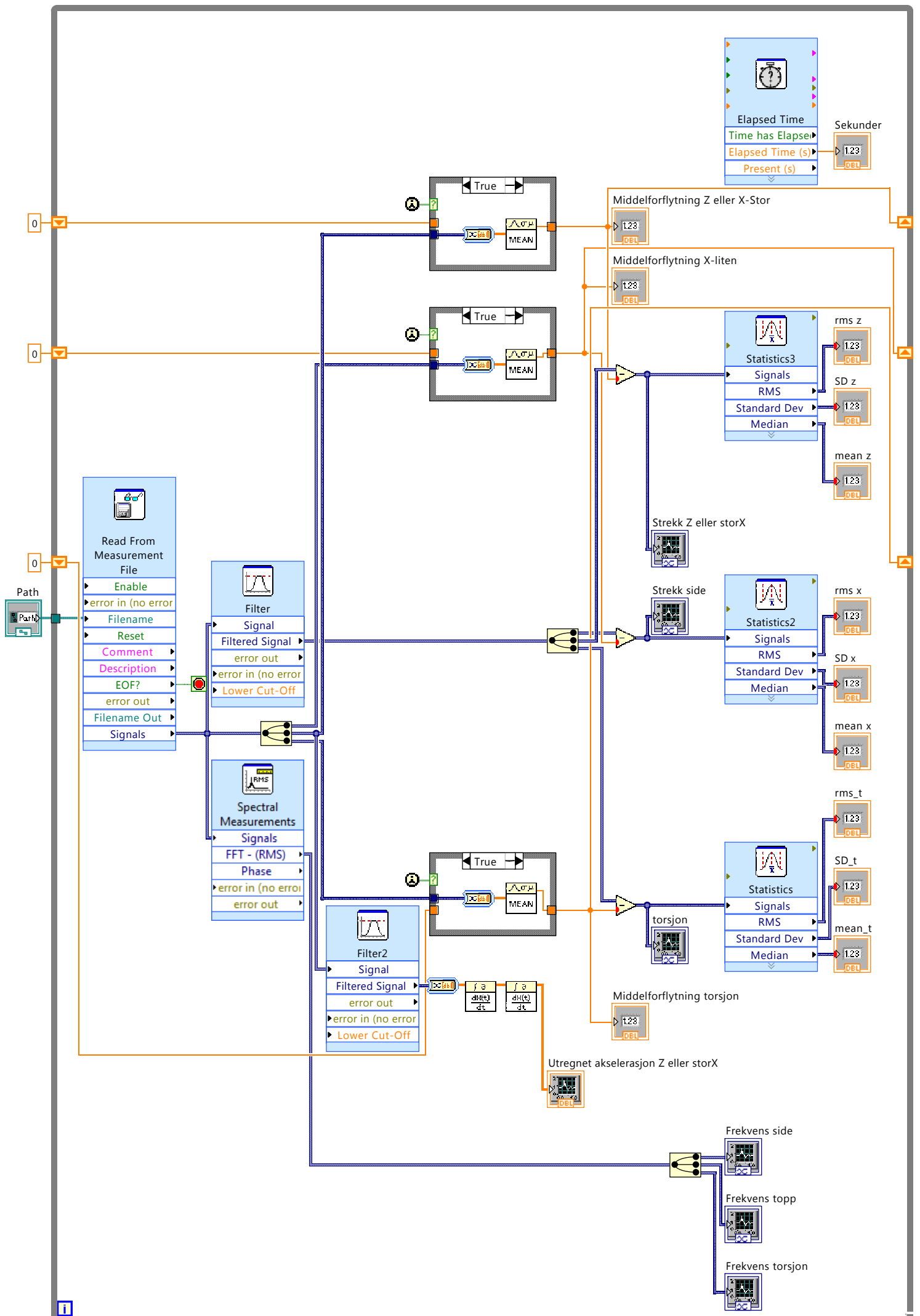
# Read\_text.vi

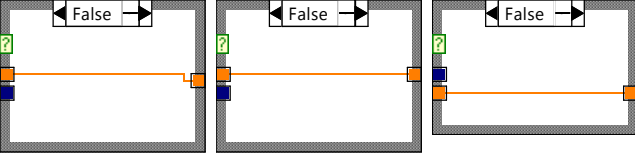


## Front Panel



# Block Diagram





## Express VI Configuration Information



### Convert from Dynamic Data

Convert from Dynamic Data

Converts the dynamic data type to numeric, Boolean, waveform, and array data types for use with other VIs and functions.



### Convert from Dynamic Data2

Convert from Dynamic Data

Converts the dynamic data type to numeric, Boolean, waveform, and array data types for use with other VIs and functions.



### Convert from Dynamic Data3

Convert from Dynamic Data

Converts the dynamic data type to numeric, Boolean, waveform, and array data types for use with other VIs and functions.



### Elapsed Time

Elapsed Time

Indicates the amount of time that has elapsed since the specified start time.

-----

This Express VI is configured as follows:

Time Target: 10000 s

Auto Reset: On



### Read From Measurement File

Read From Measurement File

Reads data from a text-based measurement file (.lvm) or binary measurement file (.tdm or .tdms).



### Filter2

Filter

Processes signals through filters and windows.

-----

This Express VI is configured as follows:

Filter Type: Lowpass

Cut-Off: 400

IIR/FIR: Infinite Impulse Response (IIR) Filter

Topology: Butterworth

Order: 3



### Convert from Dynamic Data4

Convert from Dynamic Data

Converts the dynamic data type to numeric, Boolean, waveform, and array data types for use with other VIs and functions.



### Filter

Filter

Processes signals through filters and windows.

-----

This Express VI is configured as follows:

Filter Type: Lowpass

Cut-Off: 400

IIR/FIR: Infinite Impulse Response (IIR) Filter

Topology: Butterworth

Order: 3



### Statistics

Statistics

Returns the selected parameter of the first signal in a waveform.

-----

This Express VI is configured as follows:

This Express VI produces the following measurements:

RMS

Standard Dev

Median



### Statistics3

Statistics

Returns the selected parameter of the first signal in a waveform.

-----

This Express VI is configured as follows:

This Express VI produces the following measurements:

RMS

Standard Dev

Median



### Statistics2

Statistics

Returns the selected parameter of the first signal in a waveform.

-----

This Express VI is configured as follows:

This Express VI produces the following measurements:

RMS

Standard Dev

Median

# Vedlegg

1. Bilder fra testing
2. Grafer fra test i dreiebenk
3. Python-program
4. Arduino-program
5. C-program
6. LabView-program
7. **Datablad for lim HBM z70** (kan lastes ned fra HBM)
8. Forstudierapport

# Vedlegg

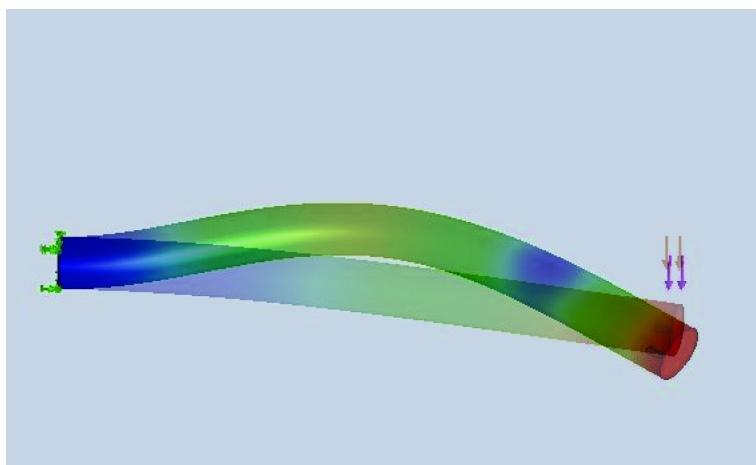
1. Bilder fra testing
2. Grafer fra test i dreiebenk
3. Python-program
4. Arduino-program
5. C-program
6. LabView-program
7. Datablad for lim HBM z70
8. **Forstudierapport**

# Instrumentering av vibrasjonsdempede borstenger

Stud.techn. Vegard Brøtan

5. februar 2010

FORSTUDIERAPPORT – MASTEROPPGAVE vår 2010



Norwegian University of  
Science and Technology

Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi  
Institutt for produksjon- og kvalitetsteknikk



## Innhold

<b>1</b>	<b>Introduksjon - hensikten med dokumentet</b>	<b>2</b>
1.1	Rapporten . . . . .	2
1.2	Bedriftene . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Analyse av oppgavens utfordringer</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Bakgrunn for oppgaven</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Målsettninger</b>	<b>4</b>
4.1	Resultatmål . . . . .	4
4.2	Effekt mål . . . . .	4
<b>5</b>	<b>Fremdriftsplan</b>	<b>5</b>
5.1	Gantt . . . . .	5
5.2	Arbeidspakker . . . . .	6
<b>6</b>	<b>Midlertidig litteraturliste</b>	<b>7</b>
<b>7</b>	<b>Kildehenvisning</b>	<b>7</b>

# 1 Introduksjon - hensikten med dokumentet

## 1.1 Rapporten

Denne forstudierapporten er laget for å få innsyn i det arbeidet som trengs for å produsere en masteroppgave rundt oppgaven "Instrumentering av vibrasjonsdempede borstenger". Her forklares plan og mål med prosjektet. Under skrivingen av forstudierapporten har undertegnede gjort et kort litteraturstudie, slik at det er mulig å få et innblikk i den informasjon som omhandler problemstillingen.

## 1.2 Bedriftene

Oppgaven er i hovedsak skrevet for Teeness, men har også rot i Volvo Aero. Her er forklart kort hvor de kommer fra og hvem de er:

**Teeness:** Teeness ASA er verdensledende innen dempede verktøyholdere for fresing, dreining og dyphulls boring. Verktøyholderene deres brukes blant annet til bil-, fly-, olje- og gassindustri. Bedriften ble grunnlagt som en nysatsing fra det tidligere Trondhjem Nagle og Spikerfabrikk (TNS). Teeness eies nå av Sandvik og igjennom deres navn selges verktøyholder-løsninger for maskinering med svært høy presisjon.

**Volvo Aero:** Volvo Aero Norge (VAN) produserer relativt arbeidskrevende flymotordeleler både for Snecma, PW og GE. VAN ble stiftet som Norsk Jetmotor AS i 1987 for å videreføre virksomheten ved flymotoravdelingen til A/S Kongsberg Våpenfabrikk. I 1998 solgte den norske stat og Kongsberg Gruppen ASA 77,8% av aksjene i Norsk Jetmotor til Volvo Aero.

## 2 Analyse av oppgavens utfordringer

Opgavens omfang kan deles opp i punkter som inneholder disse forskjellige utfordringer:

1. Forstudie: Leveres fredag 05.02 for å vise prosjektets plan og mål.
2. Litteraturstudie: I oppgaven skal vi først og fremst se på strekkklapper. Fra min tidligere oppgave har vi kjøpt inn strekkklapper som vi vet fungerer bra. Jeg vil likevel prøve å finne alternativer og om mulig noen som passer bedre enn de vi har tilgjengelig i dag. Samtidig er det aktuelt å bruke piezo-elektiske sensorer til å kontrollere stekklappene. Planen er da å koble sensorer mot en PC, mini-PC eller mikrokontroller for deretter å koble seg opp mot maskinstyringen til en dreiebenk for videre å kompensere for utbøyningen i borstangen. I litteraturstudiet må det derfor innhentes mye informasjon igjennom diverse firmaer.
3. Analyse: FEM-analyser vil stå sentralt i utformingen av forsøk, der både bøy- og torsjonssvingninger skal tas hensyn til. Nøyaktighet og robusthet burde maksimeres, noe som gjør at alternative utforminger av borstengene vil være aktuelt.
4. Praktisk arbeide: Jeg planlegger å først lage et LabView-program som er tilpasser det systemets oppsett, ut fra dette kan vi teste systemet og sensorerene. Deretter er planen å finne en lavkost-løsning som gjør det samme som en PC med LabView. Dette i form av en mikrokontroller eller en mini-PC. Det vil være interessant å se på om systemet rundt borstangen kan bruke radiell justering av skjæret til å kompensere for utbøyning.
5. Prosjektstyring: Da det fortsatt er mye uklart vil det være viktig med god dialog med veiledere og bedrift. Det er ordnet med eget arbeidsområde på Teeness, slik at jeg kan jobbe både på skolen og hos bedriften.
6. Sluttrapport: Med sluttrapporten følger illustrering av forsøk og analyser av resultat. Det er viktig at dette får tildelt nok tid, da dette blir sluttproduktet.

## 3 Bakgrunn for oppgaven

Opgaven er en fortsettelse av oppgaven "Innvendig maskinering av jetmotorakslinger" og bygger på at Teeness gjerne vil utvikle borstenger som kompenserer for utbøyning. Dette vil gjøre borstengene mer nøyaktig, slik at de kan oppnå bedre toleranser. Instrumentering av en borstang vil være viktigst i lange stenger. Derfor vil vi fortsatt tenke på AVROPROS-verktøyet i VAN, hvor det kan være interessant å se om systemet kan justere seg med sleiden som skjæret sitter fast på.

## 4 Målsettninger

### 4.1 Resultatmål

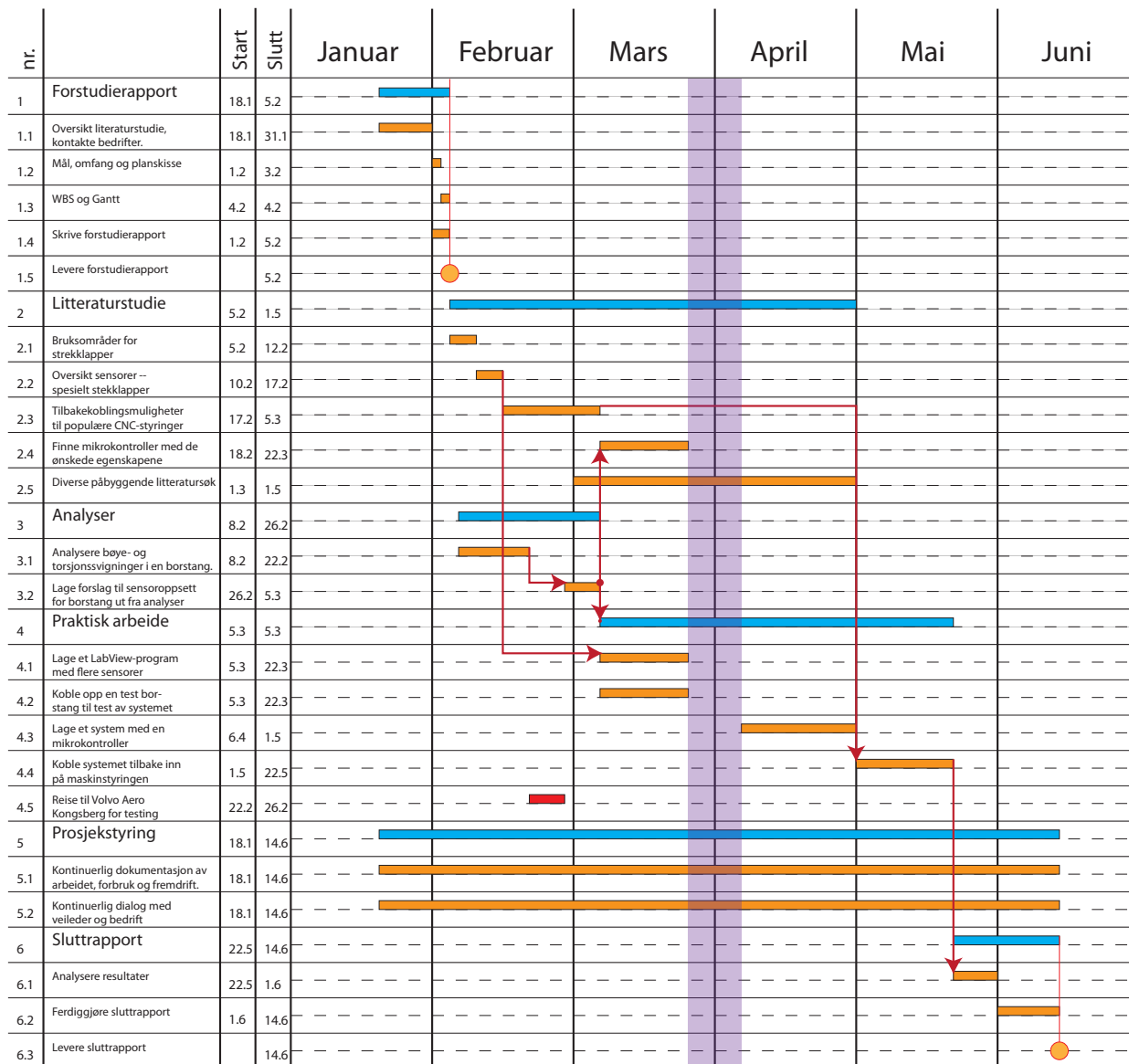
- Lage en forstudierapport innen 5.feb 2010
- Ved hjelp av litteratur, simulasjoner og praktiske forsøk skal det utvikles bedre praktisk og teoretisk forståelse for temaet.
- Hjelpe til i utviklingen av et robust system som kompenserer for utbøyning i en borstang.
- Oppgaven avsluttes med en sluttlevering innen 14.jun 2010

### 4.2 Effektmål

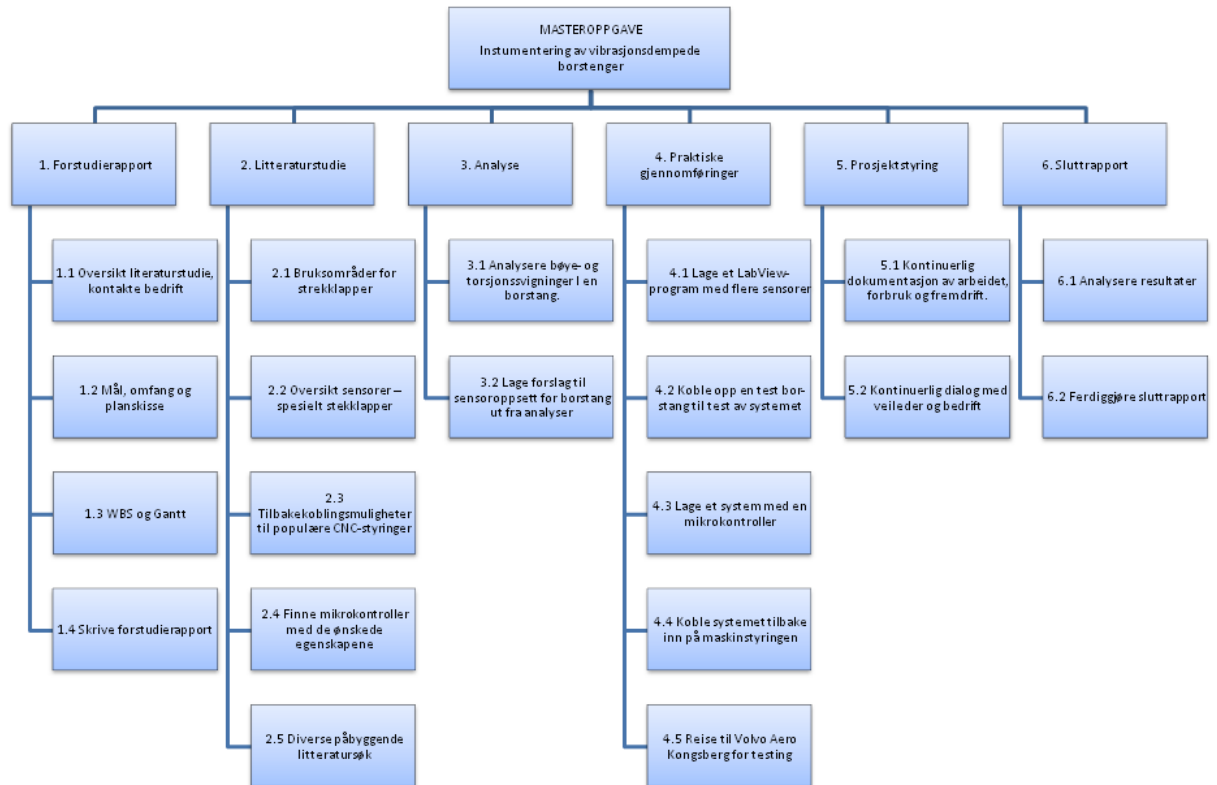
- Oppgaven skal brukes som begrunnelse for karakter til kandidaten.
- Det skal være mulig for bedriften å nyttiggjøre seg de resultatene som legges frem.

## 5 Fremdriftsplan

### 5.1 Gantt



## 5.2 Arbeidspakker



## 6 Midlertidig litteraturliste

<http://www.renishaw.com/en/renishaw-launches-the-worlds-first-strain-gauge-based-inspection-probe-for-grinding-machines--9696>

<http://www.emant.com/325007.page>

[http://www.kistler.com/it\\_it-it/Technology\\_StrainGage/Strain-Gage-Technology.html](http://www.kistler.com/it_it-it/Technology_StrainGage/Strain-Gage-Technology.html)

<http://www.hbm.com/>

<http://www.heidenhain.no/>

<http://www.mazakusa.com/>

<http://www.automation.siemens.com/mc/mc-sol/en/701ecff2-0611-47eb-8be8-73d4be9f33cd/index.aspx>

<http://www.fanuccnc.se/>

<http://www.ni.com/>

Terje K. Lien (1995) Digital Styring for Mekatronikk, TAPIR

R.Karlsen og K.Sørby (2003) Minimizing vibration tendencies in machining, SINTEF

V.Brøtan (2009) Innvendig maskinering av jetmotorakslinger

## 7 Kildehenvisning

Asbjørn Rolstadås (2006) Praktisk prosjektstyring

Heidi Dreier (2009) Prosjektoppgave og fordypningstema: Hovedoppgaver