

Evaluering af måleopstillingen til registrering af kraniebevægelser

3. november 2011

Ref 7221 KDI

Rapport nr. DFM-2011-R04



**Dansk Fundamental
Metrologi A/S**

Matematiktorvet 307

DK-2800 Kgs Lyngby

Tel +45 4593 1144

Fax +45 4593 1137

www.dfm.dtu.dk

Resumé

Denne rapport beskriver arbejdet udført indenfor videnkuponprojektet 10-098180 (journalnummer Forsknings- og Innovationsstyrelse). En måleopstilling bestående af to mekaniske aktuatorer er evalueret. Til dette formål er der udviklet et computerprogram til dataopsamling og -analyse. Formålet med opstillingen er at måle potentielle kranieudvidelser af størrelsesorden op til 300 μm . Aktuatorerne er stabile indenfor en måleusikkerhed på omkring 5 μm indenfor det maksimale måleområde af omkring 10000 μm . Det nyudviklede program visualiserer bevægelser af aktuatorerne og kan detektere periodiske svingninger i måledata.

Udarbejdet af

Kai Dirscherl

Dansk Fundamental Metrologi A/S

Matematiktorvet 307

DK-2800 Kgs Lyngby

Indhold

1	Om videnkupon.....	3
2	Mekaniske aktuatorer	4
2.1	Baggrund	4
2.2	Evaluering af aktuatorernes måleevne	5
2.3	Computerinterfacing og synkronisering:	7
2.4	Måleopstilling.....	8
3	Kontrolprogram.....	9
3.1	Indhold og installation	9
3.2	Programmets funktioner.....	10
3.3	Svingningsanalyse.....	11
4	Målinger.....	12
4.1	Test af opstillingens stabilitet.....	12
4.2	Test af opstillingen med mekanisk simulation	13
4.3	Tests med personer.....	15
5	Appendix.....	20
5.1	Teknisk tegning	20
5.2	Usikkerhedsbudget aktuatormåling.....	21

1 Om videnkupon

Indenfor videnkuponprojektet 10-098180 (journalnummer Forsknings- og Innovationsstyrelse) udvikles en måleopstilling til detektering og udmåling af kraniets periodiske udvidelse på angiveligt op til 300 μm , omkring 6-12 gange per minut. Udvidelsen er følsom, dog er den ikke måleteknisk dokumenteret endnu. To følsomme mekaniske aktuatorer med en måleopløsning på 1 μm positioneres modsat hinanden på hver side af kraniet. Udviklingen udføres af Institut Meulengracht og GTS-instituttet Dansk Fundamental Metrologi (DFM). Institut Meulengracht stiller to 'moving coil' aktuatorer til rådighed, som kan detektere forskydninger med en måleopløsning på 1 μm . De optimale målepunkter på kraniet defineres ifølge instituttets erfaringsværdier.

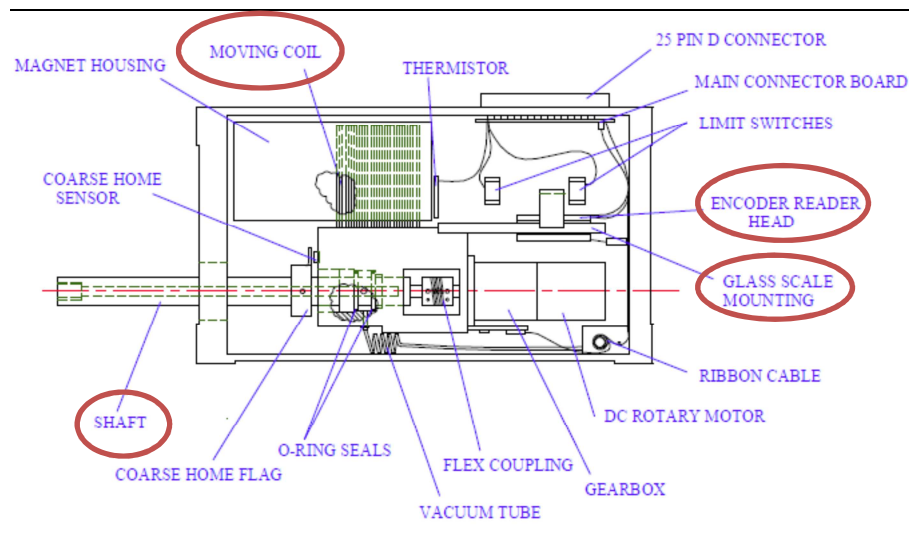
DFM designer i tæt samspil med Institut Meulengracht en måleopstilling og bygger en prototype med tilgængeligt laboratorieudstyr. En dedikeret stand-alone software skrives til udlæsning og analyse af måledata til videre brug for virksomheden. Endeligt evaluerer DFM måleopstillingen på en metrologisk måde. Usikkerhedsbudget stilles op og målinger analyseres.

2 Mekaniske aktuatorer

2.1 Baggrund

En aktuator er et instrument, der kan måle længden af en forskydning ved hjælp af en pinol og en indbygget glaslineal, se Figur 1. Pinolens føring tillader kun forskydning langs en akse. Under bevægelsen føres en optisk sensor hen over glaslinealen, som registrerer linealens inddelinger og på denne måde registrerer afstanden. Udover en lineal til afstandsmåling indeholder en aktuator en linearmotor bestående af en spole og en magnet. Motoren kan anvendes til at generere en forskydning af pinolen med en given afstand eller, som beskrevet i denne rapport, til at generere en lille fjederkraft, der holder pinolen i kontakt med måleemnet. Moderne aktuatorer kan måle forskydninger langt under en mikrometer. Inddelingen på glaslinealen samt den mekaniske stabilitet udgør begrænsninger af måleevnen. I denne rapport beskrives to ensartede aktuatorer, som har en opløsning på 1 μm på et måleområde af 10000 μm , se den tekniske tegning i 5.1.

Figur 1 En aktuator set indefra

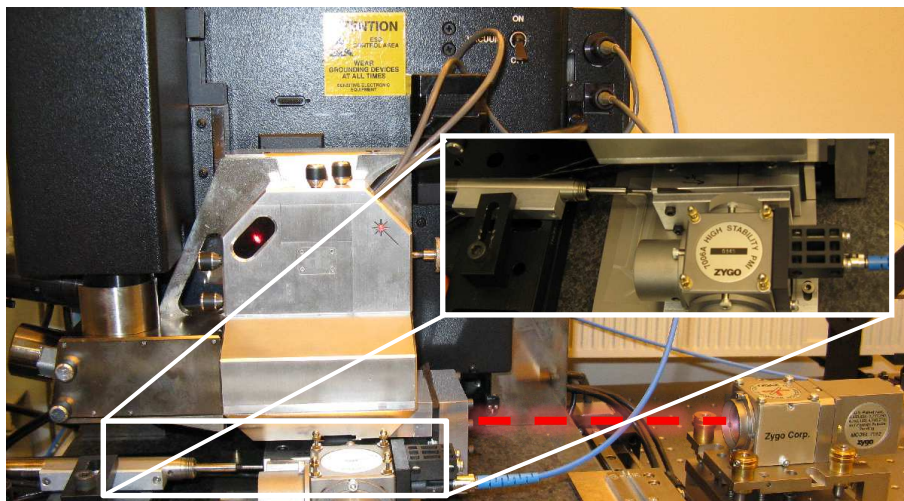


Skema af en aktuator. De mest relevante dele er skaftet der overfører bevægelsen til en glasskala, en elektro-optisk encoder, der registrerer flytningen af glasskalaen, samt en magnetisk spole, der anvendes til at generere en ønsket mekanisk modstand.

Aktuatorerne i dette projekt er identificeret ifølge deres serienummer:

Aktuator 1 (tilsluttet COM6)	Aktuator 2 (tilsluttet COM4)
AVS 50-12-010-51	AVS50-12-010-51F3
S/N: CE52	S/N.:CE173
0907	24V 1110

Figur 2. Opstilling til evaluering af aktuatorernes måleevne



Aktuatoren (til venstre) er sat til at måle flytningen af et forskydningsbord (se indlæg). Fra den anden side måles flytningen af et interferometer med laserlys (stiplet rød linje).

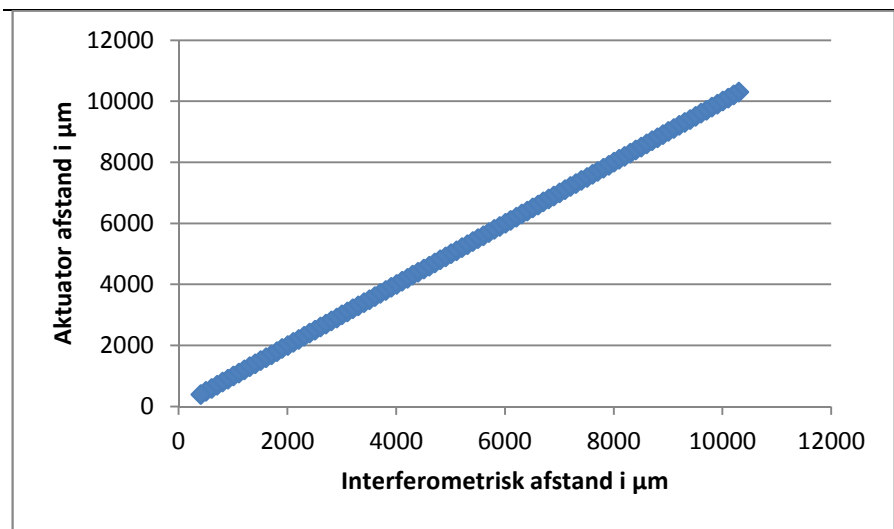
2.2 Evaluering af aktuatorernes måleevne

Meteren realiseres på det primære niveau ved bølgelængden af stråling fra en iod-stabiliseret helium-neon laser^a. Ved hjælp af en optisk måleopstilling, et såkaldt interferometer, kan aktuatorernes forskydning relateres til meterdefinitionen. Et interferometer kan ved hjælp af laserlys måle forskydninger berøringsfrit med nanometer nøjagtighed, dvs. 1000 gange finere end aktuatorernes måleevne. Til dette formål sættes aktuatorerne skiftevis ind i en interferometrisk opstilling, se Figur 2. En aktuator sættes til måling på en side af et forskydningsbord, et spejl er monteret på bordets anden side. Dermed måles den samme forskydning af både aktuatoren og interferometeret, som således tillader evalueringen af aktuatorens måleevne. Flyttes forskydningsbordet ikke, viser aktuatoren den samme konstante værdi. Dermed er støjsignalet mindre end opløsningen og kan negligeres.

Figur 3 viser et diagram, hvor aktuatorernes forskydningsmåling er plottet overfor interferometerets måling. For at tydeliggøre aktuatorernes måleafvigelser fra en ideel position er det nødvendigt at trække en regressionslinje fra de opsamlede måledata. Hældningen af den beregnede regressionslinje er samtidig den gennemsnitlige skalakoefficient. Når glasli-nealens inddelinger og deres tælling stemmer overens med den faktisk gennemførte forskydning, vil skalakoefficienten være lige med 1.

^a *Metrologi - kort og godt*, udarbejdet af Preben Howarth, Dansk Fundamental Metrologi (1999), DFM-98-R12 (dansk version), ISBN 978-87-988154-5-7(engelsk version)

Figur 3. Aktuator 2 mod interferometrisk afstandsmåling



Måleresultat af valideringsopstilling for aktuator 2. Afstanden som målt med aktuatoren er vist over for afstanden som målt med interferometeret.

Skalakoefficienterne (eller hældningen af regressionslinjen) er bestemt til $1,00018 \pm 0,00003$ (aktuator 1) og $1,00085 \pm 0,00003$ (aktuator 2). I begge tilfælde er $0,00003$ den statistiske standard usikkerhed på koefficienterne som dermed er velbestemt. De små afvigelser fra den ideale koefficient 1 ligger indenfor vinkelvariationer af evalueringsopstillingen, (cosinusbidrag i usikkerhedsbudget, se 5.2).

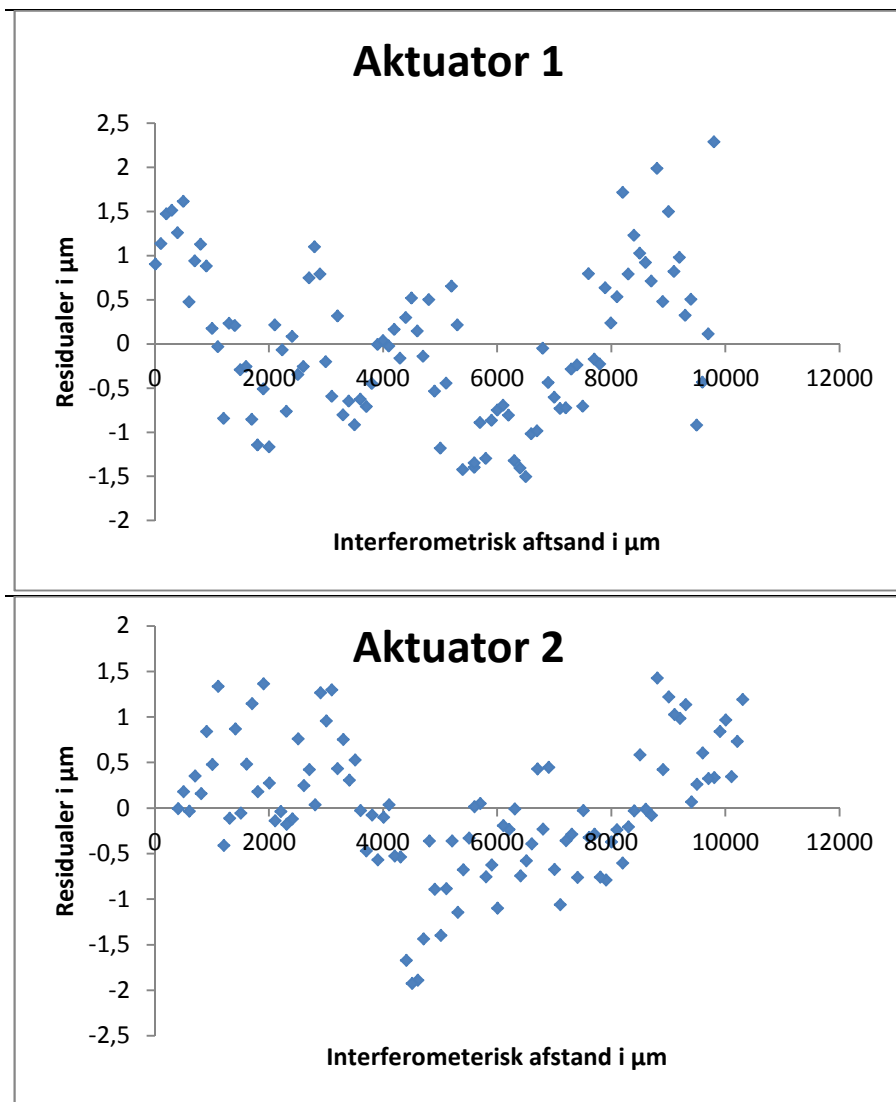
Diagrammerne i Figur 4 viser forskellen (såkaldte residualer) mellem aktuatorernes forskydningsmåling og interferometerets måling er vist over hele måleområdet på $10000 \mu\text{m}$. Her vises de lokale forskelle mellem den ideelle regressionslinje og aktuatorernes målinger. Små fejl op til $2 \mu\text{m}$ kan ses for begge aktuatorer. Dette stemmer overens med aktuatorernes gentagelsesfejl, se 5.1 "Encoder repeatability". Variationen omkring regressionslinjen har en standardafvigelse på $0.9 \mu\text{m}$. Dermed kan konkluderes at aktuatorernes visning af forskydninger ligger med 95% sandsynlighed indenfor et interval af $2 \mu\text{m}$ omkring den viste måleværdi. Denne usikkerhed er tilstrækkelig for at kunne måle udvidelser, som er forventet at være mellem $100 \mu\text{m}$ og $200 \mu\text{m}$.

I aktuatorernes totale måleområde er den ekspanderede usikkerhed $U(d)$ på en måling af afstand d fra aktuatorernes minimumværdi estimeret til:

$$U(d) = \sqrt{(2 \mu\text{m})^2 + (d \cdot 4 \cdot 10^{-4})^2}, \quad (1)$$

se usikkerhedsbudget i 5.2. For en typisk afstandsmåling af en aktuator på $200 \mu\text{m}$ er den ekspanderede usikkerhed omkring $2 \mu\text{m}$.

Figur 4. Residualerne af afstandsmålinger



Forskellene fra den ideale linje, såkaldte residualer, af aktuatormålingerne i evalueringsopstillingen. Det kan tydeligt ses at positionsfejlen ligger vel indenfor $2 \mu\text{m}$ afvigelse for hele måleområdet.

2.3 Computerinterfacing og synkronisering:

Begge aktuatorer understøtter en RS232-kommunikationsprotokol på den serielle port af en standard PC. Aktuator 1 er sat til COM Port 6, aktuator 2 er sat til COM port 4. Begge COM ports drives med en hastighed på 19200 baud. Aktuatorerne er programmeret til at sende deres måleposition 20 gange per minut. Hertil bruger begge aktuatorer deres interne tidsnormaler. En forskel mellem de to tidsnormaler på omkring 1% blev registreret under målingerne. For at undgå at målingernes synkronisering løber signifikant ud af fase efter f.eks. 2 minutter, vælges i computerprogrammet tidsnormalen af aktuator 2 til at synkronisere målinger af begge

aktuatorer. Dermed er den maksimale synkroniseringsfejl begrænset til højst 1/20 sekund. Den ekspanderede relative usikkerhed på måleværdien "svingninger per minut" estimeres til 5%.

2.4 Måleopstilling

Aktuatorerne sættes hver bag et øre med kontakt på et kranieben, se Figur 5. Udover de enkelte forskydninger kan aktuatorernes positionering med fordel udnyttes til at skelne mellem en forskydning der skyldes en flytning af hovedet, f.eks. fra venstre til højre, hvor aktuatorerne forskydes i den samme retning, og en potentielt udvidelse af hovedet, hvor aktuatorerne forskydes i modsat retning. Matematisk beskriver summen af aktuatorernes målinger den samlede udvidelsesbevægelse, mens differensen kan bruges for at identificere en forskydning, som skyldes en flytning af måleobjektet. Siden aktuatorerne kun kan måle lineært i en retning og dermed ikke kan registrere kræfter opad, bliver også små skydninger, der skyldes en næsten lodret kraniebevægelse registreret. Den ekspanderede måleusikkerhed $U_s(d_1; d_2)$ for et sammensat signal, enten sumsignalet eller differenssignalet, beregnes efter følgende formel,

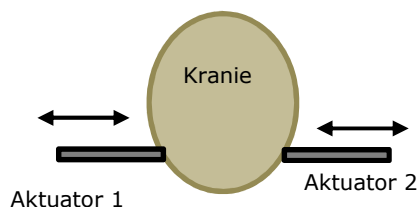
$$\begin{aligned} U_s(d_1; d_2) &= \sqrt{(2 \mu m)^2 + (d_1 \cdot 4 \cdot 10^{-4})^2 + (2 \mu m)^2 + (d_2 \cdot 4 \cdot 10^{-4})^2} \quad (2) \\ &= \sqrt{2(2 \mu m)^2 + (d_1^2 + d_2^2)(4 \cdot 10^{-4})^2} \end{aligned}$$

I tilfældet af $d_1 = d_2$, dvs. begge aktuatorer måler den samme afstand, kan ligningen forenkles til,

$$\begin{aligned} U_s(d_1; d_2) &= \sqrt{2} \sqrt{(2 \mu m)^2 + (d_1 \cdot 4 \cdot 10^{-4})^2} \quad (3) \\ &= \sqrt{2} U(d_1). \end{aligned}$$

Bemærk at der kan opstå en systematisk fejl ved en sammensæt måling når aktuatorerne ikke står parallelt overfor hinanden. En vinkelafvigelse af måleretninger på 10° fører f.eks. til en målt forskydning som er 2% kortere end den faktiske forskydning.

Figur 5. Skema måleopstilling "kraniepuls"



En aktuator sættes på hver side af testpersonens kranie. Udover de enkelte aktuatormålinger kan differensen og summen af deres målte værdier bruges til at adskille mellem situationerne når aktuatorerne flytter sig i den samme retning eller i modsatte retninger.

3 Kontrolprogram

3.1 Indhold og installation

Programmet er skrevet i LabWindows/CVI^a og består af to filer:

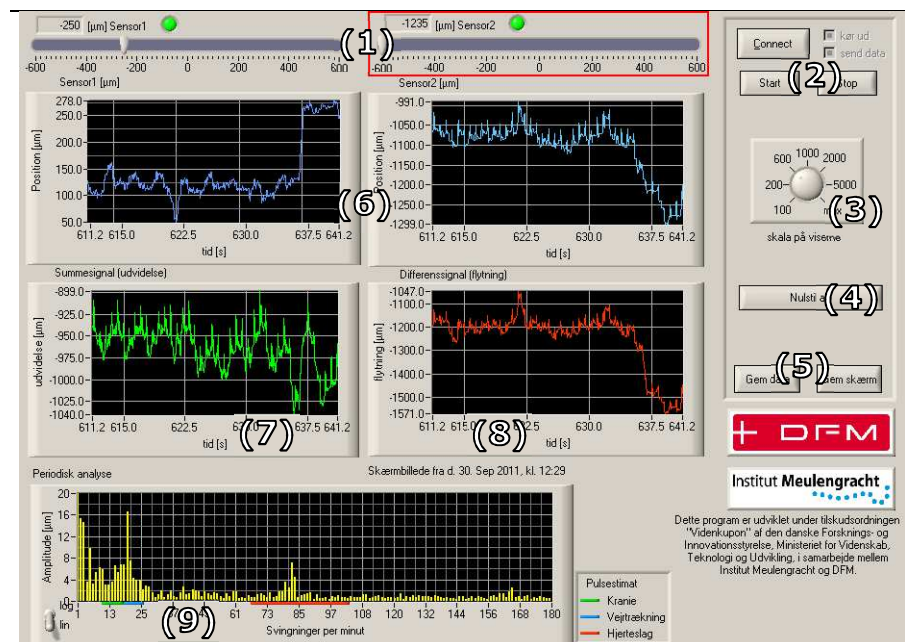
- Puls3_PRJ.exe (det eksekverbare program)
- Puls3_UI.uir (den grafiske brugeroverflade)

LabWindows/CVI er et videnskabeligt programmeringsmiljø, som tillader distribuering af programmer. For at kunne køre et program på en PC uden installeret programmeringsomgivelse findes der en run-time engine, som kan hentes fra hjemmesiden: www.ni.com → Support → LabWindows/CVI → Drivers and Updates → LabWindows/CVI Run-Time Engine.

Udover at have installeret LabWindows/CVI run-time engine på en PC skal begge nævnte filer ligge i en fælles (vilkårlig) folder.

Derefter kan programmet Puls3_PRJ.exe startes ved et almindeligt dobbeltklik.

Figur 6. Skærbillede af brugerfladen



I skærbilledet vises ni elementer til dataanalyse og styring af måleprocessen. Se teksten for yderligere detaljer.

^a <http://www.ni.com/lwcv/>

3.2 Programmets funktioner

Programmet kommunikerer med aktuatorerne, viser og analyserer måledata, samt giver mulighed for at gemme data både som tal og som grafisk skærbillede af brugeroverfladen.

Brugeroverfladen vises i Figur 6. De enkelte elementer er:

(1): Her vises de aktuelle målte værdier fra begge aktuatorer. Værdier vises både som tal i den øverste linje og som en viser på en skala. Skulle værdien ligge udenfor skalaens visningsområde, sættes der en rød ramme omkring skalaen. Skalaområdet kan justeres, se (3) og (4). Et grønt lys betyder at der er fejlfri kontakt for dataoverførsel mellem aktuatorerne og programmet, se også (2).

(2): Når aktuatorerne er tilsluttet til PC'en og deres strømforsyning er tændt, kan kommunikation mellem aktuatorerne og PC'en startes med knappen "Connect". Ved fejlfri tilkobling lyser indikatorerne grønt, se (1). Derefter startes aktuatorernes initialiseringsrutine ved at klikke på "kør ud". Når aktuatorerne er kørt ud og har mødt en mekanisk modstand, kan dataoverførsel startes ved at klikke på "send data". Værdierne vises nu i (1). En måling inklusiv dataanalyse startes ved et klik på "Start" og kan stoppes ved et klik på "Stop".

(3): Med drejeknappen kan skalaerne på viserne tilpasses. Det største område er indstillingen "max", hvor hele området vises. De andre tal angiver et symmetrisk område omkring 0. I Figur 6 er drejeknappen sat til 600, hvilket svarer til et skalaområde fra -600 μm til +600 μm . Det anbefales at bruge knap (4) for at nulstille aktuatorerne.

(4): Med knappen sættes de aktuelle aktuatorværdier til 0 μm . Dette hjælper med at udføre målinger symmetrisk omkring 0 μm . De tidligere opsamlede data samt diagrammerne (6), (7), (8) og (9) slettes.

(5): Knapperne starter en dialog, hvor man kan gemme måledata enten som talrækker ("Gem data") eller som et skærbillede ("Gem skærm") med alle diagrammer. Talrækkerne gemmes i en ASCII-tekst-fil og kan åbnes med almindelige editorer så som "notepad". I starten af ASCII-filen findes der tekst, som fastholder dato og tidspunkt for målingen mm. Programmet kan maksimalt gemme 1000000 målinger. Dette svarer ved 20 målinger per sekund til 13 timer og 53 minutter af uafbrudt måling. Når man gemmer et skærbillede, indsættes der en linje med dato og tidspunkt mellem diagrammerne (8) og (9).

(6): Diagrammerne viser historikken af måleværdier for de sidste 30 sekunder for hver aktuator. Skalaerne på akserne tilpasser sig automatisk.

(7): Her vises sumsignalet af begge aktuatorer. Summen viser, når aktuatorerne flytter sig i modsatte opstillingsretninger. Dermed kan en udvidelsesbevægelse visualiseres.

(8): Her vises differenssignal af begge aktuatorer. Differensen viser, når aktuatorerne bevæger sig i den samme opstillingsretning. Dermed kan man adskille en bevægelse, der skyldes en flytning, fra en bevægelse, der skyldes en udvidelse.

(9): I dette diagram vises en analyse af sumsignalet (7). Analysen går ud på at finde periodiske svingninger i sumsignalet. Resultatet af FFT-analysen, se 3.3 nedenfor, vises som gule striber i diagrammet. Frekvensener er konverteret til svingninger per minut. Højderne af striberne viser svingningsbredden, dvs. den maksimale afstand af en periodisk svingning af aktuator-signalerne. I bunden af diagrammet er områder markeret, hvor hjertepulsen (hvilepuls på 70x-100x per minut), vejrtrækningsrytmen (15x-30x per minut) og en mulig kraniepuls (6x-12x per minut) forventes. En lille kontakt nederst til venstre på diagrammet kan skifte skalaen på y-aksen mellem lineær visning og logaritmisk visning. Bemærk at der findes nogle tidligere programversioner, hvor frekvenserne vises som svingninger per sekund, og kun den halve svingningsbredde angives som "Amplitude".

3.3 Svingningsanalyse

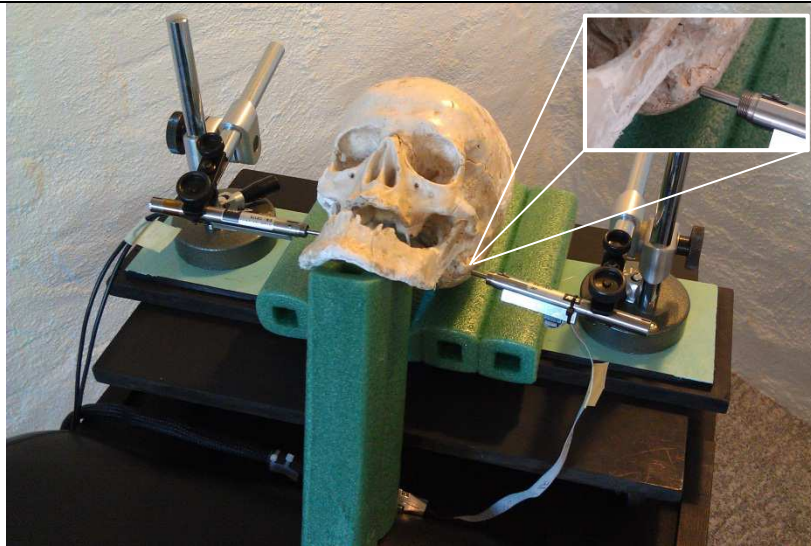
Under forudsætningen at det målte sumsignal er en blanding af periodiske svingninger, kan den matematiske metode "Fourier Transformation" med fordel anvendes for at finde og adskille de enkelte svingninger i målesignalet. For at udføre selve Fourier Transformationen i realtime anvendes den såkaldte Fast Fourier Transformation (FFT). Denne algoritme er hurtig, begrænser dog antallet af målepunkter til potenser af 2. Et godt kompromis mellem måle- og regnehastighed (20 målepunkter per sekund) og en tilstrækkelig stor signalhistorik (omkring et minut) er 1024 ($=2^{10}$) datapoint. Dermed kan $1024/20 = 51,2$ sekunders registrering af måledata gemmes og analyseres på en gang. Ved starten af målingen (2) tager det ca. 7 sekunder, til der er en tilstrækkelig mængde data opsamlet til at udføre en første FFT-analyse. Efter de første 51,2 sekunder er der tilstrækkelig mængde af data til rådighed for at udføre den fulde analyse. Efter 51,2 sekunder flyttes nye målepunkter ind, mens det ældste datapoint flyttes ud (FIFO buffer).

4 Målinger

4.1 Test af opstillingens stabilitet

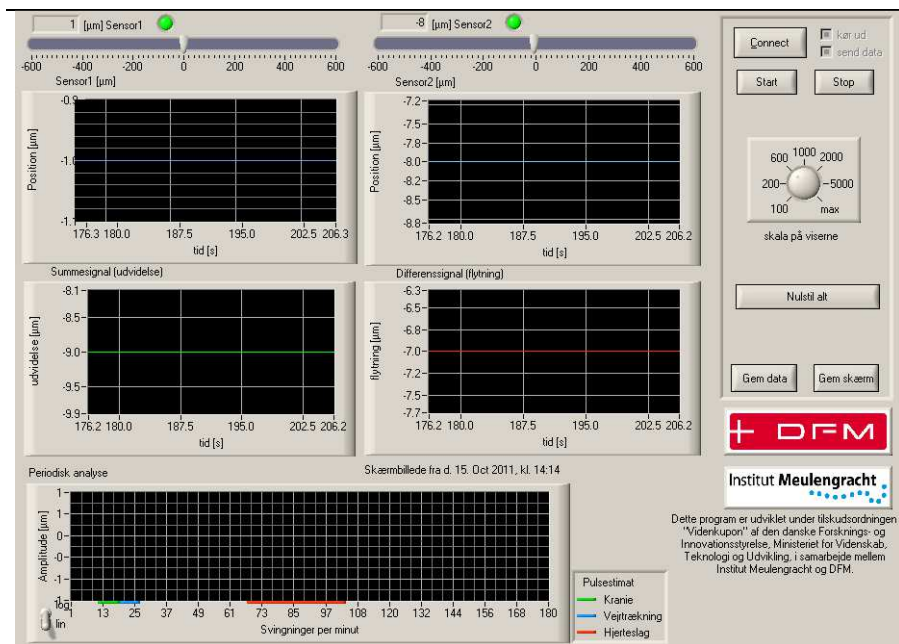
En opstilling med et statisk testobjekt blev valgt for at teste aktuatorernes støjniveau, dvs. deres signalstabilitet, se Figur 7. Et kranie blev brugt for at skabe en målesituation uden bevægelser. Resultatet af over tre minutters måling kan ses i Figur 8. Begge aktuatorer holder deres måleværdier konstant over hele måleperioden.

Figur 7. Testopstilling med et kranie



Aktuatorerne ses kørt ind på kraniet for at teste stabilitet af målesignalet.

Figur 8. Skærbillede af stabilitetstest

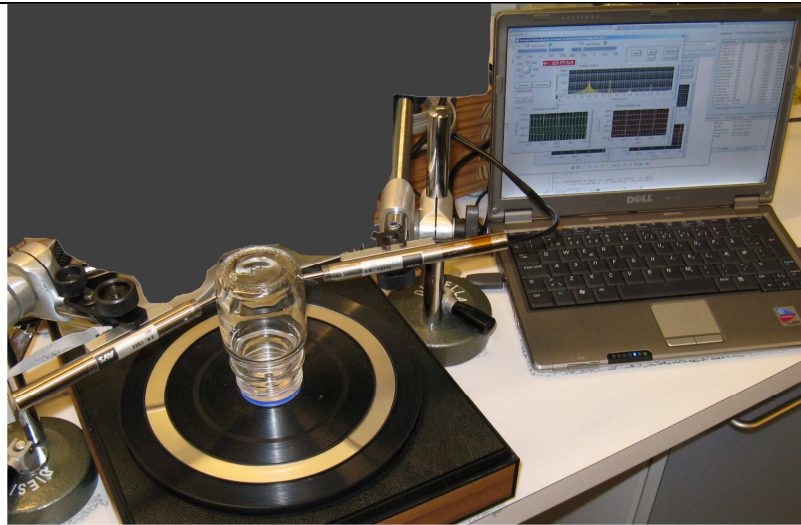


Over en periode på 200 sekunder vises der ingen måleaktivitet af begge aktuatorer. Niveaut af instrumenternes signalstøj er dermed mindre end måleopløsningen. Aktuatorerne måler stabilt.

4.2 Test af opstillingen med mekanisk simulation

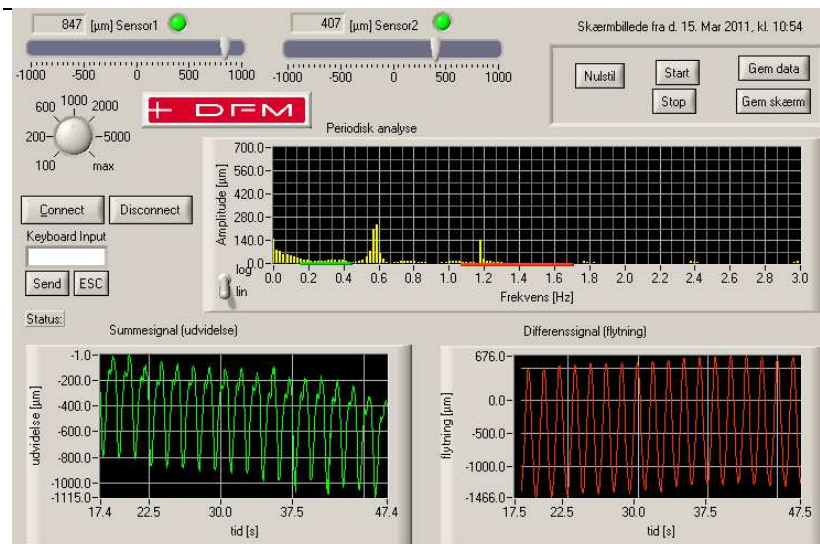
Opstillingen og programmet testes ved hjælp af et rotationsbord. En glasflaske bruges som måleobjekt, se Figur 9. Ved at pladsere glasflasken decentralt på rotationsbordets akse, simuleres både forskydningsbevægelser og udvidelsesbevægelser under rotationen. Ujævnheder på flaskens yderside bidrager yderligere til periodiske svingninger under flaskens rotation, se Figur 10. Fra det målte sumsignal ekstraheres to signifikante frekvenser ved omkring 34 og 68 omdrejninger per minut. Dette viser en god overensstemmelse med de forventede omdrejninger af rotationsbordet på hhv. 33 og 66.

Figur 9. Testopstilling med rotationsbord



En decentralt placeret glasflaske på et rotationsbord bruges som testobjekt for opstillingen og programmet. Aktuatorerne er ikke monteret i direkte forlængelse af hinanden. Vinkelafvigelsen er omkring 10 grader. Dette har dog kun betydning for den absolut målte afstand som bliver mindre, end hvis aktuatorerne var parallelt og diametralt placeret. Den periodiske analyse forbliver urørt ved dette.

Figur 10. Signalanalyse af testopstilling



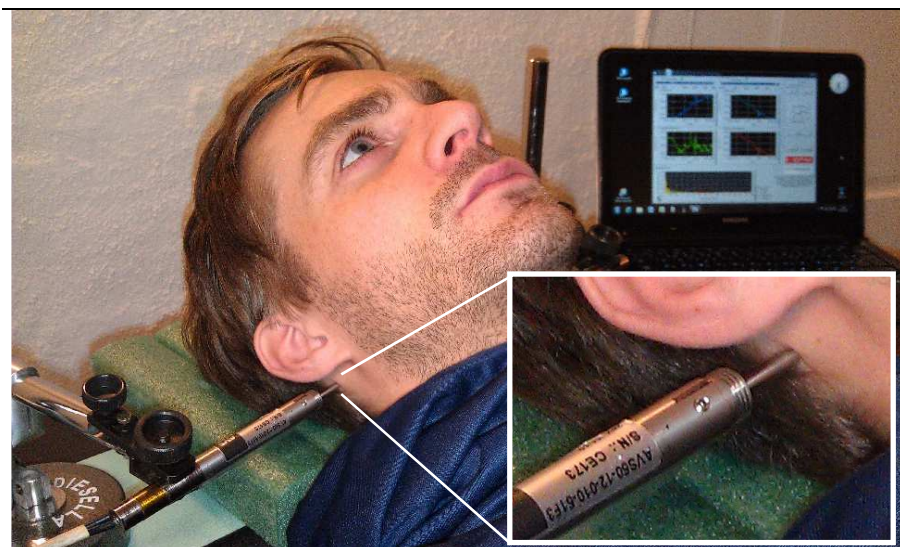
Måleresultat af valideringsopstilling for svingningsanalysen. I den periodiske analyse vises en frekvens tæt på 0.58 Hz, hvilket svarer til omkring 35 omdrejninger per minut. Ved 1.18 Hz ses et andet frekvenssignal. Dette svarer til omkring 70 omdrejninger, den dobbelte værdi. Dette skyldes 2 forhøjninger i glasset hvor flaskens halvdele er smeltet sammen under flaskens fremstilling. Bemærk af skærbilledet er fra en tidligere version.

4.3 Tests med personer

Måleopstillingen som skitseret i Figur 5 blev anvendt på 27 testpersoner med i alt 158 forsøg. Personerne hviler på et leje af en foldbar briks, hvor der er pålagt en 7 cm topmadras af mærket ErgoPur til dæmpning af uønskede svingninger. Efter de første 25 tests på 3 personer kunne ses at bl.a. kroppens vejtrækningsbevægelser overlejlrede målingerne. For at frakoble kroppens vejtrækningsbevægelser fra målepunkterne på kraniet påmonteres herefter en plade ved hovedenden af lejet. Pladen danner grund for et rullebræt, hvorpå hovedet hviler på en "knæpude" i to lag. Aktuatorerne er fastgjort i to stativer på rullebrættet. Hermed bibeholder hovedet og aktuatorerne deres relative position.

Ved de fleste målinger er aktuatorerne placeret på øreknoglens vorteformede del, se Figur 11. Ved nogle af målingerne er aktuatorerne først placeret på øreknoglens vorteformede del, herefter midt på øreknoglen.

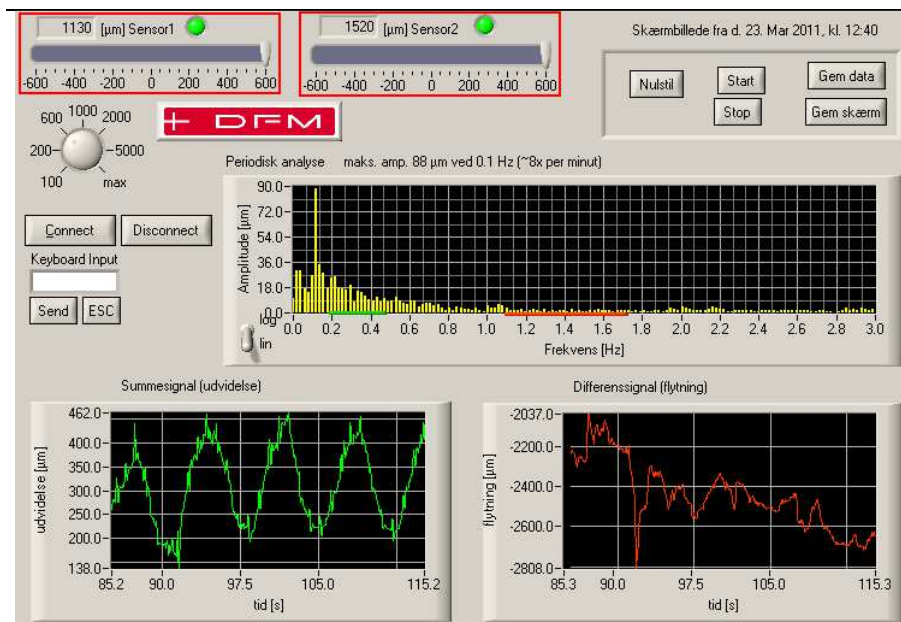
Figur 11. Aktuatoropstilling med testperson



Aktuatoren måler bevægelser på øreknoglens vorteformede del.

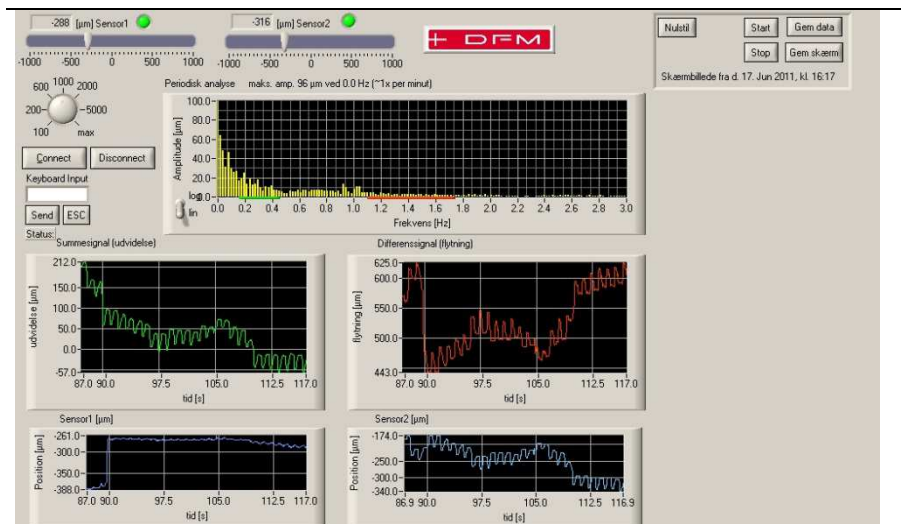
I det følgende vises forskellige målinger. Se billedteksterne for detaljer.

Figur 12. Testperson "Johannes"



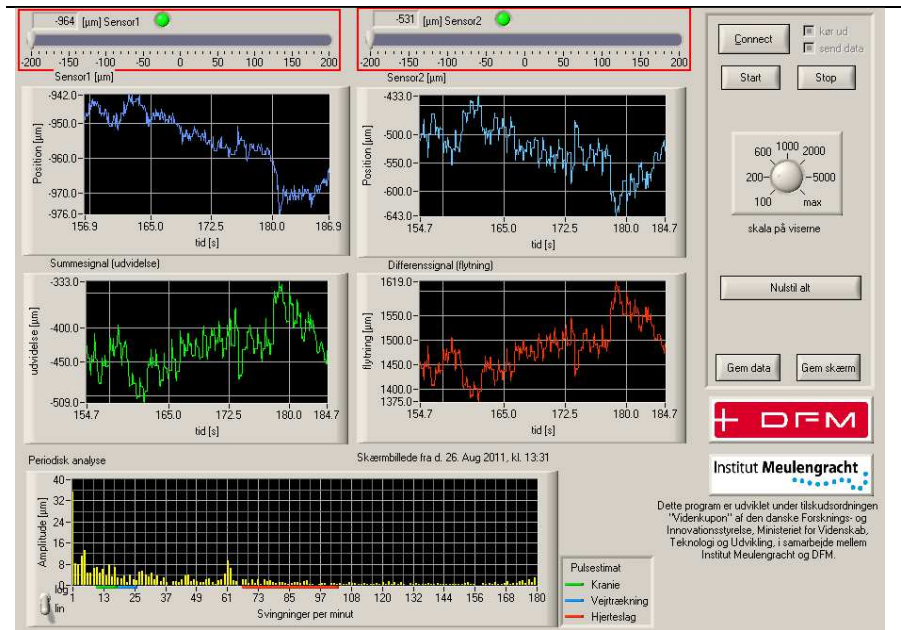
Svingning på 200 µm ca. 8x per minut. Lejret uden rullebræt.

Figur 13. Testperson "Johannes"



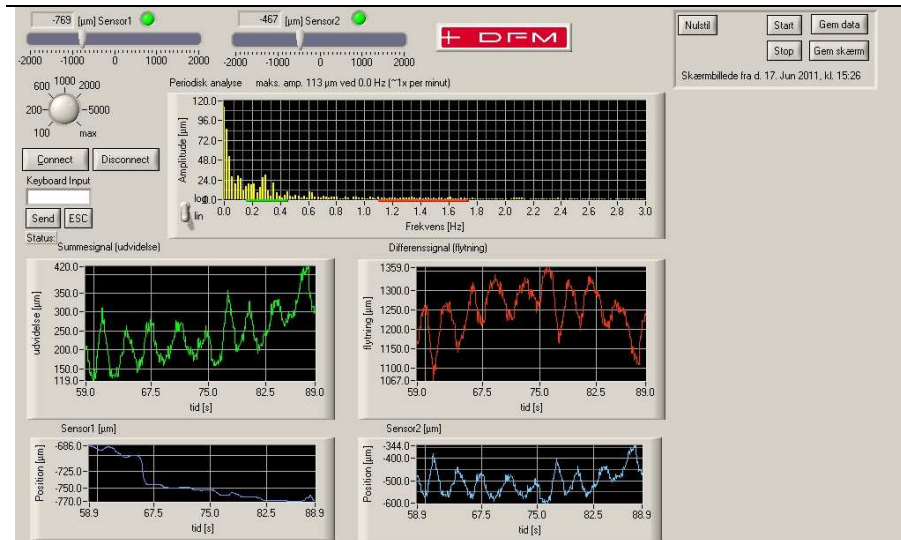
Små svingninger på 50 µm omkring 60x per minut. Lejret uden rullebræt.

Figur 14. Testperson "Johannes"



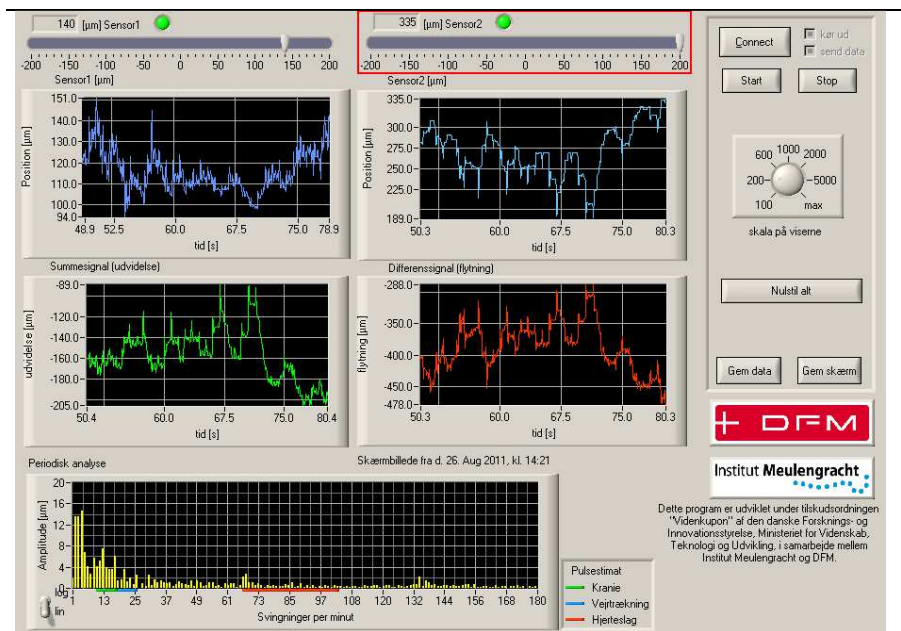
Små svingninger omkring 60x per minut og ved 4x per minut. Lejret med rullebræt.

Figur 15. Testperson "Kasia"



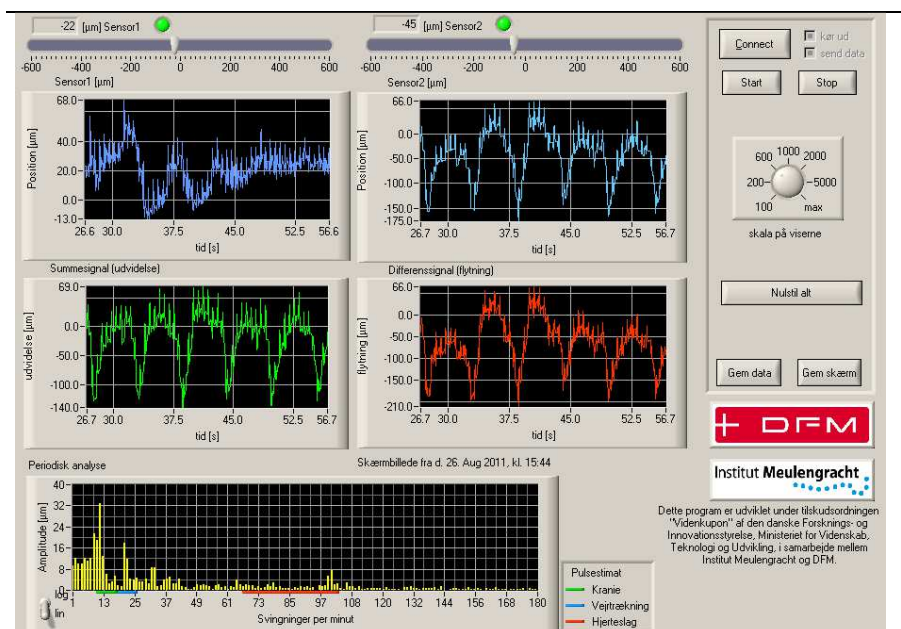
Små svingninger omkring 18x per minut. Lejret uden rullebræt.

Figur 16. Testperson "Kai"



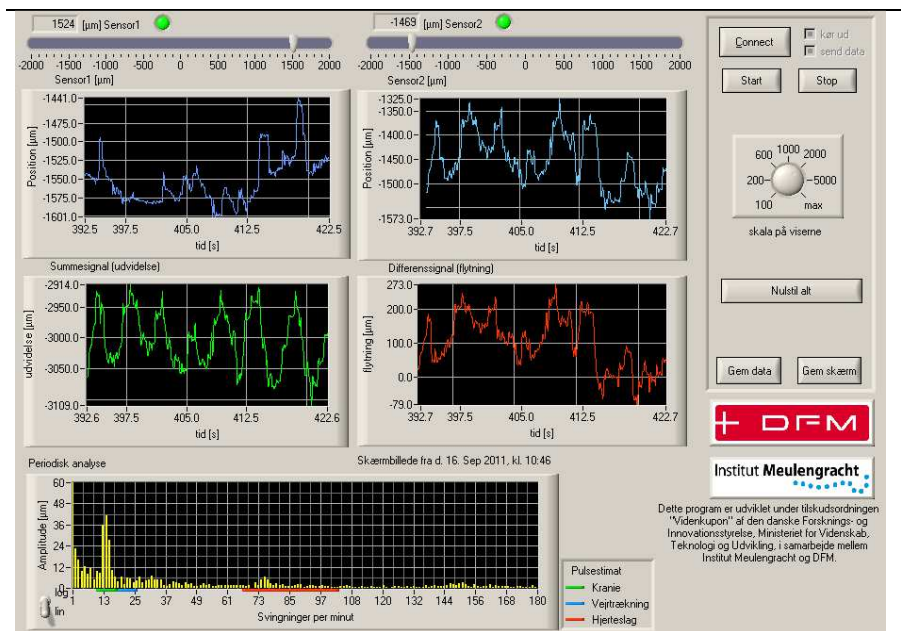
Små svingninger omkring 68x per minut. Bred bidrag af frekvenser mellem 10x og 20x per minut. Lejret med rullebræt.

Figur 17. Testperson "Karl Christian"



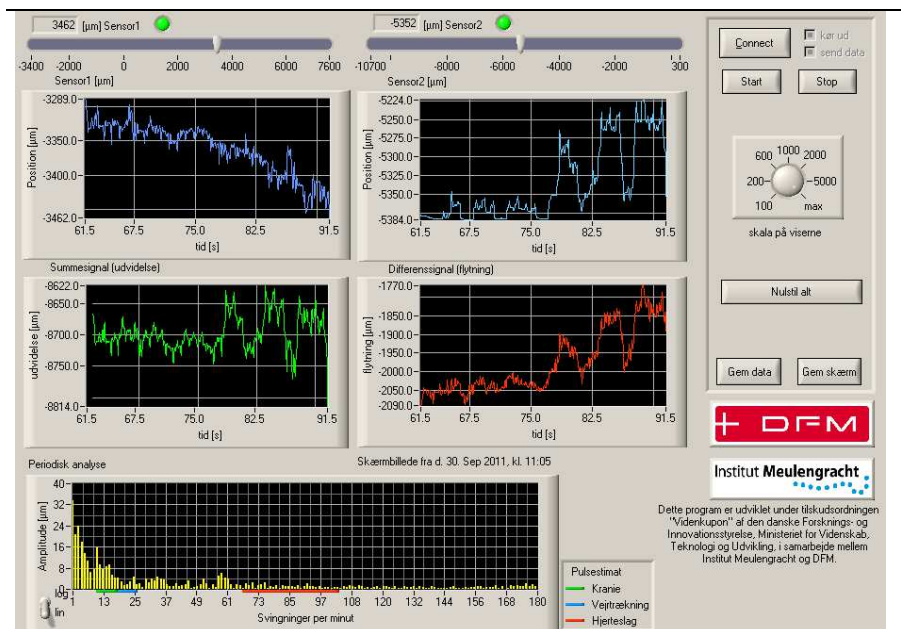
Små svingninger omkring 10x per minut. Desuden svingninger ved 20x og 10x i minuttet. Lejret med rullebræt.

Figur 18. Testperson "Bjørn"



Svingninger ved 15x i minuttet. Lejret med rullebræt.

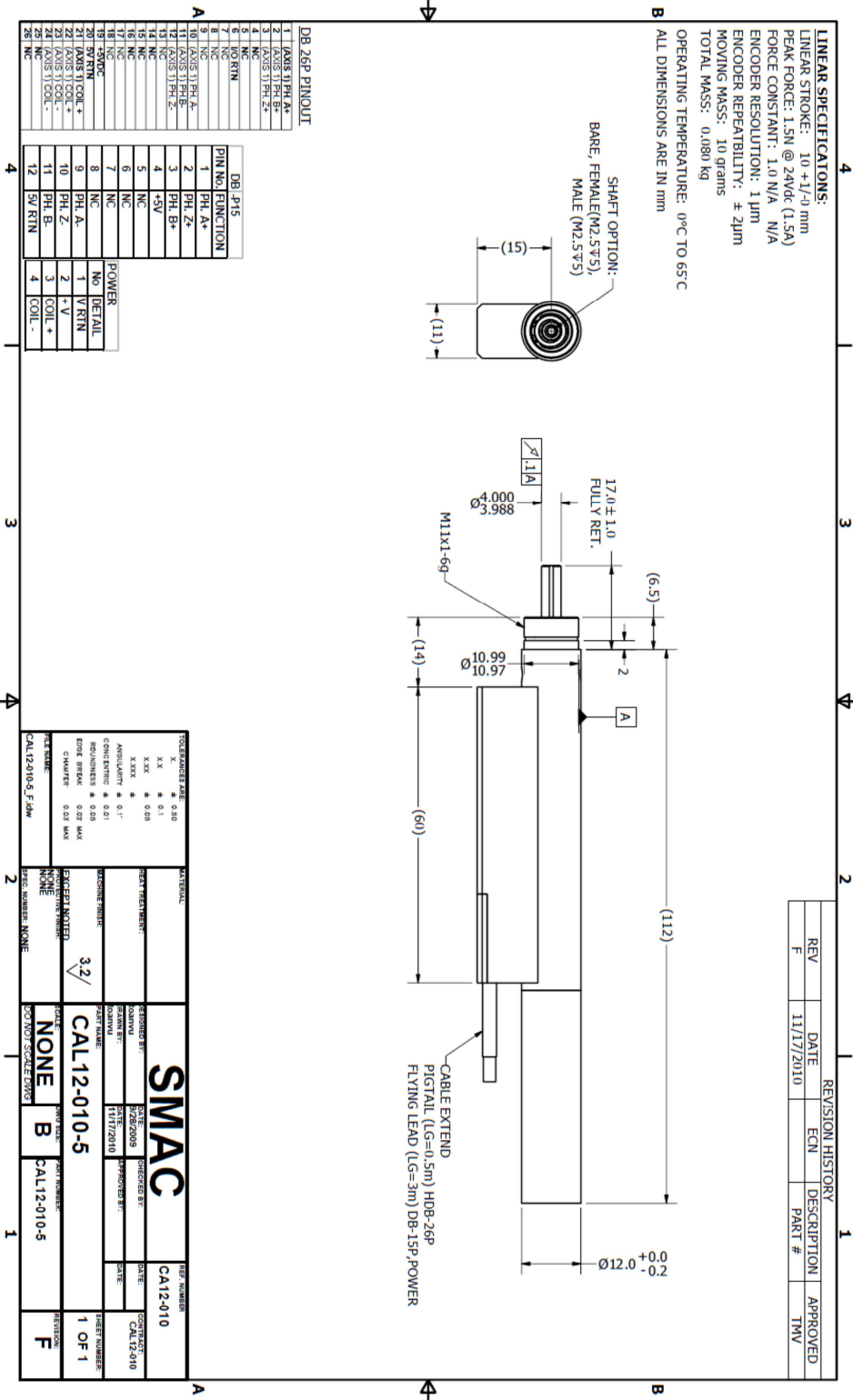
Figur 19. Testperson "Bjørn"



Svingninger ved 10x, 15x og omkring 60x i minuttet. Lejret med rullebræt.

5 Appendix

5.1 Teknisk tegning



5.2 Usikkerhedsbudget aktuatormåling

DFM-GUM ver. 2.1b

Uncertainty Budget: Aktuator measurement over 10000 µm

i	Quantity (unit)	Distribution	x_i	$u(x_i)$	ν_i	c_i	$u_i(y)$	$r(x_i, y)$
1	Wavelength λ_v in µm	Normal	0.63299148	0.00002	infinity	-3.604717	-7.21E-05	-3.25E-05
2	Ref. index n	Normal	1.00027408	8.2E-07	infinity	-9996.645	-0.008197	-0.0037
3	Counts N for max range of 10000 µm	Normal	32354306	0	infinity			
4	Cosine error correction interferometer ($1/2^\circ$) c_0	Normal	0.9999875	2.00E-04	infinity	-9999.51	-1.999902	-0.902668
5	Cosine error aktuator alignment (1°) c_1	Normal	0.9998	1.25E-05	98	-10001.39	-0.125015	-0.056426
6	Repeatability of interferometer δp in µm	Normal	0	0.0005	infinity	1	0.0005	0.0002257
7	Resolution of aktuator δr in µm	Rectangular	0	0.2886751	infinity	1	0.2886751	0.1302953
8	Normalized χ^2 of regression δg in µm	Normal	0	0.9	infinity	1	0.9	0.4062207
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
y		Normal	9999.384812	2.2155446	infinity			

Conf. level =	95.45%	k =	2.0000
Result =	9999.4	U =	4.4

Model: $Y = X_1 * X_3 / (X_2 * 2048 * X_4 * X_5) + X_6 + X_7 + X_8$

From the note related to euramet # 866 Paper doc 1824 we have the possible wavelength as 632.991461 nm and 632.991435 nm with an average of 632.99148 nm and expanded uncertainty of 0.00002 nm in vacuum

$$d = \frac{\lambda_v \cdot N}{2048 n c_0 c_1} + \delta_p + \delta_g + \delta_r$$