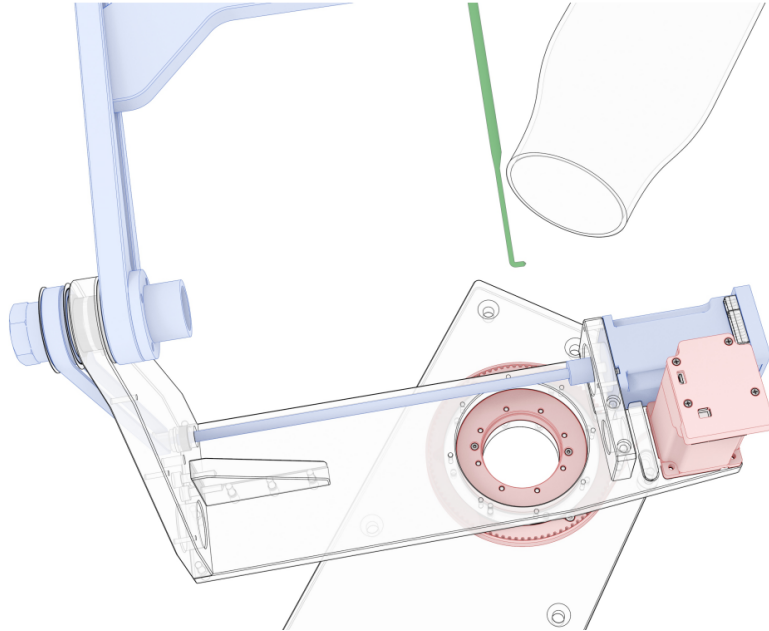




CHALMERS



# Utveckling av precisionstraversing för kalibrering av multi-hole probes

Examensarbete inom Mekatronik

MELVIN SVEDBERG  
ALFRED WIDSJÖN

**INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER**

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2025  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



EXAMENSARBETE I MEKATRONIK

Utveckling av precisionstraversing för  
kalibrering av multi-hole probes

MELVIN SVEDBERG  
ALFRED WIDSJÖN



**CHALMERS**

Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg 2025

Utveckling av precisionstraversing för kalibrering av multi-hole probes  
MELVIN SVEDBERG  
ALFRED WIDSJÖN

© MELVIN SVEDBERG, ALFRED WIDSJÖN, 2025.

Handledare: Isak Jonsson, Forskare, MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

Examinator: Valery Chernoray, Forskningsprofessor, MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

Examensarbete 2025

Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper

Chalmers Tekniska Högskola

SE-412 96 Göteborg

Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Illustration av MHP kalibrator, där de två motorerna med motsvarande axlar är färgade rött och blått, från Figur 2 i [1]

Typsatt i L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X  
Göteborg 2025

Utveckling av precisionstraversing för kalibrering av multi-hole probes  
MELVIN SVEDBERG, ALFRED WIDSJÖN,  
Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper  
Chalmers Tekniska Högskola

## Sammanfattning

Ett problem har identifierats hos de traverseringssystem som används inom Chalmers strömningslaboratorium. De är krångliga, föråldrade samt att det kan vara svårt att hitta reservkomponenter till systemen. Laboratoriet hade genom sin MHP-kalibrator implementerat två stegmotorer av sorten PD4-C från företaget *Nanotec*, för att undersöka dess relevans som en modernare lösning till dessa styrsystem. Genom *Nanotecs* mjukvara *Plug And Drive* genomförs en kalibrering av motorernas styrparametrar för att undersöka dess precision och effektivitet. Resultatet framgår genom stegsvar från positionsändringar samt av vinkelverifikationer med hjälp av bildanalys. Resultatet visar att lösningen har en stor relevans för traverseringssystem och laboratoriumsmiljöer.

Nyckelord: PI, MHP, Stegmotor, Kalibrering, Traverseringssystem, Tryckmätning, Stegrespons



## **Förord**

Detta projekt utgör ett examensarbete om 15 högskolepoäng, som har skett i slutskedet av utbildningen till högskoleingenjör inom Mekatronik, 180 högskolepoäng. Arbetet har utförts vid institutionen för mekanik och maritima vetenskaper.

## **Författarnas tack**

Vi vill först och främst rikta ett tacka vår handledare Isak Jonsson för hans hjälp med arbetet samt hans enorma engagemang. Vi vill även tacka vår examinator Valery Chernoray. Slutligen vill vi även tacka Nanotecs tekniska support för deras hjälp genom svar på alla våra frågor.

Melvin Svedberg och Alfred Widsjön, Göteborg, Maj 2025



# Akronymer ALTERNATIVT Beteckningar

Nedan är listan över akronymer som har använts genom hela denna avhandling listade i alfabetisk ordning:

BLDC	Brushless DC motor
CFD	Computational Fluid Dynamics
FOC	Field-oriented Control
ICD	Intermediate Compressor Duct
LTK	Lågtryckskompressor
MHP	Multi-Hole Probe
PID	Proportional–Integral–Derivative
TRS	Turbine rear structure
UDU	User-defined units



# Innehåll

<b>Akronymer</b>	<b>ix</b>
<b>Figurer</b>	<b>xiii</b>
<b>Tabeller</b>	<b>xv</b>
<b>1 Inledning</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrund . . . . .	1
1.1.1 Begränsningar av Mikrostepping . . . . .	5
1.1.2 MHP . . . . .	6
1.2 Syfte . . . . .	6
1.3 Mål . . . . .	6
1.4 Avgränsningar . . . . .	7
<b>2 Teori</b>	<b>9</b>
2.1 PD4-C stegmotor . . . . .	9
<b>3 Metod</b>	<b>11</b>
3.1 Kalibrering av PD4-C motorer . . . . .	11
3.2 Integrering av PD4-C in i MHP kalibrator . . . . .	12
3.3 Positionsupplösningens begränsning vid mätning med encoder . . . . .	13
3.4 Tester och analys . . . . .	14
3.4.1 Taylorserie . . . . .	14
3.5 Undersökning av effekt av vinkelupplösning i Chalmers LPC test anläggning . . . . .	15
<b>4 Resultat</b>	<b>17</b>
4.1 Kalibrering av enskild motor . . . . .	17
4.2 Kalibrering av vertikal motor . . . . .	18
4.3 Kalibrering av horisontell motor . . . . .	20
4.4 Resultat: Inverkan av vinkelavvikelse . . . . .	22
4.5 Vinkelverifiering med bildanalys . . . . .	23
<b>5 Slutsatser</b>	<b>25</b>
5.1 Analys av Stegsvär . . . . .	25
5.2 Analys av vinkelverifiering . . . . .	26
5.3 Slutsats . . . . .	26

5.4 Förslag på framtida arbeten . . . . .	27
<b>Litteraturförteckning</b>	<b>29</b>

# Figurer

1.1	Schematisk illustration av traverseringssystem i lågtryckskompressorn (LTK) . . . . .	1
1.2	Undersökning av upplösning vid traversering av prober i LTK . . . . .	2
1.3	Illustration av Nanotecs PD4-C Stegmotor med integrerad kontroll	3
1.4	Illustration av skillnaden vid inkoppling av flera motorer med två olika styrsystem. . . . .	3
1.5	Jämförelse mellan teoretisk och praktisk vinkelupplösning . . . . .	5
1.6	Portindex och koordinatsystem för en femhålig prob . . . . .	6
2.1	Blockdiagram över Nanotecs motorstyrningssystem . . . . .	9
3.1	Illustration av MHP kalibrator . . . . .	13
4.1	Stegsvar och felvärde med fabriksinställda PI-parametrar . . . . .	17
4.2	Stegsvar och felvärde före och efter PI-kalibrering för motorns vertikala axel . . . . .	19
4.3	Stegsvar och felvärde före och efter PI-kalibrering för motorns horisontella axel . . . . .	21
4.4	Exempel på traverseringsplan vid utlopp . . . . .	22
4.5	Midspanprofilens känslighet för vinkelavvikelse jämfört med CFD-referens. . . . .	23
4.6	Sammanställning av tre axelpositioner (0, 3333, 6666) med tillhörande vinkelmätning, utförd i GeoGebra. . . . .	24



# Tabeller

3.1	Register och motsvarande adresser som användes i oscilloskopet . . . .	12
4.1	Motorinställningar för den vertikala motor . . . . .	18
4.2	Motorinställningar för den horisontella motorn . . . . .	20
4.3	Påverkan av vinkelavvikelser på läsning av totaltryck, up till $\pm 0.2$ . .	23
4.4	Uppmätta vinklar, medelvärde, förväntad vinkel och avvikelse . . . .	24

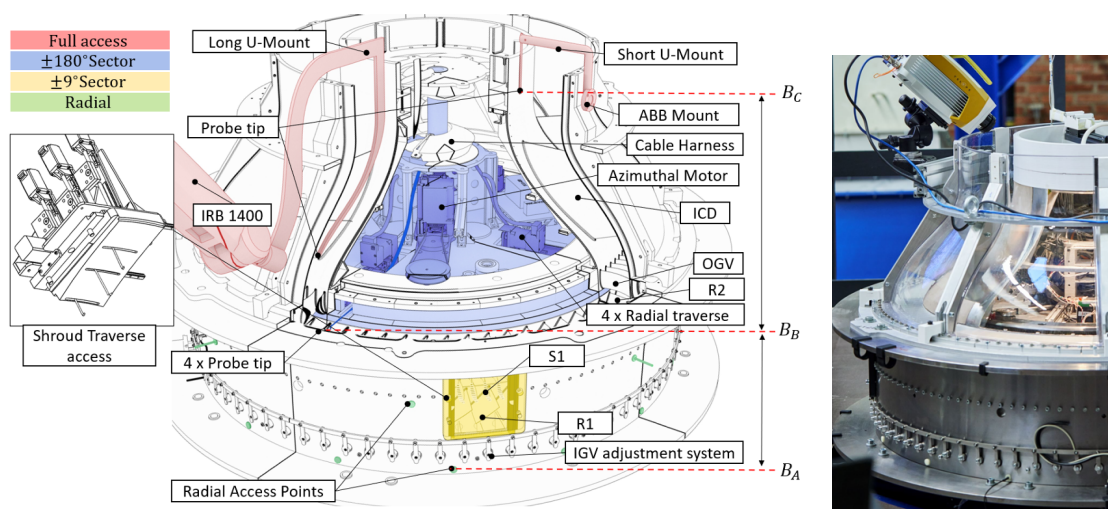


# 1

## Inledning

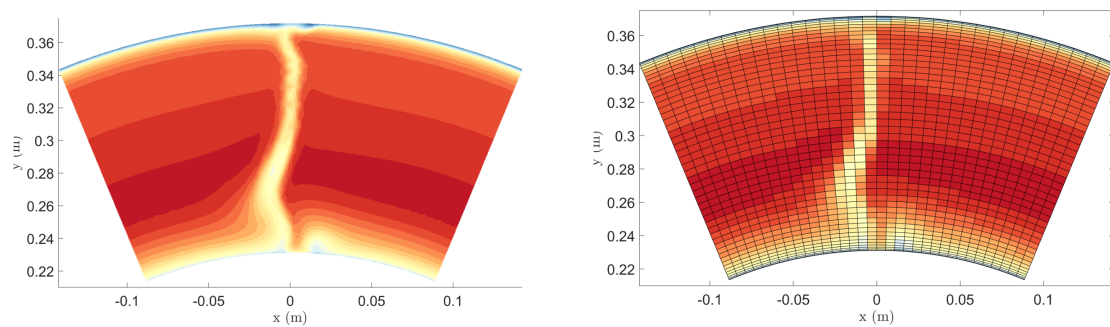
### 1.1 Bakgrund

Chalmers strömningslaboratorium omfattar ett laboratorium med resurser för ledande forskning inom strömningslära och värmeöverföring [2]. Laboratoriet stödjer en bred grupp av forskningsområden med omfattande resurser bestående av både kunskap och specialiserad utrustning. En kritisk komponent i flera av dessa studier är möjligheten att föra prober i fluider för att mäta exempelvis tryckfördelning, flödesvinklar och temperaturprofiler. Ett exempel på hur prober och positioneringssystem används i laboratoriet är i lågtryckskompressorn (LTK) vars traverseringssystem är illustrerat i Figur 1.1. Det blåmarkerade området i figuren kan rotera  $\pm 180$  grader och i denna finns 5 stycken radiella traversenheter monterade. Vidare finns det även tre stycken radiella traversenheter monterade i ett fönster med en ytterligare motor som kan placeras över det gulmarkerade området i bilden. Tidigare användes en ABB robot för att traversera, men denna är inte längre i bruk. Samtliga av dessa traversenheter håller en prob i ändan för att undersöka flödet i anläggningen.



**Figur 1.1:** Schematisk illustration av traverseringssystemet i lågtryckskompressorn (LTK) i strömningslaboratoriet till vänster, bild från Figur 4.7 i [3] och en bild från anläggningen till höger.

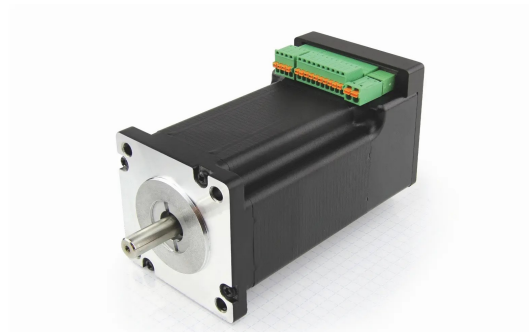
Experimentell fluiddynamik är i hög grad beroende av noggrann positionering av sensorer, då även små positioneringsfel kan leda till stor osäkerhet i insamlad data. Detta gäller särskilt i områden med höga gradienter som gränsskikt eller vakar där avvikelser på bråkdelar av en millimeter kan resultera i stora felaktiga tolkningar. Ett exempel från lågtryckskompressorn (LTK) [4] så krävs det ofta upp emot 2000 mätpunkter för att nå upp till mindre än 0.1% felmarginal. Detta illustreras först i Figur 1.2 där det förväntade flödesfältet visas till vänster och ett exempel på hur fältet traverseras till höger. Varje tangentiell och radiell skärningspunkt av linjerna är en mätpunkt.



**Figur 1.2:** Undersökning av effekt av upplösning vid traversering av pneumatiska och temperaturprober i LTK. Till vänster en bild på flödesfältet och till höger en bild på hur man planerar på diskretisera fältet genom att traversera en prob, från Figur 8 i [4]

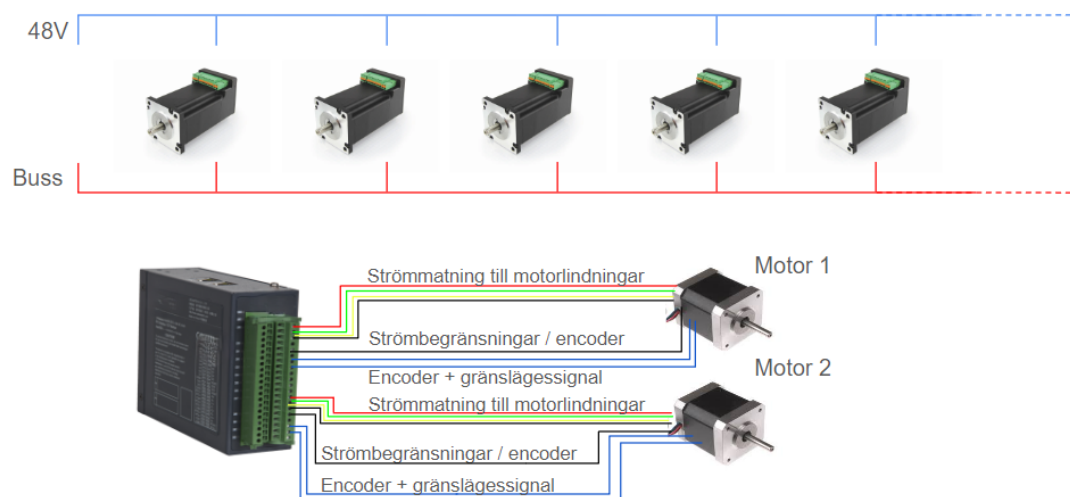
Förutom noggrannhet är även tidsaspekten kritisk. I många experiment utgör traverseringstiden upp till 30% av den totala testtiden, där fördröjningen orsakas av att proben förflyttas till mätpunkten. Eftersom många testriggar har begränsad tillgångstid eller är kostsamma att köra, har detta en direkt inverkan på kapaciteten och ekonomin. Till exempel i Purdue Universitet finns en trycksatt kammare som håller för några minuters utvärdering, [5].

Standardlösningen i laboratoriet har under lång tid varit stegmotorer som drivs med mikrostepping i styrning open-loop-läge, ofta med homingswitchar eller med återkoppling, closed-loop-feedback. I strömningslaboratoriet på Chalmers är många styrda via National Instruments PCI-7344 i kombination med en MID-7604-drivare. Dessa är beprövade men numera åldrade system där delar går sönder och reservdelar är svåra att få tag på.



**Figur 1.3:** Illustration av Nanotecs PD4-C Stepmotor med integrerad kontroll

Nyligen har nya lösningar introduceras i laboratoriet, såsom Nanotecs integrerade stegmotorkontroller med Field-Oriented Control (FOC). Dessa använder en inbyggd positionssensor (optisk encoder) och reglerar momentet på ett sätt som påminner mer om servosystem än traditionella stegmotorer. Dessutom förenklas kabeldragning och integration då varje motor endast kräver matningsspänning och fältbuss där hundratals motorer kan kopplas i serie. Detta är i motsats till de långa separata kablar för både kraft och encoders som krävs vid de mer traditionella systemen med ett max antal inkopplade motorer.



**Figur 1.4:** Illustration av skillnaden vid inkoppling av flera motorer med två olika styrsystem.

Ett exempel där det existerande systemet med en fyrkanalig stegmotorskontroller (MID-7604) är ytterst begränsat är i TRS-anläggningen, beskriven i [4] och i [6]. Där fanns ett behov av fem motorer men endast fyra kanaler var tillgängliga. En kanal delades mellan två motorer genom ett fyrkanalsrelä och omfattande kodning. En lösning som var både opraktisk och potentiellt felbenägen.

Nanotecs lösning med integrerade motorcontroller föredrogs därför i en senare konstruerad anläggning för lågtyckskompressor beskriven i [4]. I denna anläggning användes upp till 8 motorer samtidigt och motorerna är integrerade med skruvar eller enkel utväxling med relativt högt tröghetsmoment mot vridmotstånd.

Dessa motorer var även integrerade i andra anläggningar i laboratoriet så som probkalibratoren. Probkalibratoren i fråga är konstruerad för att möjliggöra kalibrering av flödesvinklar och tryck på stationära prober genom att med hög precision rotera och förflytta dem i ett känt flöde. Denna anläggning beskrivs mer detaljerat senare i arbetet.

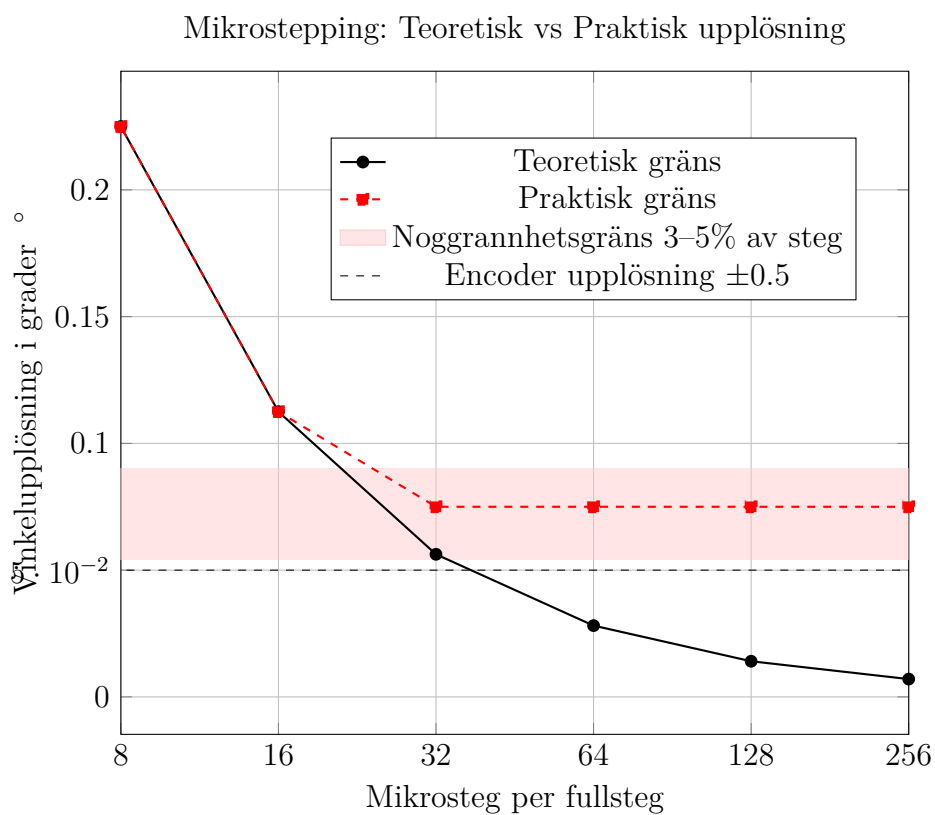
Med kalibrator var injusteringen av FOC mycket mer utmanande då lasten varierar beroende på position och tidigare version hade väldigt högt rörelsemoment men nästan ingen vridmoment. Ett problem i probkalibrator var när tunga prober monterades långt ut på en lång arm och instabilitet noterades. Trots att FOC-systemet försöker kompensera för belastningsvariationer krävs viss inpassning och inställning av regulatorns parametrar.

När en stor prob monteras med långt överhäng skapas ett stort tröghetsmoment och potentiellt svängande rörelser, vilket kan utmana reglermotorers förmåga att exakt följa positioneringskommandon. Detta belyser vikten av både mekanisk konstruktion och lämplig reglerdesign vid val av traverseringslösning.

Detta arbete ämnar att stödja laboratoriets integrering av högprecisionssystem i anläggningen. Då det finns ett uttalat behov i probkalibratoren inleds projektet där. Problem och potentiella förbättringar som identifieras i detta arbete förväntas sedan implementeras i övriga anläggningar.

### 1.1.1 Begränsningar av Mikrostepping

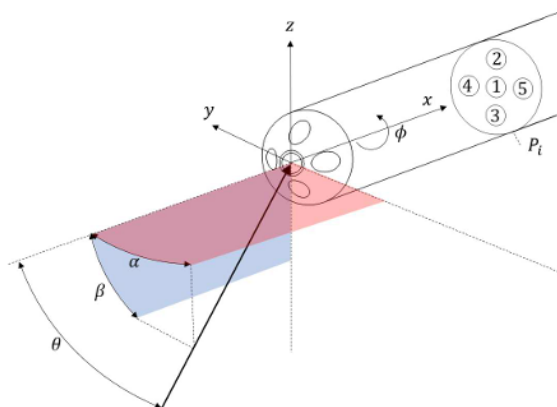
En typisk stegmotor har ett grundsteg på  $1.8^\circ$ , vilket med  $1/16$  mikrostepping ger en teoretisk upplösning på  $0.1125^\circ$ . Mikrostepping ger en smidigare rörelse och minskar vibrationer, det ökar nödvändigtvis inte den faktiska positioneringsnoggrannheten i ett öppet system. Enligt både Mouser [7] och Oriental Motor [8] ligger den praktiska noggrannhetsgränsen ofta kring  $1/16$  till  $1/32$  mikrostepping, vilket motsvarar 3-5% av ett steg. Detta innebär att även om styrelektroniken tillåter  $1/256$  mikrostepping kan det i vissa lägen inte ge en förbättring i den faktiskt uppnådda positionen, utan endast en mjukare rörelse. En illustration som visar de praktiska begränsningarna, enligt [8] och enligt [7] presenteras i Figur 1.5.



**Figur 1.5:** Jämförelse mellan teoretisk och praktisk vinkelupplösning vid mikrostepping enligt [8, 7]. Utan återkoppling uppnås ingen förbättrad praktisk noggrannhet bortom  $1/32$  mikrostep.

### 1.1.2 MHP

MHP (Multi-Hole Probe) syftar på prober med flera hål. En typisk femhålig prob illustreras i figur 1.6, där portnumrering och tillhörande koordinatsystem framgår.



**Figur 1.6:** Portindex samt koordinatsystem för en femhålig prob, bild från figur 3.4 i [3]

Formen och antalet hål varierar beroende på vilken prob som används, men de vanligaste varianterna är med 5 respektive 7 hål och har antingen sfärisk eller semisfärisk spets [4]. När proben vinklas i flödet kommer ytan på den sida som möter flödet att registrera ett stagnationstryck, medan ytan på sidan som är bortvänd från flödet registrerar ett lägre tryck. Genom att mäta trycket i alla hålen kan flödets vinkel, dynamiska tryck och totala tryck bestämmas.

## 1.2 Syfte

Utifrån de problem som identifierats i bakgrunden syftar detta arbete till att stödja laboratoriets integrering av stegmotorer med FOC. Syftet är att genom en kalibrering av de två motorer som används i probkalibratoren, identifiera problem och potentiella förbättringar i denna nya styrmetod. Det nuvarande systemet uppvisar avvikelser i precision och är tidskrävande och arbetsintensivt.

Arbetet syftar därför till att genom analys av det ursprungliga systemet, undersöka och kalibrera styrsystemet för att skapa ett mer exakt och effektivt system. Arbetet har som syfte att uppnå en minskad experimenttid, högre precision och förbättrad användbarheten.

## 1.3 Mål

Målet med detta arbete är att adressera problemen som påvisades i [4] genom optimering och kalibrering av dess traverseringssystem för ökad hastighet och precision.

Ett delmål är att implementera en kalibreringsmetod som möjliggör för mer exakta rörelser. Ett ytterligare delmål är att effektivisera traverseringsprocessen för att minimera experimenttider och öka användarvänligheten.

Arbetet ska nå upp till följande delmål:

- 150% snabbare system
- 98% ökad precision

## 1.4 Avgränsningar

Det slutgiltiga målet är att fler traverseringssystem i strömningslaboratoriet ska förbättras enligt de problem som tidigare tagits upp. Denna rapport kommer endast fokusera på traverseringssystemet för kalibrering av multi-hole probes. Lösningen som levereras ska kunna användas som ett exempel på hur övriga system i strömningslaboratoriet kan kalibreras.

Detta arbete kommer endast adressera och använda utrustning som finns i strömningslaboratoriet. Ingen övrig utrustning kommer att införskaffas.



# 2

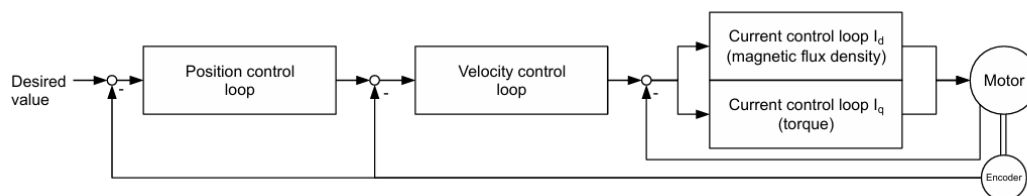
## Teori

### 2.1 PD4-C stegmotor

Motorn som användes i denna rapport var av typen **PD4-C6018L4204-E-01** från företaget **Nanotec**. PD4-C-serien är borstlösa stegmotorer med integrerad encoder och använder styrningsalgoritmen *Field-oriented Control*. Med hjälp av den inbyggda encodern och FOC-algoritmen kan PD4-C motorer köras som ett slutet styrsystem där motorn kontinuerligt övervakar position och justerar strömmen till motorlindningarna i realtid. Detta möjliggör mjukare rörelser, effektivare drift samt eliminerar sannolikheten för stegförlust, ett vanligt problem för traditionella stegmotorer.

Field-oriented Control (FOC) är en styrmetod som används för att driva både BLDC-servomotorer och stegmotorer med hög precision och effektivitet. FOC används i Nanotecs PD4-C stegmotorer i kombination med den inbyggda encodern för att kombinera positiva egenskaper från både stegmotorer samt servomotorer. FOC möjliggör nästintill ljudlös och vibrationsfri rörelse även vid låga hastigheter, hög linjäritet i moment-vinkel-förhållandet, samt låg energiförbrukning eftersom ström endast dras vid behov. Tack vare återkopplingen elimineras risken för tappade steg, och systemet anpassar sig automatiskt till variationer i lasten. Jämfört med traditionell mikrostepping ger detta:

- Nästintill ljudlös och mjuk rörelse, särskilt vid låga hastigheter.
- Högre positionsnoggrannhet och jämnare momentleverans.
- Lägre energiförbrukning.
- Ingen risk för tappade steg vid höga laster.
- Bättre beteende vid högt tröghetsmoment eller varierande laster.



**Figur 2.1:** Blockdiagram över Nanotecs motorstyrningssystem med tre kaskadkopplade återkopplingslingor [9]

Kalibreringen av stegmotorn sker genom PI-reglering. Figur 2.1 illustrerar systemets kaskadkopplade återkopplingsloop.

Positionsslingan är den yttersta loopen och styr direkt motoraxelns position. Den tar emot ett önskat positionsvärde och jämför detta med den faktiska positionen som registreras av den interna encodern. Om det finns en skillnad, alltså ett positionsfel, skickar slingan en signal till hastighetsslingan för att justera motorhastigheten. Här säkerställs att motorn rör sig med rätt hastighet för att nå den begärda positionen. Den innersta slingan är strömregleringsslingan som består av två delar, en för magnetflödestäthet och en för vridmoment. Dessa slingor styr direkt strömmen till motorn genom att kontinuerligt justera strömmen så att de elektriska och magnetiska förhållanden är optimala. Encodern i systemet fungerar som en sensor som mäter den faktiska positionen och hastigheten på motoraxeln. Den skickar kontinuerligt informationen tillbaka till styrsystemet och möjliggör återkoppling.

PI-reglering används i alla slingor för att styra respektive variabel genom en proportionell och en integrerande komponent. Den proportionella delen reagerar direkt på felet, medan den integrerande delen hanterar kvarstående fel över tid (steady-state-fel).

I positionsslingan syftar regleringen till att snabbt och exakt nå det begärda läget. I hastighetsslingan styr PI-regulatorn motorhastigheten så att den följer referenssignalen från positionsregleringen. För  $I_d$ -slingan säkerställer PI-regulatorn ett stabilt magnetfält i motorn, medan  $I_q$ -slingan styr momentet som krävs för att möta belastningen.

# 3

## Metod

Utvärderingen av moderna Nanotecs PD4-C för användning i laboratoriet utfördes genom att först utvärdera individuella och olastade motorer, innan och efter parameterjustering, för att minska fel mellan begärd och faktiskt position och maximera hastighet. Två justerade motorer kopplas sedan in på ett lastat system, vilket för detta arbete är en MHP kalibrator. Kalibratoren har två axlar, där den vertikala axeln har ojämn last och den horisontella axeln har axelsymmetrisk last. En finjustering av parametrarna tillämpas med samma mål som vid individuella parameterjustering. Effekterna av förbättringarna av dessa justeringar vägs mot slutresultatet på en Kalibrering via Monte Carlo simuleringar och Taylor expansioner.

### 3.1 Kalibrering av PD4-C motorer

På grund av systemets begränsade kalibrering innan arbetet är motorn kraftigt begränsad vad gäller hastighet och moment. Därför nollställdes motorn till fabriksinställningar för att säkerställa att dess egenskaper och kapacitet kunde kalibreras på ett korrekt sätt.

För att underlätta kalibreringen av motorn användes programvaran **Plug and Drive** som är utvecklat av **Nanotec**, det vill säga samma företag som producerar motorerna. Programmet erbjuder lättillgänglig kalibrering av PI-parametrar samt realtidsövervakning av motorns prestanda. Programmet erbjuder även funktionen *Auto-tune*. Funktionen kör motorn ett antal varv och justerar parametrar utifrån varvet. Detta kunde inte användas i det fullständiga systemet då motorerna inte kan snurra ett helt varv fritt, men användes vid analysen av den enskilda motorn.

Initialt användes version 1 av Plug and Drive, men efter rekommendation från Nanotecs tekniska support uppgraderades systemet till version 3. Den nyare versionen möjliggjorde justering av koefficienten för användardefinierade enheter, vilket i sin tur ledde till en förbättrad upplösning i motorns respons. I samband med uppdateringen infördes även vissa nya registerinställningar. Bland annat ersattes register *321Ah* till och med *321Eh* med nya proportionella och integrerande komponenter till för de olika kontrollerna. Varje kontroll bestod nu av en proportionell komponent med en förstärkningsfaktor  $K_p$  och en integrerande komponent med en tidskonstant  $T_i$ . Då arbetet hittills genomförts med de klassiska proportionella (P) och integrerande (I) parametrar som fanns i register *3210h*, krävdes en återgång för att fortsätta arbetet på samma sätt. Bit *04h* i register *3212h* sattes från värdet 1 till 0, vilket ändrade tillbaka till att de äldre parametrarna styrde motorns agerande.

Kalibreringen av motorparametrarna genomfördes enligt Nanotecs Quick Start Gui-

de och dess föreslagna strategier [9]. Guiden beskriver en kaskadreglerstruktur, vilket även beskrivs i kapitel 2, och rekommenderar att kalibreringen utförs inifrån och ut. Därför inleddes kalibreringen med den innersta kretsen, där parametrar för **Flux current loop** ( $I_d$ ) och **Torque current loop** ( $I_q$ ) justerades. Då kalibreringen av dessa två PI-kontroller uppnått en stabil och effektiv reglering av strömmen, fortsatte processen med att kalibrera **Velocity control loop** och dess parametrar, följt av **Position Control Loop**.

För verifieringen av kalibreringens påverkan gjordes mätningar av motorernas stegsvar till en positionsbegäran. Plug and Drives inbyggda Oscilloskop användes för att utföra dessa mätningar. Funktionen tillåter att enkelt ändra de register som ska mätas samt har ett simpelt användargränssnitt för start- och sluttid för mätningar. Funktionen tillåter även uppdelningen i flera grafer, vilket i detta arbete användes för att dela upp register som påverkades av de olika kontrollkretsar. De register som användes i mätningar under detta arbete återfinns i tabell 3.1.

**Tabell 3.1:** Register och motsvarande adresser som användes i oscilloskopet

Registertitel	Register
Following error actual value	60F4:00
Position actual value	6064:00
Position demand value	6062:00
Velocity actual value	606C:00
Velocity demand value	606B:00
Torque actual value	6077:00
Actual current	2039:05
Id	2039:01
Iq	2039:02

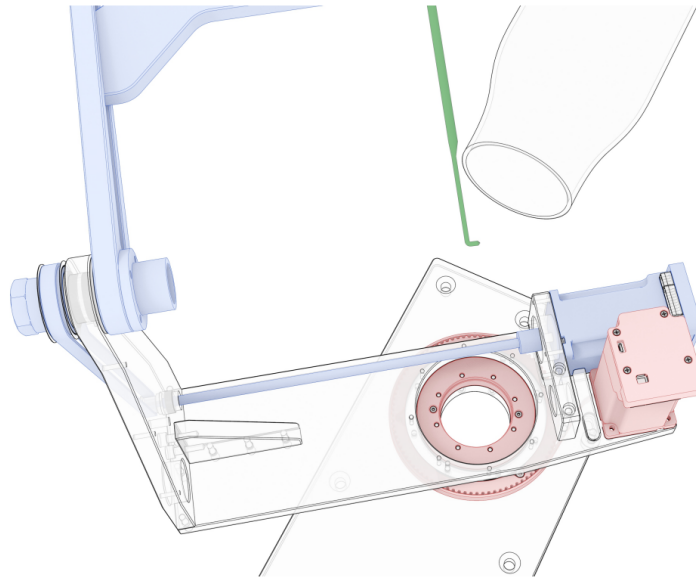
Även om alla nio register användes under kalibreringen, används endast tre av dem för att jämföra resultatet. Detta är då dessa tre enklast visar upp de mål som satts med detta arbete. De tre register är **60F4:00**, **6064:00** och **6062:00**.

## 3.2 Integrering av PD4-C in i MHP kalibrator

Det system som användes för att testa PD4-motorerna i labbet var en kalibrator av MHP. Enligt [1] drivs kalibratoren av centrifugalfläkt som genererar ett luftflöde med en diameter på  $60mm$  och med hastigheter upp till  $80m/s$ . I detta luftflöde förs en MHP för att ta mätningar. Traverseringen av proben utförs av två av Nanotecs PD4-C motorer. Enligt [1] består systemet av Nanotecs PD2-C servomotorer, men dessa har vid ett senare tillfälle byt ut mot PD4-C motorer.

En av dessa motorer används för att rotera hela plattformen via en T5 tandrem på en  $200mm$  glidring. Denna motor kommer att kallas för och refereras till som den vertikala motorn i denna rapport. Den andra motorn driver den arm där proberna fästs, genom en  $10mm$  tandrem. Denna motor kommer att refereras som den horisontella axeln. Hela systemet illustreras i figur 3.1.

I figuren illustrerar den vertikala motorn i rött och den horisontella motorn i blått.



**Figur 3.1:** Illustration av MHP kalibrator, där de två motorerna med motsvarande axlar är färgade rött och blått, från Figur 2 i [1].

Då de två motorerna upplever kraftigt olika vridmoment, krävs separata kalibreringar av de motorerna. Den horisontella motor upplever betydligt högre och variabelt vridmoment beroende på MHPs vikt samt placering.

I Plug And Drive sattes en position för varje motor till 0, som fungerade som en utgångspunkt för all vidare positionering. För den vertikala motorn sattes referenspunkten till den position där plattformen är parallell med luftflödet, medan den horisontella motorn referenspunkt sattes till den position där armen är vertikalt riktad uppåt.

För att styra det fullständiga systemet används programvaran **LabVIEW**. Arbetet utgick från den befintliga programmering.

### 3.3 Positionsupplösningens begränsning vid mätning med encoder

Vid positionsmätning med en inkrementell encoder uppstår en osäkerhet som beror på encoderns begränsade upplösning. Encodern delar upp ett varv i ett bestämt antal diskreta positioner, exempelvis i fallet med PD4-C motorer 4096 steg. I motor-systemet kan dock positionen anges med en finare, användardefinierad upplösning (UDU), till exempel 10000 steg per varv.

Eftersom encodern endast kan särskilja 4096 lägen per varv, motsvarar varje encodersteg

$$\frac{10\,000}{4096} \approx 2.44 \text{ UDU.}$$

Den faktiska positionen kan befinna sig var som helst inom detta intervall, men encodern rapporterar endast det närmaste diskreta läget. Det innebär att det uppstår en mätosäkerhet som i praktiken innebär en maximal avvikelse på

$$\pm \frac{1}{2} \cdot 2.44 = \pm 1.22 \text{ UDU.}$$

Eftersom ett helt varv ( $360^\circ$ ) motsvarar 10 000 UDU, innebär detta att:

$$\pm 1.22 \text{ UDU} \times \frac{360^\circ}{10\,000} = \pm 0.04392^\circ.$$

Den osäkerhet som uppstår till följd av encoderns upplösning motsvarar alltså en vinkelmässig avvikelse på cirka  **$\pm 0.044$  grader**.

På grund av denna begränsning genomfördes ytterligare verifieringar av positionsprecisionen på styrsystemet. En kamera placerades i höjd med den horisontella axeln. Vidare togs bilder vid tre definierade positioner: 0, 3333 och 6666. Detta gjordes vid tre försök för att undvika störningar. Utifrån dessa bilder kan vinklar mellan de olika positionerna beräknas för att senare jämföra den uppmätta rörelsen med den förväntade. I denna rapport genomfördes vinkelberäkningarna genom hemsidan *Geogebra*.

Efter bildtagningen sammanställdes varje bilds tre positioner till en överlagrad bild, vilket möjliggjorde vinkelmätning med hjälp av GeoGebra. Där markerades armens riktning i varje läge och vinklarna mellan dem beräknades geometriskt.

## 3.4 Tester och analys

Flertalet tester genomförs under arbetets gång.

Resultatet av arbetet utvärderades genom en jämförelse av stegresponsen mellan det ursprungliga och det kalibrerande systemet, samt med stöd av Taylorserien.

### 3.4.1 Taylorserie

Effekten av förbättring av precisionen i traverseringsystem kommer med hjälp av handledare utvärderas främst via Taylor Expansions Eq.

$$\varepsilon_{\zeta,TS}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \left\{ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} \cdot \delta x_i \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (3.1)$$

### 3.5 Undersökning av effekt av vinkelupplösning i Chalmers LPC test anläggning

Chalmers LPC test anläggning har en tangentiell traverser med en Nanotec PDx motor med en utväxling på 1:31 till probens position.

För att kvantitativt undersöka hur ett litet vinkelmättningsfel påverkar uppmätt tryckprofil genomfördes en simulering baserat på CFD-data från ICD-utloppet på samma sätt som i [4]. Den tangentiella positionen, mätt i grader, är särskilt känslig i regioner med branta gradienter och totaltrycket valdes för närmare undersökningen. För att förenkla arbetet valdes mittlinjen (d.v.s. radien mitt mellan hub och shroud) ut som en referensprofil för detaljerad analys.

Som referens så användes CFD-data  $P_{t,CFD}(\theta, r)$ . Ett representativt traversering genererades, vilket visas i Figur 4.4. Därefter applicerades effekten av vinkelfel på motor från  $0.05^\circ$  till  $0.2^\circ$  och projekterades på mittlinjen som om utväxlingen var perfekt. Effekterna på totaltryck extraherades och jämfördes med CFD data.



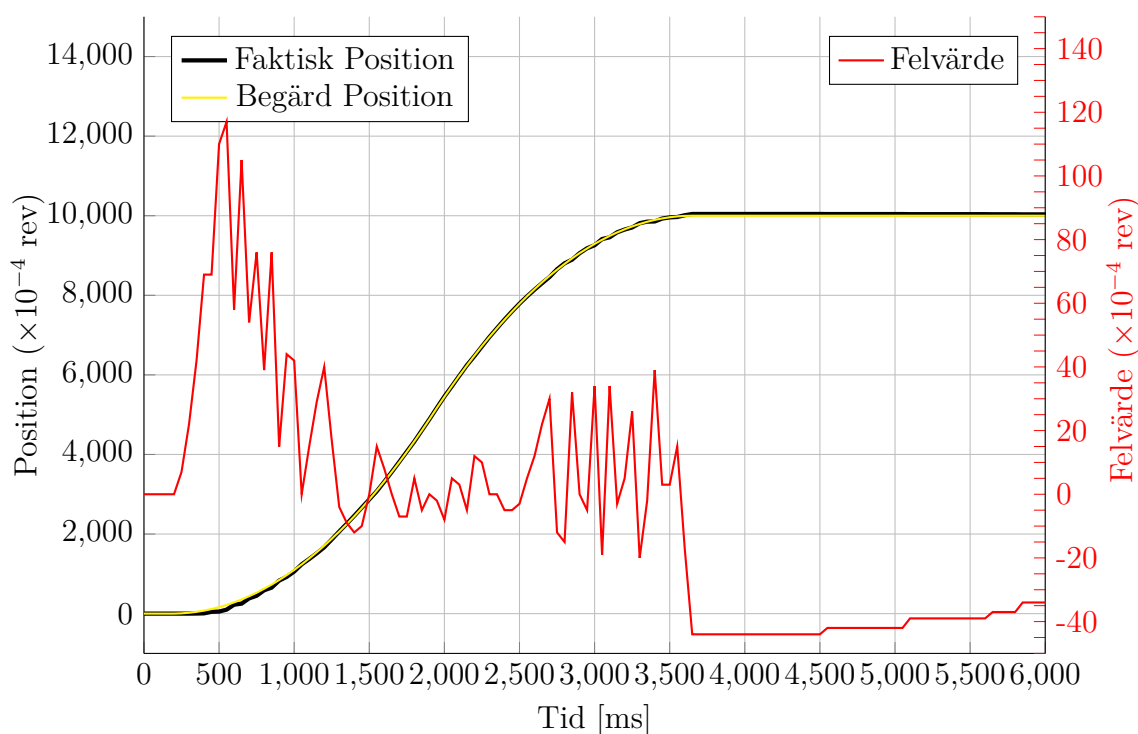
# 4

## Resultat

Kapitel presenterar resultatet av det genomförda arbetet. Resultatet består av mätdata och tillhörande grafer, samt de slutgiltiga parametrarna för de två motorerna. Detta kapitel tar upp

### 4.1 Kalibrering av enskild motor

Följande figur 4.1 visar hur en enskild motor av typ PD4-C presterar med de parametrar som är fabriksinställda. Dessa parametrar tas fram genom Plug and drive inbyggda funktion *Auto-setup*. Mätningen genomfördes utan yttre last.



**Figur 4.1:** Stegsvär och felvärde med fabriksinställda PI-parametrar

Figuren 4.1 visar en positionsförändring från position 0 till 10 000, vilket motsvarar ett varv av motorn. I figuren visas genom den röda kurvan, som representerar felvärdet, hur motorn med fabriksinställda parametrar får ett kvarstående fel på över  $30 \times 10^{-4}$  revolutioner. Detta motsvarar cirka  $1.08^\circ$ .

## 4.2 Kalibrering av vertikal motor

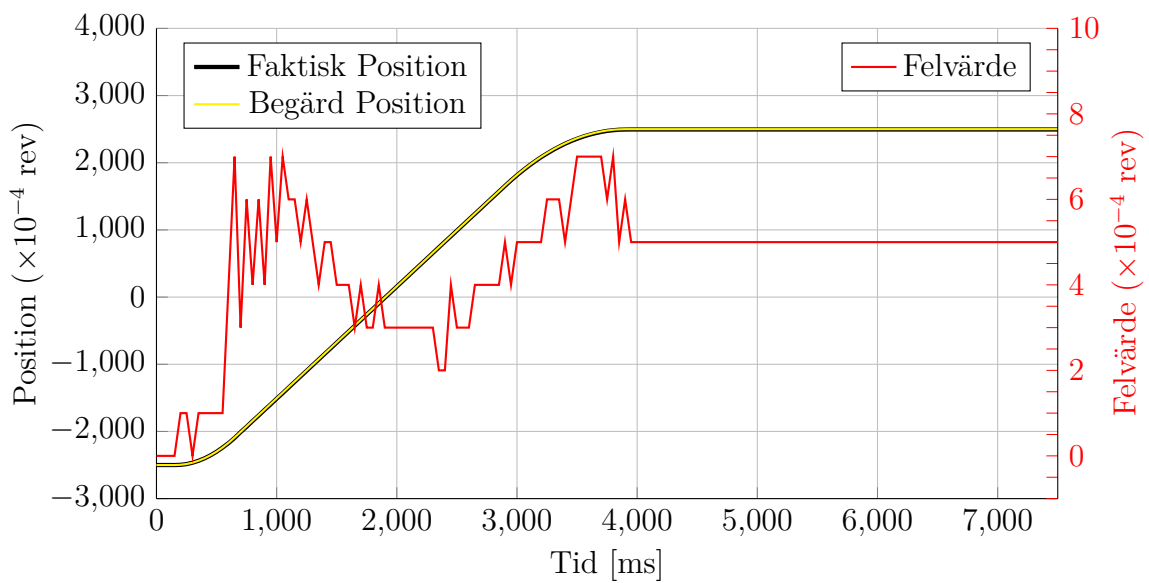
Tester av motorn kopplad till den vertikala axeln gjordes genom en rörelse från position  $-2500$  till  $2500$ . Detta representerar en rörelse på  $180^\circ$  enligt de användardefinierade enheterna på **Plug and Drive**. De parametrar som användes visas i tabell 4.1, med en kolumn för de ursprungliga värdena och en för de kalibrerade.

**Tabell 4.1:** Motorinställningar för den vertikala motor

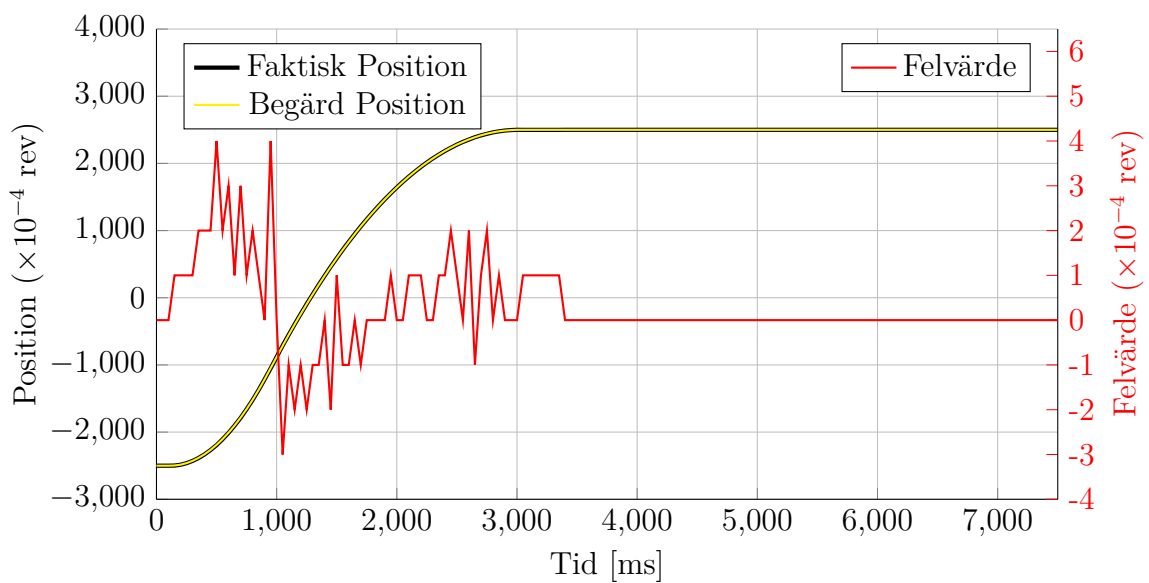
Motor parametrar för vertikala motorn	Innan kalibrering	Efter kalibrering
Position loop, Proportional Gain (P)	130000	120000
Position loop, Integral Gain (I)	3	6
Velocity loop, Proportional Gain (P)	2000	2500
Velocity loop, Integral Gain (I)	0	3
Torque loop, Proportional Gain (P)	8921000	8921000
Torque loop, Integral Gain (I)	509800	509800
Flux current loop, Proportional Gain (P)	8921000	8921000
Flux current loop, Integral Gain (I)	509800	509800

Dessa mätningar genomfördes både innan och efter kalibreringen av motorn, illustreras i figur 4.2. Figur 4.2a illustrerar motorns prestation innan kalibreringen, medan figur 4.2b illustrerar prestationen efter.

Som framgår av figur 4.2a elimineras inte felet med de ursprungliga parametrarna, utan stabiliseras omkring  $5 \times 10^{-4}$  revolutioner. Det motsvarar ett fel på  $0.18^\circ$ . Under mätperioden varierar felvärdet mellan 0 och  $7 \times 10^{-4}$  revolutioner.



(a) Före kalibrering



(b) Efter kalibrering

**Figur 4.2:** Stegsvär och felvärde före och efter PI-kalibrering för motorns vertikala axel

I figur 4.2b observeras att det tar 0,4 sekunder från den tidpunkt där begärda positionen når målvärdet till att faktiska positionen når målpositionen, Detta innebär att det totalt tar 3,4 sekunder från rörelsens början. Under denna mätperiod (0-7500 ms) varierar felvärdet inom intervallet från ungefär  $-3 \times 10^{-4}$  till  $4 \times 10^{-4}$ . En observation är även att systemet tillåter en högre hastighet, vilket illustreras genom att den begärda positionsförändringen sker 25% snabbare. Jämförelsen mellan de två graferna visar att kalibreringen har eliminerat felet på ett effektivt sätt.

### 4.3 Kalibrering av horisontell motor

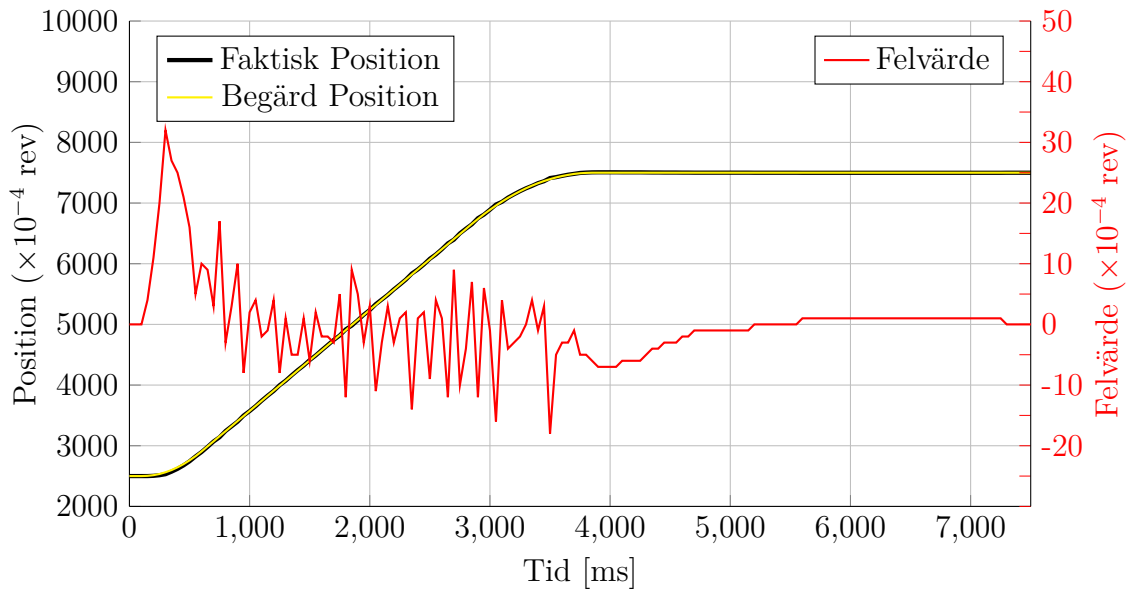
Testerna av den horisontella motorn sker enligt de följande parametrar i tabell 4.2.

**Tabell 4.2:** Motorinställningar för den horisontella motorn

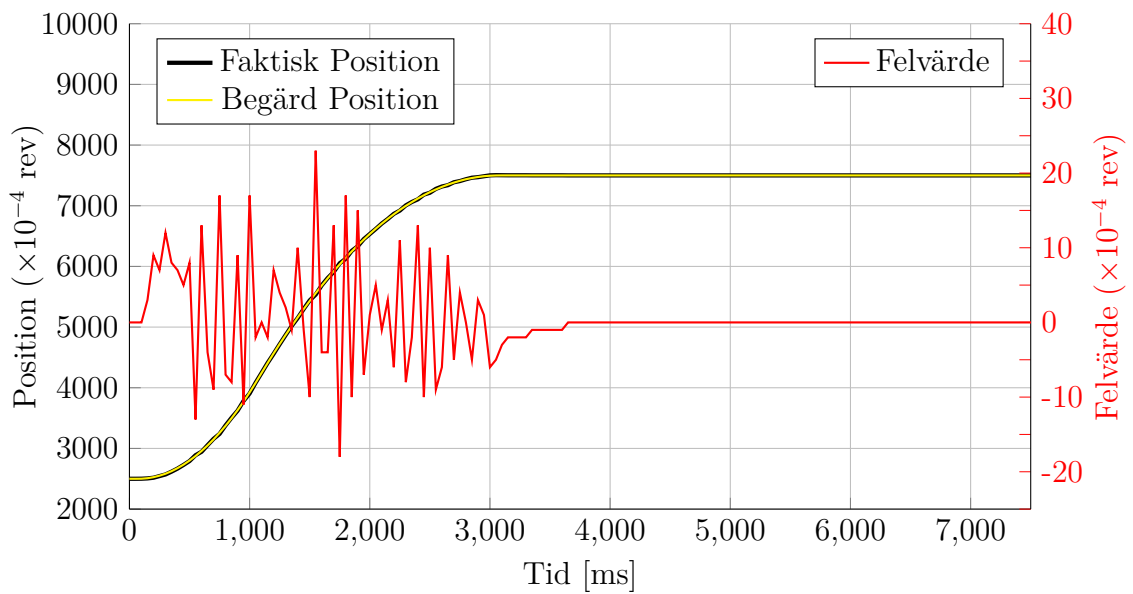
Motor parametrar för horisontella motorn	Innan kalibrering	Efter kalibrering
Position loop, Proportional Gain (P)	5000	6000
Position loop, Integral Gain (I)	20	80
Velocity loop, Proportional Gain (P)	20000	17000
Velocity loop, Integral Gain (I)	4	0
Torque loop, Proportional Gain (P)	8921000	8000000
Torque loop, Integral Gain (I)	509800	600000
Flux current loop, Proportional Gain (P)	8921000	7500000
Flux current loop, Integral Gain (I)	509800	700000

Mätningarna sker genom en positionsändring från position 2500 till position 7500. Detta motsvarar en rörelse från då armen är i ett horisontellt läge till horisontell på motsatta sida av axeln, vilket är en rörelse på ett halvt varv. Mätningarna illustreras i figur 4.3.

Både innan och efter kalibreringen elimineras det kvarstående felet, vilket framgår av den röda felvärdeskurvan i figur 4.3a och figur 4.3b. Det kalibrerade systemet gör elimineringen av felvärdet på cirka 0,55 sekunder medan de ursprungliga gör det på ungefär fyra sekunder. Detta gäller alltså från den tidpunkt då den begärda positionen uppnår målpositionen. Med rörelsens början som referenspunkt tar det 3,65 sekunder respektive 7,3 sekunder. Även här tillåter det nykalibrerade systemet en högre hastighet, vilket i detta fall leder till att den begärda positionsförändringen kan ske en sekund snabbare, motsvarande 25% snabbare.



(a) Före kalibrering

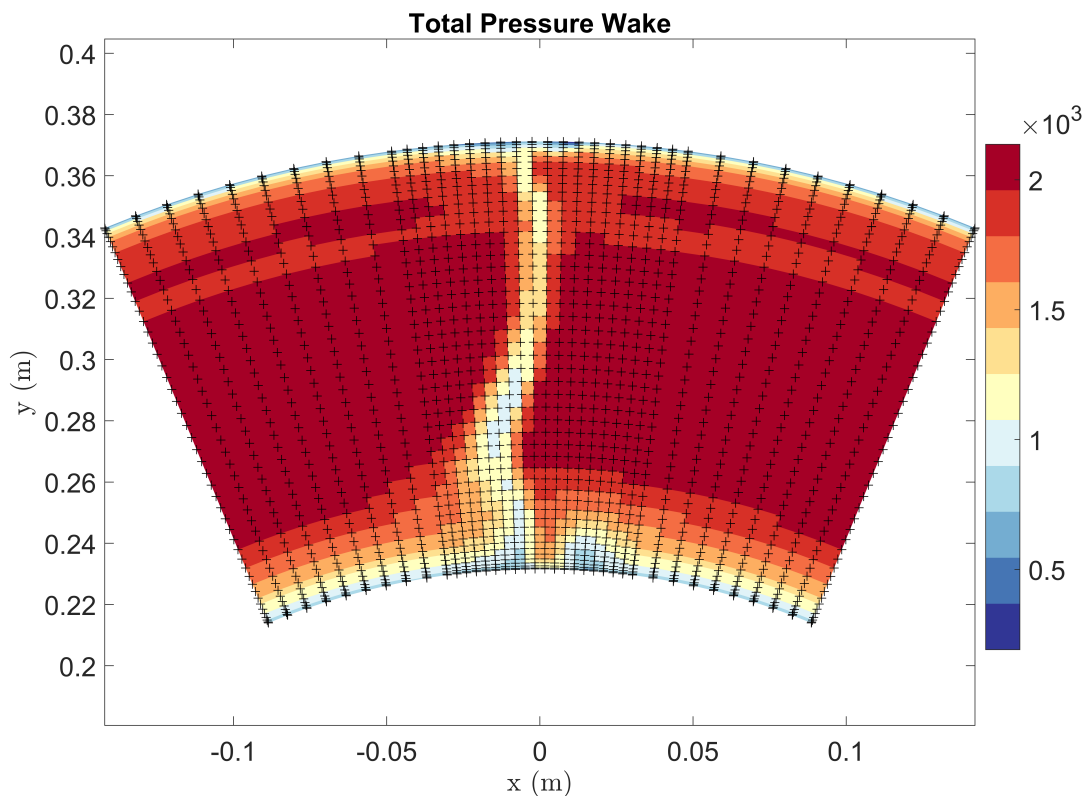


(b) Efter kalibrering

**Figur 4.3:** Stegsvär och felvärde före och efter PI-kalibrering för motorns horisontella axel

## 4.4 Resultat: Inverkan av vinkelavvikelse

Figur 4.4 visar utloppsplanet från CFD-beräkningen med konturer av totaltryck. De svarta korsen representerar typiska traverseringspunkter längs tangentiella och radiella positioner radier och motsvarar ett typiskt mätmönster. Notera att tryckfallet tydligt syns i vakområdet centralt i bilden.

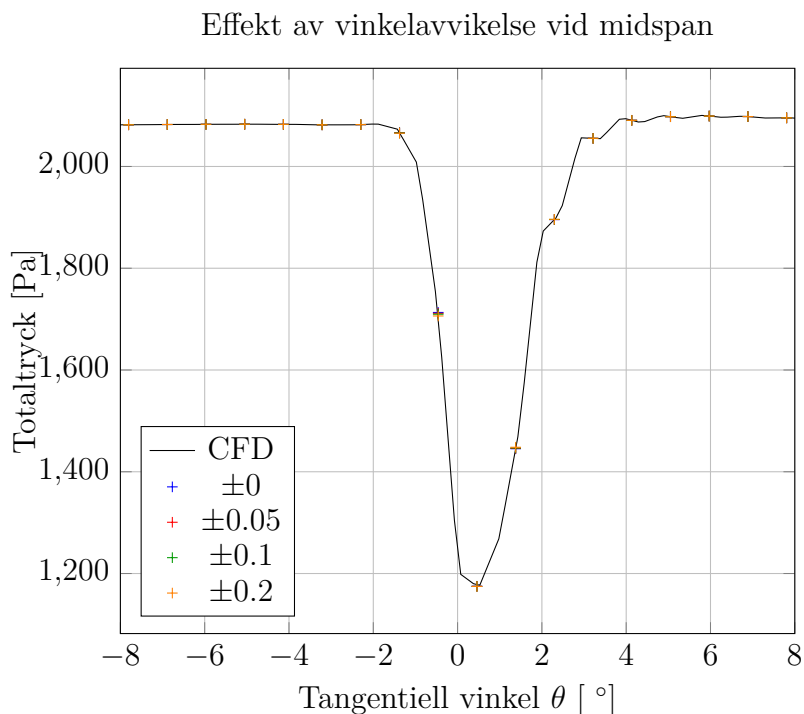


**Figur 4.4:** Ett exempel på ett traverseringsplan vid outlet av superimoserad på en numeriskt data från [3]

Figur 4.5 visar hur ett vinkelfel i traverssystemet påverkar den uppmätta totaltrycksprofilen vid midspan. CFD-profilen (svart linje) jämförs med syntetiska traversmätningar som har 50 punkter och olika vinkelavvikelser.

Resultatet visar att redan ett litet fel på  $0.05^\circ$  leder till märkbara avvikelser i vakområdet, där tryckgradienten är som störst.

Tabell 4.3 sammanfattar det maximala lokala felet för varje ökning i vinkelavvikelse. Förväntad mätnoggrannhet för en Kiel prob vid användandet av en PSI-9116 skulle vara på 2.5 Pa eller  $\varepsilon_{P_t} \approx 2.5$  som jämförelse.



**Figur 4.5:** Midspanprofilens känslighet för vinkelavvikelse jämfört med CFD-referens.

**Tabell 4.3:** Påverkan av vinkelavvikelser på läsning av totaltryck, up till  $\pm 0.2$

Vinkelavvikelse [°]	Tryckfel [Pa]
0.00	0.0
0.05	2.1
0.10	3.5
0.20	7.0

Även om medelvärdet över hela profilen inte påverkas kraftigt, visar figuren tydligt att lokal noggrannhet kräver en vinkelupplösning bättre än  $0.05^\circ$  i områden med hög gradient. Detta motiverar användning av motorer med högre encoderupplösning i känsliga zoner.

## 4.5 Vinkelverifiering med bildanalys

För att utvärdera styrsystemets positioneringsnoggrannhet genomfördes en vinkelverifiering vid tre fördefinierade positioner. Resultatet av mätningarna presenteras i Tabell 4.4, där uppmätta vinklar mellan respektive position samt medelvärden och kvarstående fel jämfört med den förväntade vinkeln redovisas. Ett exempel på en sammanställningsbild som användes vid analysen illustreras i Figur 4.6.



**Figur 4.6:** Sammanställning av tre axelpositioner (0, 3333, 6666) med tillhörande vinkelmätning, utförd i GeoGebra.

**Tabell 4.4:** Uppmätta vinklar, medelvärde, förväntad vinkel och avvikelse

Positioner	0 → 3333	3333 → 6666
Förväntad Vinkel	119,988°	
Försök 1	118,83°	119,25°
Försök 2	118,33°	119,33°
Försök 3	118,71°	119,94°
Genomsnittlig vinkel	118,62°	119,17°
Kvarstående fel	1,36°	0,81°

Vid samtliga positioner rapporterade systemet att den önskade positionen uppnåts utan fel. De beräknade vinkelavvikelserna visar dock att systemet inte fullt ut når den teoretiskt korrekta slutpositionen. Det kvarstående felet kan sannolikt härledas till mekaniskt spel, strukturell elasticitet eller andra små variationer i systemets dynamik. Den observerade avvikelserna, på upp till cirka en grad, indikerar att dessa faktorer har en mätbar inverkan vid större rörelser över flera positioner.

# 5

## Slutsatser

Chalmers strömningslaboratorium har ett flertal anläggningar där de befintliga traverseringssystemet bygger på styrsystem som är komplicerade. Syftet med detta arbete har varit att undersöka ett alternativt styrsystem baserat på moderna stegmotorer med inbyggda encoders. Arbetet använde två stegmotorer av typen PD4-C6018L4204-E-01 från företaget Nanotec. Motorerna användes i en MHP kalibrator. Genom kalibrering av motorernas styrparametrar och tester av både precision och hastighet har motorernas prestanda utvärderats. Resultatet visar på att det föreslagna alternativet är en möjlig lösning, med stor potential i laboratoriet för tillförlitlighet och användarvänlighet.

### 5.1 Analys av Stegsvär

I denna sektion analyseras kalibreringsutvecklingen för de två motorerna. Analysen innefattar en jämförelse mellan stegsvaren för de ursprungliga parametrarna, som illustreras i figur 4.2a och figur 4.3a, och de nya stegsvaren, som presenteras i figur 4.2b och figur 4.3b. Syftet är att utvärdera hur kalibreringen har påverkat motorernas prestanda.

För den vertikala motorn kvarstod ett fel på  $5 \times 10^{-4}$  revolutioner efter sju och en halv sekund i den ursprungliga kalibrering, medan det nya systemet eliminerar detta fel 3.4 sekunder efter att rörelsen påbörjats. Vilket är en tydlig förbättring av precision. Vad gäller hastigheten, blir det svårare att beräkna dess procentuella förbättring då det ursprungliga systemet ej nådde noll. Men eftersom vi vet att den inte nått noll vid 7.5 sekunder kan följande ekvation användas:

$$\left(1 - \frac{3.4s}{7.5s}\right) \times 100 \approx 54.6\% \quad (5.1)$$

Vilket tyder på att hastigheten minst har förbättrats med 54.6%.

Vad gäller den horisontella motorn, uppvisade det ursprungliga system att det eliminerar det kvarstående fel helt efter 7.3 sekunder. Det nya och kalibrerade system har däremot, enligt figur 4.3b, eliminerat felet 3,65 sekunder efter att rörelsen har påbörjats. Detta tyder att noggrannheten inte har förbättrats i detta system då både versioner av systemet eliminerade felet. Men att systemet är betydligt mer effektivt. Elimineringen av felet görs 3.65 sekunder snabbare i det nya systemet. En procentsats av förbättringen beräknas enligt följande:

$$\left(1 - \frac{3.65s}{7.3s}\right) \times 100 \approx 50\% \quad (5.2)$$

Enligt ekvation 5.2 blir det på den horisontella axeln en förbättring på 50% gällande hastigheten.

Observera även att både motorer genomför positionsförändringen cirka en sekund snabbare än tidigare, då systemen klarar av en högre hastighet utan att tappa precisionskapacitet.

## 5.2 Analys av vinkelverifiering

Arbetet inkluderar även ett mätförsök där vinklarna mellan tre olika positioner beräknades utifrån ett antal tagna bilder. Resultatet visade på att det fanns en avvikelse mellan den position som systemet uppfattade som den begärda positionen och den faktiska begärda positionen. Mellan position 0 och 3333 uppmättes ett kvarstående felvärde på  $1.36^\circ$ , medan det mellan position 3333 och 6666 uppgick i genomsnitt  $0.81^\circ$ . Anläggningen upplever alltså olika avvikelser beroende på vilken position som den horisontella axeln har. Detta tyder på att det finns någon typ av mekanisk brist i anläggningen. Den mest sannolika orsaken till bristen är ett glapp som uppstår i den tandrem som förbinder den horisontella motorn med axeln där den mekaniska armen är monterad. En möjlig lösning till detta är att byta ut befintliga remmen mot en variant med lägre elasticitet.

## 5.3 Slutsats

Detta arbete har visat att ett alternativt styrsystem baserat på moderna stegmotorer med inbyggda encoders är en möjlig lösning för att ersätta de befintliga travseringsystemen. Systemet erbjuder enkel implementering och ökad användbarhet. Kalibreringen av motorens styrparametrar sker effektivt genom mjukvaran *Plug And Drive*, där mjukvaran erbjuder hjälp genom sitt inbyggda oscilloskop.

Arbetet har genom kalibreringen av de två motorer uppnått en precision som överstiger den resolution som den interna encodern erbjuder. Både motorer eliminerar nu de kvarstående fel som fanns innan arbetet, samt gör det på ett mer effektivt sätt. Arbetet har förbättrat elimineringsstiden med cirka 54.6% och 50%.

Systemet tillåter nu en högre hastighet, vilket i de genomförda försök tillåtit 25% snabbare begärda positionsförändringar. Detta har kunnat genomföras utan att förlora i precision.

Dock kan man observera genom vinkelverifiering att en avvikelse uppstår mellan faktiska positionen på den horisontella axeln och den begärda. Detta är inget som motorn uppvisar, men som blev tydligt vid den bildanalys som genomfördes.

Vinkelverifieringen avslöjade visst mekaniskt spel i det befintliga systemet, vilket orsakar avvikelser mellan förväntad och uppmätt position för den horisontella axeln. Detta sker även då systemet inte indikerar att ett fel finns. Vidare kan ytterligare förbättringar ske genom att undersöka mekaniska komponenter i systemet.

Sammanfattningsvis visar resultaten att detta nya system erbjuder en lösning med god potential att ersätta äldre utrustning inom laboratoriemiljöer.

## 5.4 Förslag på framtida arbeten

Detta arbete har, enligt slutsats, utnyttjat motorernas kapacitet optimalt vad gäller noggrannhet och precision. I dagsläget begränsas vidare utveckling av den inbyggda encoderns upplösning, då den uppnådda precisionen motsvarar encoderns maximala räckvidd. På grund av detta föreslås att nästa steg vore att undersöka effekten av en motor med inbyggd encoder med högre upplösning, för att möjliggöra en finare positionsåterkoppling.

Ett alternativt angreppssätt är att implementera en extern encoder i systemet. Exempelvis erbjuder Nanotecs en extern magnetisk encoder med en upplösning på 16384 räknesteg per varv, vilket är fyra gånger högre än den interna encodern i det nuvarande systemet. Detta skulle dock innebära omfattande kodning eller ett utbyte av nuvarande motorer då de befintliga inte erbjuder återkoppling via externa encoders.

Ett ytterligare framtida arbete är att undersöka konstruktionen av MHP - kalibreringsanläggningen för att eliminera de mekaniska brister som upptäckts. En trolig start till det arbete är att undersöka tandremmens påverkan på positioneringen.



# Litteraturförteckning

- [1] I. Jonsson and B. Legrady, “Multi-hole probe: A Review and a New Take to Improve Accuracy.” Preprint, Research Square, Aug. 2024. Version 1, available at <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4801492/v1>.
- [2] Chalmers Tekniska Högskola, “Chalmers strömningslaboratorium,” 2023. Accessed: 2025-03-10.
- [3] I. Jonsson, *Experimental Aerothermal Study of Internal Jet Engine Structures*. Doctoral thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2021. Opponent: Prof. Thomas Povey, Dept of Engineering Science, University of Oxford.
- [4] I. Jonsson, S. Deshpande, V. Chernoray, O. Thulin, and J. Larsson, “Experimental and numerical study of laminar-turbulent transition on a low-pressure turbine outlet guide vane,” *ASME Turbo Expo*, vol. Volume 2B: Turbomachinery, p. V02BT33A014, 09 2020.
- [5] *The Purdue High-Speed Small Core Turbine Facility*, vol. Volume 4: Controls, Diagnostics, and Instrumentation of *Turbo Expo*, 06 2024.
- [6] B. Rojo, *Aerothermal Experimental Investigation of LPT-OGVs*. Doctoral thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2017. Opponent: Dr. Raúl Vázquez Díaz.
- [7] B. Schweber, “Stepper Motors Make the Right Moves with Precision, Ease and Smarter Drivers.” Technical Article, Mouser Electronics, Feb. 2015. Available at [https://www.mouser.com/pdfdocs/StepperMotorsRightMoves\\_2015Final.pdf](https://www.mouser.com/pdfdocs/StepperMotorsRightMoves_2015Final.pdf).
- [8] O. Motor, “Stepper Motor Accuracy and Resolution.” Technical Article, n.d. Available at <https://www.orientalmotor.com/technology/articles/stepper-motor-accuracy.html>.
- [9] Nanotec Electronic GmbH & Co. KG, *Plug & Drive Studio Quick Start Guide, Version 2.1.0*, 2021. [Online]. Available: [https://www.nanotec.com/fileadmin/files/Software/Plug\\_Drive\\_Studio/Quick\\_start\\_guide\\_2.1.0.pdf](https://www.nanotec.com/fileadmin/files/Software/Plug_Drive_Studio/Quick_start_guide_2.1.0.pdf). Accessed: 7 May 2025.



**INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER**  
**CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA**

Göteborg, Sverige 2025

[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



**CHALMERS**