



CHALMERS



Utveckling av en stötdämpar-dynamometer för bättre fordonsdynamik

Kandidatarbete inom Maskinteknik

Ludvig Andersson

Melker Folkesson

Joel Jonsson

Ludvig Karlqvist

Oscar Steen

Theo Tiainen

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2026

www.chalmers.se

KANDIDATARBETE INOM MASKINTEKNIK

Utveckling av en stötdämpardynamometer för bättre fordonsdynamik

Ludvig Andersson
Melker Folkesson
Joel Jonsson
Ludvig Karlqvist
Oscar Steen
Theo Tiainen



CHALMERS

Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Avdelningen för Dynamik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2026

Utveckling av en stötdämpardynamometer för bättre fordonsdynamik
Ludvig Andersson
Melker Folkesson
Joel Jonsson
Ludvig Karlqvist
Oscar Steen
Theo Tiainen

© Ludvig Andersson, Melker Folkesson, Joel Jonsson,
Ludvig Karlqvist, Oscar Steen, Theo Tiainen, 2026.

Handledare: Björn Pålsson, Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Examinator: Håkan Johansson, Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper

Kandidatarbete 2026
Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Den konstruerade och tillverkade stötdämpardynamometern.

Typsatt i L^AT_EX
Göteborg 2026

Sammanfattning

Denna rapport dokumenterar utvecklingen av en stötdämpardynamometer utförd på uppdrag av Chalmers Formula Student (CFS). Arbetet omfattar hela kedjan från kravställning och beräkningar till den praktiska tillverkningen av testtriggen i Chalmers verkstäder. Bakgrunden till arbetet är teamets behov av att kunna karakterisera och validera beteendet hos bilens stötdämpare under kontrollerade former. Kommersiella testtriggar är ofta för kostsamma och inte anpassade för de specifika laster och komponenter som används i Formula Student. Genom att utveckla en skraddarsydd lösning skapas förutsättningar för att optimera bilens väghållning och förkorta den tidskrävande processen med iterativa ändringar av dämparinställningar vid testning av bilen.

Konstruktionen baseras på en robust ram av fyrkantsprofiler i stål som inrymmer både mekaniska och elektriska delsystem. Den centrala funktionen, att omvandla rotation till linjär rörelse, uppnås genom en scotch yoke-mekanism som drivs av en trefas asynkronmotor via en remväxel. För att möjliggöra testning av olika dämpartyper har systemet utrustats med en specialdesignad rotationsskiva som medger justering av slaglängden mellan 5 och 50 mm. Säkerheten har varit en prioriterad aspekt i arbetet, vilket har resulterat i en helt inkapslad testmiljö med integrerade nödstopp och gränslägesbrytare som uppfyller kraven i gällande maskindirektiv.

Mät- och styrsystemet är uppbyggt kring en National Instruments DAQ-enhet och omfattar sensorer för dämparkraft, position och temperatur. Genom ett egenutvecklat användargränssnitt i LabVIEW kan operatören reglera testtriggens hastighet och logga mätdata i realtid, vilket ger CFS värdefull information om dämparnas egenskaper och beteende i både kompressions- och returfasen.

Resultaten visar att samtliga mekaniska krav har uppfyllts. Testtriggen hanterar dämparkrafter på upp till 1 880 N utan oönskad deformation och uppnår den krävda hastigheten 0.263 m/s vid 25 mm slaglängd.

Projektet har resulterat i en mekaniskt fungerande stötdämpardynamometer som ger CFS ett värdefullt verktyg för att optimera bilens väghållning. Implementeringen av testtriggen skapar därmed goda förutsättningar för förbättrad fordonsdynamik och ökad konkurrenskraft i framtida tävlingar.

Nyckelord: Formula Student, stötdämpardynamometer, hjulupphängning, testtrigg

Förord

Denna rapport utgör resultatet av ett kandidatarbete vid institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper vid Chalmers tekniska högskola, utfört under våren 2026. Projektet har genomförts i samarbete med Formula Student-teamet (CFS), med syftet att utveckla och tillverka en testtrigg för karakterisering av stötdämpare. Rapporten riktar sig i första hand till ingenjörsstudenter, lärare och tekniskt insatta personer med ett intresse för maskinkonstruktion och fordonsdynamik. Läsaren förutsätts ha grundläggande kunskaper inom mekanik och tillverkningsteknik.

Författarnas tack

Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare, Björn Pålsson, och vår examinator, Håkan Johansson, för vägledning, teknisk expertis och stöttning genom hela projektets gång. Ett särskilt omnämmande går till Stefan Lundberg, vars hjälp var avgörande för att vi skulle kunna testköra och verifiera testtriggens elektriska system. Vi vill också uttrycka vår uppskattning till personalen i Prototyplabbet, Motorlabbet och Fuse för deras vägledning vid både tillverkning och testning. Ett varmt tack riktas dessutom till studentföreningen eXPerimentverkstaden, vilka gav oss tillgång till verkstäderna även på kvällstid och därmed gjorde det praktiska bygget möjligt. Vi vill även rikta ett tack till Felix Christensson som grundade idén till projektet samt kom med designförslag till framförallt upphängningen av scotch yoken.

Projektet hade inte heller kunnat genomföras i denna utsträckning utan det generösa stödet från ett flertal företag. Vi är mycket tacksamma gentemot Easy-Laser i Mölndal för utlåning av högprecis mätutrustning samt för den expertis de delade med sig av under tillverkningsfasen. Vidare vill vi tacka Norelem för sponsring av avgörande komponenter och maskinelement till konstruktionen. Avslutningsvis vill vi rikta ett stort tack till Klässbols Elteknik AB som bidrog med teknisk konsultation och sponsrade med mycket av det material som krävdes för maskinens elinstallation.

Författarna, Göteborg, maj 2026

Akronymer

Nedan är listan över akronymer som har använts genom hela detta arbete listade i alfabetisk ordning:

CFS	Chalmers Formula Student
CSV	Comma Separated Values
DAQ	Data Acquisition
LCA	Livscykelanalys
VFD	Variable-frequency drive

Innehåll

Akronymer	ix
Figurer	xiii
Tabeller	xv
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Avgränsningar	2
2 Teknisk bakgrund	3
2.1 Stötdämpare	3
2.1.1 Stötdämparens uppbyggnad	6
2.1.2 Stötdämparkarakterisering	7
3 Krav och Systembeskrivning	9
3.1 Krav och funktion	9
3.1.1 Funktionella krav	9
3.1.2 Säkerhetskrav	10
3.1.3 Funktionsmodell	10
3.2 Mekanisk konstruktion	10
3.2.1 Överföring av rotation till translation	11
3.2.2 Testbara hastigheter	11
3.2.3 Justerbar dämparinfästning	11
3.2.4 Ramstruktur	11
3.3 Högspänningssystem	11
3.3.1 Elmotor	11
3.3.2 Frekvensomriktare	11
3.4 Lågspänningssystem	12
3.4.1 Sensorer och mätenheter	12
3.4.2 Styrenhet	12
3.4.3 Kontrollpanel	12
3.4.4 Användargränssnitt	12
4 Koncept	13
4.1 Mekanisk konstruktion	13
4.2 Elsystem	17

5	Konstruktion och tillverkning	19
5.1	Ram	19
5.1.1	Konstruktionsmetod	19
5.2	Motorinfästning	21
5.2.1	Konstruktionsmetod	21
5.3	Drivsystem och rullningslager	22
5.3.1	Beräkningar	22
5.3.2	Konstruktionsmetod	24
5.4	Scotch yoke	25
5.4.1	Konstruktionsmetod	26
5.5	Dämparinfästning	31
5.5.1	Konstruktionsmetod	31
5.6	Total förskjutning	35
5.7	Högspänningssystem	36
5.7.1	Motor	36
5.7.2	Frekvensomriktare	36
5.7.3	Inkapsling	36
5.7.4	Konstruktionsmetod	37
5.8	Lågspänningssystem	37
5.8.1	Linjärpotentiometer	37
5.8.2	Temperaturgivare	38
5.8.3	Lastcell	39
5.8.4	Lastcellsförstärkare	39
5.8.5	Styrenhet	39
5.8.6	Konstruktionsmetod	40
6	Resultat	41
6.1	Mekanik	41
6.1.1	Kravuppfyllnad	43
6.2	El och datainsamling	44
6.2.1	Kravuppfyllnad	44
6.2.2	Mätresultat	45
6.3	Diskussion	49
7	Slutsatser	51
	Referenser	53
A	Beräkning av utböjning	I
B	Beräkning av hastighet	V
C	Logganalys	VII
D	Lagerberäkning	XIII
E	Elschema	XVII

Figurer

2.1	Mekanisk modell av dämpat system.	3
2.2	Exempel på sambandet mellan kraft, rörelseriktning och hastighet för en fiktiv dämpare som beter sig olika beroende på riktning och hastighet.	5
2.3	Stötdämpare och fjäder i hjulupphängning av dubbel länkarmskonstruktion sett framifrån.	5
2.4	Exempel på twin-tube konstruktion.	6
2.5	Exempel på förhållande mellan kraft och position för en fiktiv dämpare.	7
3.1	Funktionsmodell.	10
4.1	ISO-vy CAD	13
4.2	Sprängskiss av det mekaniska systemet utan tillhörande fästelement	14
4.3	Sidovy CAD som visar bland annat motor och remväxel.	15
4.4	Scotch Yoke mekanismen.	16
4.5	CAD med dämparinfästning framifrån.	17
4.6	Elkomponenterna i CAD sett bakifrån.	18
5.1	Ramens första egenmod.	20
5.2	Motorinfästning med monterad motor.	21
5.3	Bottenplattan svetsad i ramen.	22
5.4	Scotch yoke-mekanism som omvandlar rotation till linjär rörelse. (Jiga, 2025).	26
5.5	Den färdig konstruerade scotch yoke konstruktionen.	27
5.6	Tappskiva monterad på rotationsskiva, dessa är monterade på axeln med axelnavet på baksidan.	28
5.7	Resultat från topologioptimering och FEM-analys av tappskivan.	29
5.8	Rotationsskiva för scotch yoke, visar vy över slaglängdsinställningarna och hålbilden.	29
5.9	Montering av tappskivan vid tre olika slaglängdsinställningar.	30
5.10	FEM-analys av scotch yoke-oket vid maximal kritisk last, med 5% i konvergens.	30
5.11	Friläggning av dämparinfästning.	31
5.12	Lastfall dämparinfästning.	33
5.13	Resultat från simulering av dämparinfästning, med 5% i konvergens.	34
5.14	Stötdämparens övre infästning.	34
5.15	Deformerad sprint.	35

5.16	Dynamiskt system.	36
5.17	Linjärpotentiometer monterat parallellt med stötdämparen samt last- cellen monterad vid övre dämparinfästning.	38
6.1	Mekanisk konstruktion med sidopaneler och säkerhetsdörr.	42
6.2	Mekanisk konstruktion sedd uppifrån utan toppanel.	43
6.3	Frekvensomriktaren och lågspänningssystemet installerat i den bakre sektionen av testtriggen.	44
6.4	Användargränssnittet i LabVIEW.	45
6.5	Stötdämparen monterad i stötdämpardynamometern.	46
6.6	Utdrag från en datalogg vid låg hastighet.	47
6.7	Utdrag från en datalogg vid högre hastighet.	47
6.8	Val av datapunkter där hastigheten är relativt konstant samt sam- manställning av genomsnittlig kraft och hastighet för varje maximum och minimum.	48
6.9	Kraft-hastighetsgraf med huvudsakligen ökande kraft vid högre has- tigheter.	49

Tabeller

4.1	Beskrivning av komponent 1 till 34	14
5.1	Beräkningsvärden nedväxling	23
5.2	Specifikation för drivande remskiva (Motoraxel)	25
5.3	Specifikation för driven remskiva (Drivaxel)	25
5.4	Beräkningsvärden klämmförband	32
5.5	Beräknade förskjutningar	35
6.1	Slutgiltiga genomsnittliga datapunkter	48

1

Inledning

Denna kandidatrapport avser att redogöra för utveckling och konstruktion av en stötdämpardynamometer för att karakterisera egenskaperna hos stötdämpare avsedda för Formula Student-bilar. Beteendet hos bilens stötdämpare påverkar dess köregenskaper och bör optimeras för att bilen ska vara konkurrenskraftig i de krävande Formula Student-tävlingarna.

1.1 Bakgrund

Chalmers Formula Student är ett studentteam som varje år konstruerar, tillverkar och tävlar med en formelbil i internationella tävlingar mot andra universitet och högskolor. Bilen utvecklas till 95% internt av över 70 studenter (Chalmers Formula Student, 2026). Bilens hjulupphängning är mycket avgörande för prestandan vad avser köregenskaper, kurvtagningsförmåga och grepp. Systemet består i huvudsak av en fjäder och parallell dämpare för varje hjulupphängning. Fjäder- och dämparegenskaper påverkar hur bilen svarar och beter sig vid manövrar och ojämnheter. Bilens konstruktion baseras på beräkningar och simuleringar som kräver pålitliga ingångsdata för att ge bra information. Bland annat behövs data kring hur stötdämparna beter sig.

De dämpare som används av CFS idag har 19 justeringar i både hög- och lågfartskompression samt hög- och lågfartsreturdämpning. Dessa inställningar påverkar direkt dämparens egenskaper och därmed bilens beteende. CFS saknar verktyg för att kunna mäta dämparnas beteende under olika inställningar och belastningsförhållanden. Maskiner som utvärderar stötdämpares beteende, så kallade stötdämpardynamometrar, kan återskapa olika belastningsförhållanden och mäta dämparens motverkande kraft. En stötdämpardynamometer är en fristående maskin som återskapar valda slaglängder och hastigheter som dämparen utsätts för och mäter krafter i kompressionsdämpning respektive returdämpning. På så sätt kan dämparens beteende utvärderas vid olika inställningar och belastningsförhållanden vilket ger data som idag saknas hos CFS. Denna information underlättar valet av stötdämparinställningar till bilen och ger data som stöd vid framtida utveckling av bilen. Genom att testa stötdämparna individuellt säkerställs att alla dämpare på bilen fungerar som de ska och att inställningarna ger samma egenskaper hos alla dämpare.

Stötdämpardynamometrar existerar som kommersiella produkter men dessa är kostsamma och inte anpassade till de stötdämpare som används av CFS. Lösningar som

tagits fram av exempelvis tillverkaren LABA7 varierar mellan 9 000 och 28 000 EUR (LABA7, 2024). Genom att utveckla en skräddarsydd testtrigg kan maskinen dimensioneras för de specifika laster bilen utsätts för. Dessutom kan kostnaderna hållas relativt låga genom egen utveckling (in-house).

Syftet med detta arbete är därmed att tillverka en stötdämpardynamometer till Chalmers Formula Student så de kan optimera sina dämparinställningar och prestera så bra som möjligt på framtida tävlingar. Detta uppnås genom att konstruera och bygga en testtrigg där stötdämpare från CFS kan monteras och köras med ett enkelt användargränssnitt för att få ut relevant stötdämpardata för analys.

1.2 Avgränsningar

Utveckling av maskinen innebar många konceptval av delsystem och dellösningar. Dessutom behövdes tillverknings- och budgetaspekter beaktas. Då projektet utspelat sig under en för uppdraget kort period har projektgruppen i huvudsak inte gjort djupgående analyser eller utförliga tester för att säkerställa att valda lösningar är optimala. Huvudsakligt fokus har varit att konstruera, tillverka och leverera en fungerande produkt under denna korta tidsram. För konstruktionen av en testtrigg tillhandahölls en trefas asynkronmotor (elmotor) från CFS för att användas inom projektet.

För att effektivisera arbetet behövdes avgränsningar sättas för att veta vad som ska tas i hänsyn till och inte under projektets gång. Vid projektstart var avgränsningarna:

- Projektet innefattar endast konstruktionen av en testtrigg, därmed utesluts kostnadsoptimering för produktion samt LCA.
- Dimensionering kommer i huvudsak att göras med hög säkerhetsfaktor för att ge lång livslängd.
- Viktoptimering för låg vikt kommer inte att tas i hänsyn då hög vikt bidrar till maskinens stabilitet.
- Testtriggen kommer dimensioneras kring stötdämpare i ungefärlig storlek och utförande som används av CFS. Viss justerbarhet kommer finnas för att passa framtida dämpare, inom rimlighet.
- Den mekaniska konstruktionen kommer till stor del vara gruppens egen bortsett från existerande maskinelement. Elektronik kommer huvudsakligen bestå av av inköpta standardkomponenter
- Projektet avgränsas i komplexitet så att det är genomförbart för en gruppstorlek på 6 personer och kan genomföras på den tid som finns för kandidatarbetet.

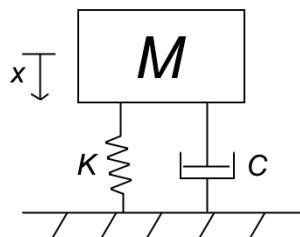
2

Teknisk bakgrund

2.1 Stötdämpare

Detta avsnitt avser att gå igenom grundläggande teori och funktion kring stötdämpare samt varför och vilka mätningar som är relevanta.

Funktionen hos stötdämpare i fordons hjulupphängningar är att kontrollera fjädrarnas rörelse. Dämparens roll kan förklaras genom ett enkelt system med en frihetsgrad (se Figur 2.1), en massa som bärs upp av en fjäder och dämpas med en viskös dämpare (Johnson, K.W, 2020b).



Figur 2.1: Mekanisk modell av dämpat system.

Det linjära systemet i Figur 2.1 kan beskrivas enligt ekvation 2.1.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = 0 \quad (2.1)$$

Där M , K och C representerar massa, fjäderstyvhet och dämpningskoefficient. I detta fall är samtliga parametrar konstanta. Utan dämpare i ett sådant system ($C = 0$) fortsätter systemet att oscillera efter att det satts i svängning av en kraft, exempelvis en störning i form av en ojämnhet i vägen eller vid en manöver. Detta fall beskrivs av Ekvation 2.2.

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \quad (2.2)$$

Lösningen till denna differentialekvation visar att systemet kommer att oscillera harmoniskt i all oändlighet (Japp, 2003).

$$x(t) = A \cos(\omega_n t) + B \sin(\omega_n t) \quad (2.3)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (2.4)$$

I fallet då en dämpare finns ($C > 0$) så beskrivs systemet enligt ekvation 2.1 och lösningen till differentialekvationen innehåller en exponentialterm som gör att oscillationerna dör ut (Japp, 2003).

$$x(t) = e^{-\zeta\omega_n t}(A \cos(\omega_d t) + B \sin(\omega_d t)) \quad (2.5)$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.6)$$

Där dämpningsförhållandet ζ fås enligt Ekvation 2.8.

$$C_c = 2M\omega_n = 2\sqrt{KM} \quad (2.7)$$

$$\zeta = \frac{C}{C_c} \quad (2.8)$$

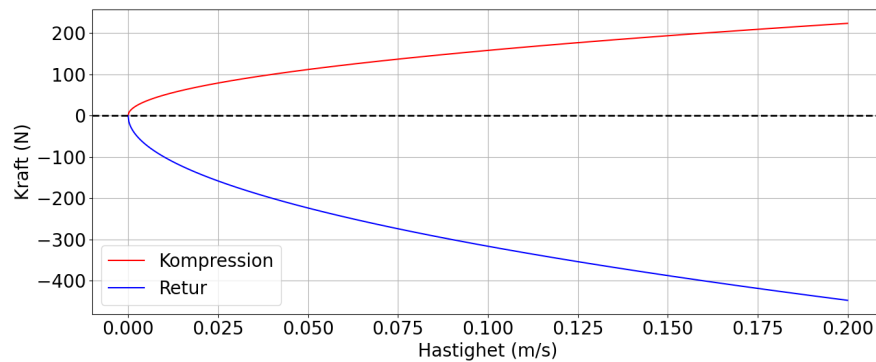
Ett kritiskt dämpat system $\zeta = 1$ är dämpat så att det inte oscillerar och återgår med den kortaste insvängningstiden (Johnson, K.W, 2020a). $\zeta < 1$ ger ett underdämpat system som oscillerar och avtar till jämvikt medan ett system med $\zeta > 1$ är överdämpat och återgår till jämvikt utan att oscillera.

En enkel ideal dämpare som i Figur 2.1 kan beskrivas genom Ekvation 2.9.

$$F = C\dot{x} \quad (2.9)$$

Dämparkraften är då proportionell mot hastigheten \dot{x} i kompression och retur (Johnson, K.W, 2020a). Stötdämpare används och ställs in för att uppnå det önskade beteendet i hur hjulupphängningen ska hantera störningar och återgå till jämviktsläge.

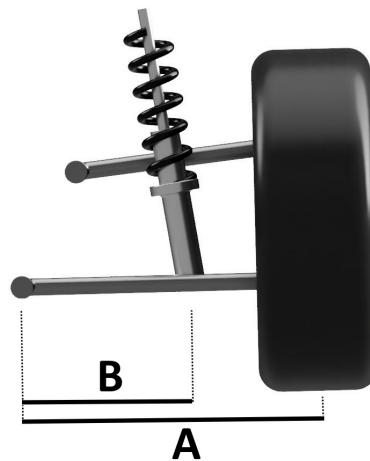
Den ideala dämparen enligt Ekvation 2.9 har ett linjärt samband mellan kraft och hastighet. Stötdämpare som används i verkligheten avviker ofta från detta linjära beteende i praktiken. Ofta önskas olika dämpning beroende på hastighet samt om det är kompressions- eller returrörelse (Johnson, K.W, 2020b). Sådant beteende kan åstadkommas med olika ventilkonstruktioner som begränsar oljeflödet olika beroende på hastighet. Därför är verkliga stötdämpare inte linjära som modellen utan uppvisar ett olinjärt beteende. Verkliga stötdämpare avviker även från den ideala dämparen bland annat eftersom viskösa dämpare är temperaturberoende. Detta resulterar i dämpare där dämpningskoefficienten C beror på dämparens rörelseriktning och hastighet. Eftersom sambandet mellan dämparkraften beror på hastigheten och riktningen av rörelsen så kan exempelvis en kraft-hastighetsgraf användas för att analysera stötdämparens beteende (Suspension Secrets, u. å). Ett illustrativt exempel på detta visas i Figur 2.2.



Figur 2.2: Exempel på sambandet mellan kraft, rörelseriktning och hastighet för en fiktiv dämpare som beter sig olika beroende på riktning och hastighet.

Hur mycket dämpning som erfordras kan anges i ett förhållande till kritisk dämpning enligt Ekvation 2.8. Önskvärda dämpningsförhållanden till kritisk dämpning kan inom Formula Student exempelvis ligga inom $\zeta = 0.5$ till $\zeta = 0.7$ men justeras i praktiken genom dämparinställningar för att uppnå bäst resultat vid körning med hänsyn till köregenskaper (Jim Kasprzak, u. å).

Beroende på konstruktionen av hjulupphängnings kan stötdämpare vara monterade på olika sätt som påverkar förhållandet mellan dämparens och hjulets rörelse. Detta förhållande kallas *motion ratio*.



Figur 2.3: Stötdämpare och fjäder i hjulupphängning av dubbel länkarmskonstruktion sett framifrån.

Figur 2.3 visar ett exempel på en konstruktion där dämparen och hjulet har olika rörelsebanor på grund av de olika längderna A och B för hjul och stötdämpare. Motion ratio kan exempelvis beräknas genom förändringen av hjulets position och dämparens position under ett rörelseförlopp av hjulupphängningen enligt Ekvation 2.10.

$$\text{Motion ratio} = \frac{\text{Dämparförflyttning}}{\text{Hjulförflyttning}} \quad (2.10)$$

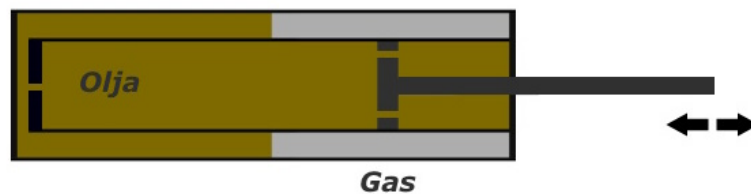
Olika motion ratio påverkar hjulets hävarm till dämparen och fjädern. Med detta kan de ekvivalenta fjäder- och dämparkrafterna vid hjulets kontaktpunkt beräknas (ChassisSim, u. å).

$$C_{hjul} = (\text{Motion ratio})^2 \cdot C_{dämpare} \quad (2.11)$$

2.1.1 Stötdämparens uppbyggnad

Konventionella stötdämpare består av en cylinder med en kolv inuti där cylindern är fylld med olja. När kolven rör sig tvingas olja passera små hål som begränsar flödet av oljan, vilket motverkar kolvens rörelse och ger upphov till dämpning. Motståndet beror på oljans viskösa friktion och i samband med detta upphettas oljan, vilket orsakar temperaturökning vid användning. Storleken på hålen påverkar direkt dämpningen och justeras för att få den önskade dämpningen (Anglin, D.L, 2019).

Dämparna som används av CFS som är avsedda för detta projekt är *KW V5 Racing FORMULA STUDENT*. De är så kallade "twin-tube dampers" och har fyra justermöjligheter i dämpningen (KW automotive, u. å). Twin-tube konstruktionen innebär att det finns en cylinder som kolven går i samt en större, yttre cylinder där det hålls trycksatt gas som ger tryck på oljan i dämparen. En illustration kan ses i Figur 2.4

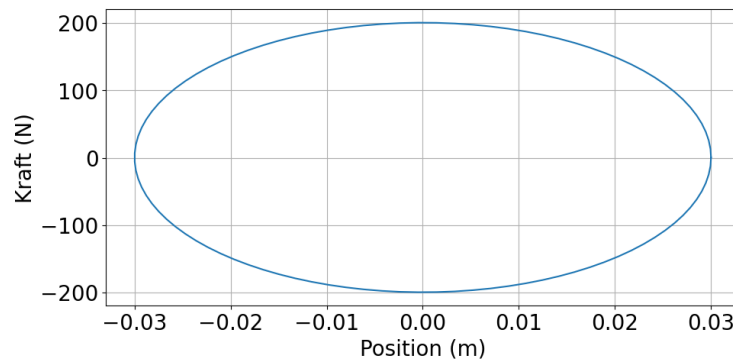


Figur 2.4: Exempel på twin-tube konstruktion.

Detta görs för att undvika kavitation vid hård användning då trycket från gasen försvårar bildningen av bubblor (Anglin, D.L, 2019). De fyra justeringarna möjliggör olika beteende hos dämparen i kompression respektive retur samt vid hög och låg hastighet. Ett reglage justerar dämpningen i kompression vid låg hastighet, en annan justerar dämpningen i kompression vid hög hastighet. Samma gäller för retur, ett reglage justerar dämpning i retur vid låg hastighet och det andra justerar dämpning vid hög hastighet i retur. Varje reglage har 19 inställningssteg var. Detta gör att hög och lågfartsdämpning kan justeras för kompressions- och returförloppen. Olika beteende i retur respektive kompression samt vid olika hastigheter kan ses i Figur 2.2.

2.1.2 Stötdämparkaraktärisering

Den huvudsakliga dämpardata som ska mätas av stötdämpardynamometern kan beskrivas med två grafer (Suspension Secrets, u. å). Den ena visar sambandet mellan dämparkraften och hastigheten för kompression respektive returförloppen (se Figur 2.2). Den andra visar sambandet mellan kraft och position i kompression respektive retur. Ett illustrativt exempel på hur ett sådant samband kan se ut visas i Figur 2.5.



Figur 2.5: Exempel på förhållande mellan kraft och position för en fiktiv dämpare.

Detta baseras i huvudsak på att mäta dämparkraften när den utsätts för olika kompressions- och returhastigheter samt olika slaglängder. Utöver detta måste dämparens position i dess slaglängd mätas samt mätning av hastigheten, vilket stötdämpardynamometern ska tillhandahålla. Stötdämparens temperatur bör mätas då ökningen av oljans temperatur påverkar dämparens egenskaper. Med hjälp av temperaturmätning kan prover avbrytas vid höga stötdämpartemperaturer.

CFS kommer att använda stötdämpardynamometern med sina dämpare för att generera dessa grafer för sina specifika stötdämpare och undersöka deras egenskaper. Detta leder till att teamet kan göra justeringar på dämparna för att optimera bilens prestanda och validera dämparnas beteende in-house.

3

Krav och Systembeskrivning

För att kunna utveckla en lösning till systemet delas det upp i delsystem. Detta kapitel behandlar enbart de funktioner som varje delsystem ska utföra, samt vilka delproblem som ingår i vardera delsystem. Hur dessa delsystem och lösningarna till delproblemen ser ut rent konkret tas upp i Kapitel 4.

3.1 Krav och funktion

Kraven på testtriggen har delats in i två huvudkategorier. Dessa är funktionella krav och säkerhetskrav. Detta för att tydliggöra skillnaden mellan beställarens behov av prestanda och de lagstadgade säkerhetskraven enligt maskindirektivet (Arbetsmiljöverket, 2023).

3.1.1 Funktionella krav

Här presenteras de krav som ställs på konstruktionens funktion och mätkapacitet för att uppfylla syftet med projektet. Kraven baseras på data som finns registrerad av CFS. Dämparutslag har mätts under körning och intervallet i slaglängd representerar verkliga förhållanden (Hanna Lockley och Charles Vignon, personlig kommunikation, 29 januari, 2026).

Följande krav ställs från CFS:

- Testtriggen ska möjliggöra tester på dämpare med en slaglängd mellan 5 och 25 mm.
- Testtriggen ska möjliggöra tester upp till samma hastigheter som dämpartillverkaren KW gör under sina tester, där maximala kompressions- och returhastigheten är 0.263 m/s (KW automotive, u. å).
- Testtriggen måste klara de krafter som uppkommer vid provning. De dämpare som ska testas från KW har i sitt hårdaste utförande en maximal dämpkraft på 1 880 N i kompression och 1 680 N i returdämpning vid 0.25 m/s hastighet (KW automotive, u. å).
- Testtriggen ska kunna justeras inom rimliga gränser för att testa andra dämpare än de som används av CFS idag.
- Konstruktionen skall få plats på en halv EU-pall, 800mm x 600mm.
- Insamling av mätdata för last vid olika kompressions- och returhastigheter samt vid olika slaglängder.

- Loggad data av mätvärden ska vara enkelt erhållen och bearbetad av CFS med tydlig visualisering av erhållen data.

3.1.2 Säkerhetskrav

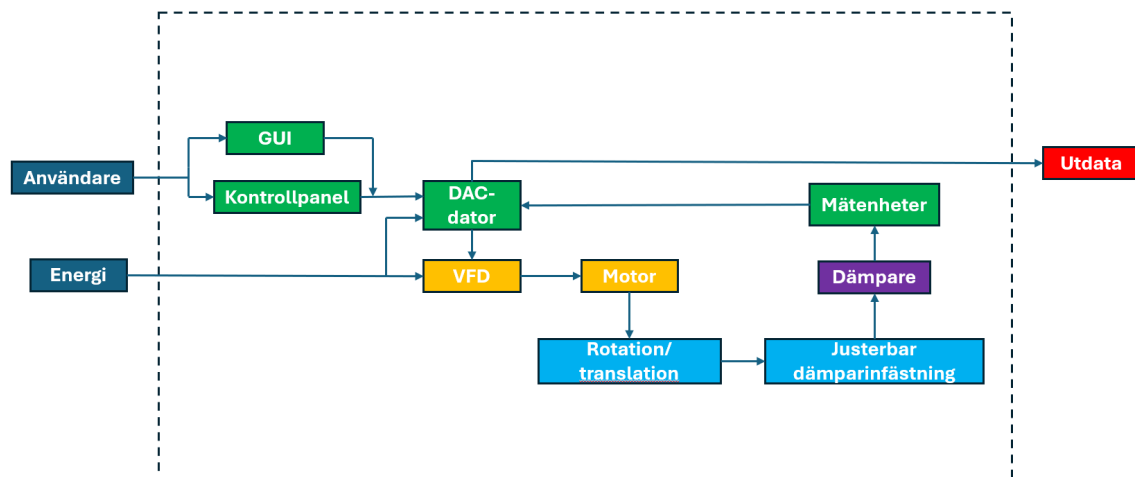
För att testtriggen ska vara säker att använda och uppfylla gällande direktiv för maskinbyggnation, måste följande säkerhets- och lagkrav uppfyllas. Kraven baseras på de krav Arbetsmiljöverket ställer på maskiner (Arbetsmiljöverket, 2023).

Följande krav ställs på grund av säkerheten:

- Roterande och rörliga delar ska vara inbyggda eller försedda med skyddskåpor.
- En lättillgänglig nödstoppknapp ska finnas integrerad i styrsystemet.
- Maskinen får inte starta efter avbrott utan att startknappen trycks ned.
- De rörliga delarna där det finns klämrisk får inte vara åtkomliga under drift.
- Den elektriska utrustningen ska uppfylla industriella krav och standarder.

3.1.3 Funktionsmodell

För att ge en översikt över samspillet mellan de olika delsystemen visualiseras delfunktionerna i en funktionsmodell och visas i Figur 3.1. Figuren är färgkodad efter mekanisk konstruktion markerad i ljusblått, högspänningssystem markerat i gult, lågspänning i grönt och utomstående komponenter i lila.



Figur 3.1: Funktionsmodell.

3.2 Mekanisk konstruktion

Den mekaniska konstruktionen rör i detta fall både statik och dynamik. Det statiska syftar på de delar som är till för att sammanhålla andra delar, exempelvis ramstruktur och lagersäten. Det dynamiska syftar motsvarande på delar som är i

rörelse, exempelvis rullningslager.

3.2.1 Överföring av rotation till translation

Dämparen testas under dess kompressions- och returcykel vilket är ett linjärt rörelseförlopp. Då den drivande komponenten är en elmotor där utgående energi är i form av rotation måste det finnas ett delsystem som omvandlar rotationsrörelse från elmotorn till translationsrörelse till dämparen.

3.2.2 Testbara hastigheter

Under kompression och retur av dämparen kommer flera parametrar för testerna vara av intresse. En av dessa är för vilken hastighet dämparen skall testas vid. Det är därför viktigt att drivsystemet tillåter de hastigheter som önskas testas. Detta kan exempelvis vara någon form av utväxling.

3.2.3 Justerbar dämparinfästning

Stötdämpare finns i många olika varianter där en parameter som kan skilja sig är slaglängden och inspänningslängden. Maskinen måste därför ge möjlighet till att testa flera olika slag- och dämparlängder.

3.2.4 Ramstruktur

Ramen har två huvudsakliga funktioner. Den första är att ge en plats för övriga komponenter att monteras så det hålls samman och den andra är att ge styvhet till konstruktionen.

3.3 Högspänningssystem

För att få systemets rörliga delar att fungera behövs ett elektriskt system med motor och styrenhet. Detta system kallas för högspänningssystem då den givna motorn kräver trefas och matas med 400 V växelström. Ett komplett kopplingschema finns i Bilaga E.

3.3.1 Elmotor

Projektet har av CFS blivit givna en 2-polig trefas asynkronmotor av modell *ABB m2aa 112m* som används i bygget (ABB, 2008). Motorn matas via en frekvensomriktare för att kunna justera hastigheten.

3.3.2 Frekvensomriktare

Projektet tilldelades även en frekvensomriktare av modell

ABB SAMI GS, även kallad VFD (Variable-frequency drive) (ABB, u. å). Den omvandlar nätspänningens frekvens till den efterfrågade frekvensen som ger motorn ett önskat varvtal. Dettas ställs visa frekvensomriktarens analoga ingångar.

3.4 Lågspänningssystem

Lågspänningssystemet innefattar styr- och mätsystem. Detta då de i huvudsak matas med 24 V likström. Lågspänningssystemet innefattar även ett användargränssnitt där en användare ska kunna se mätvärden i realtid samt spara dem. Denna data ska senare kunna användas hos CFS för framtida utveckling eller justering av dämparna. Exempelvis kan denna data användas för att skapa kraft-hastighetskurvor som representerar dämparens karakteristik.

3.4.1 Sensorer och mätenheter

Olika sensorer behövs för att mäta den data som efterfrågas, detta består av sensorer för mätning av dämparkraft, dämparhastighet och dämpartemperatur. Dessa sensorer måste väljas så de passar de mätområden som ska mätas.

3.4.2 Styrenhet

Det är frekvensomriktaren som direkt styr motorn, men det måste finnas ett system som bestämmer hur frekvensomriktaren ska styra. För att styra frekvensomriktaren och ta emot signalerna från sensorerna måste någon form av dator användas. För projektet kunde en *National Instruments USB6001* lånas vilket är en enhet med flertalet analoga in- och utgångar. Denna enhet är avsedd för bland annat inkoppling av sensorer och dataloggning. (National Instruments, u. å).

3.4.3 Kontrollpanel

För att starta och stoppa maskinen bör användaren ha enkel tillgång till en kontrollpanel med start-, stopp- och nödstoppsknappar.

3.4.4 Användargränssnitt

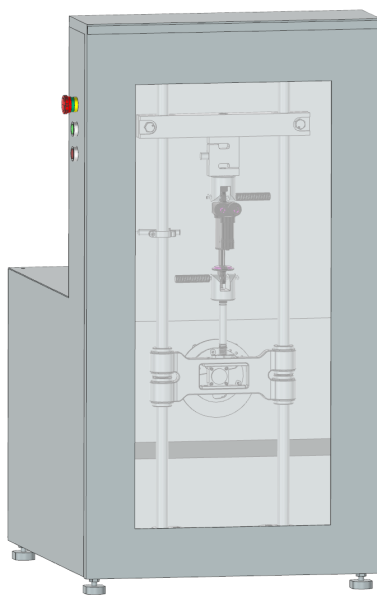
För att en användare lätt skall kunna styra maskinen måste ett användargränssnitt utvecklas. Detta innebär att användaren ska kunna styra systemet från gränssnittet och läsa ut uppmätt data. Den givna styrenheten eller DAQ-datorn (Data Acquisition) är kompatibel med LabVIEW mjukvara som stödjer utveckling av användargränssnitt.

4

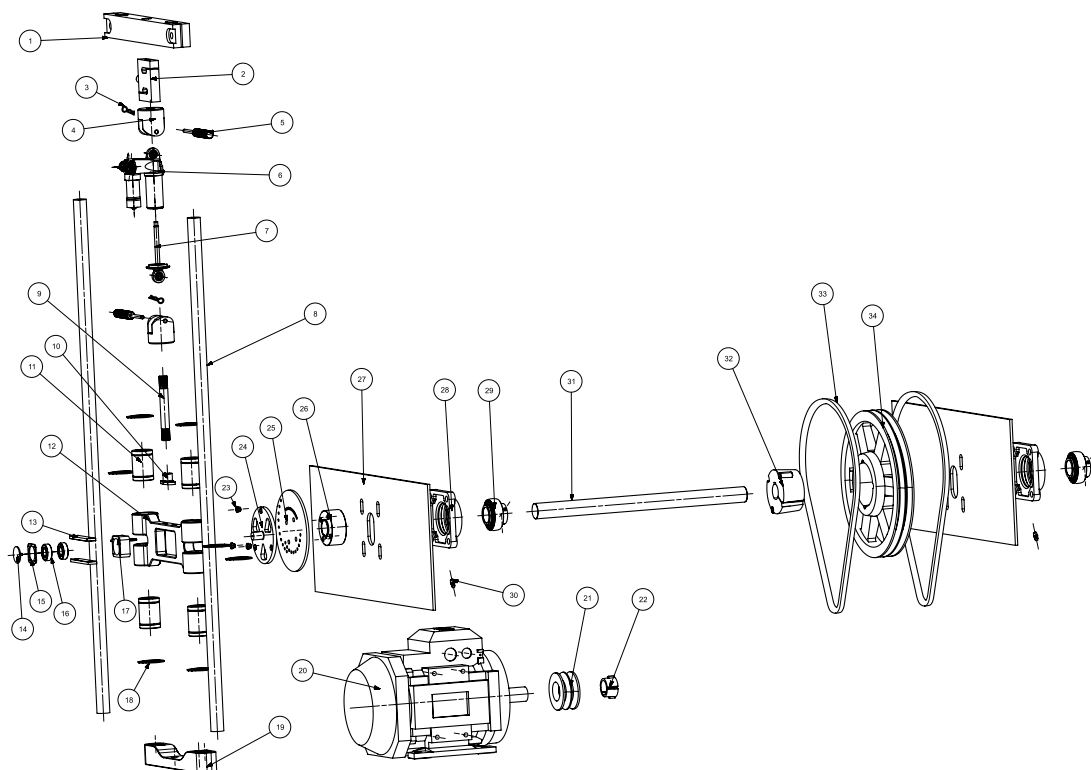
Koncept

I detta kapitel presenteras det valda huvudkonceptet för stötdämpardynamometern. Nedan beskrivs systemets övergripande layout och de fundamentala principerna för hur rotation omvandlas till linjär translation samt hur elsystemet integreras i den fysiska strukturen.

4.1 Mekanisk konstruktion



Figur 4.1: ISO-vy CAD



Figur 4.2: Sprängskiss av det mekaniska systemet utan tillhörande fästelement

Konstruktionen visas med ISO-vy i Figur 4.1 och med sprängskiss i Figur 4.2 med tillhörande Tabell 4.1.

Tabell 4.1: Beskrivning av komponent 1 till 34

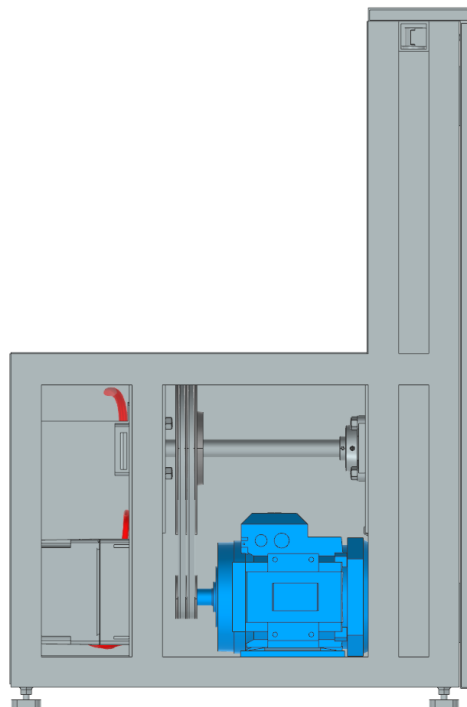
Nr	Komponent
1	Toppinfästning
2	Lastcell
3	2 x Säkerhetssprint
4	2 x Dämparinfästning
5	2 x Sprint
6	Stötdämparens övre del
7	Stötdämparens undre del
8	2 x Stång
9	Distans till scotch yoke
10	Infästning för distans
11	4 x Linjälager
12	Scotch yoke (Ok)
13	2 x Glidplattor
14	Stopp för kullager
15	Stopplatta för kullager
16	2 x Kullager

Fortsätter på nästa sida...

Tabell 4.1 – fortsättning från föregående sida

Nr	Komponent
17	Lagerhub
18	8 x Segersäkring för linjärlager
19	Undre infästning
20	Motor
21	Remskiva SPA67
22	Bussning för Remskiva Spa67
23	3 x Insert
24	Tappskiva
25	Rotationsskiva
26	Nav
27	2 x Lagerplåt
28	2 x Lagerbock
29	2 x Kullager för Lagerbock
30	2 x Smörjnippel
31	Axel
32	Bussning för Remskiva SPA280
33	2 x Rem
34	Remskiva SPA280

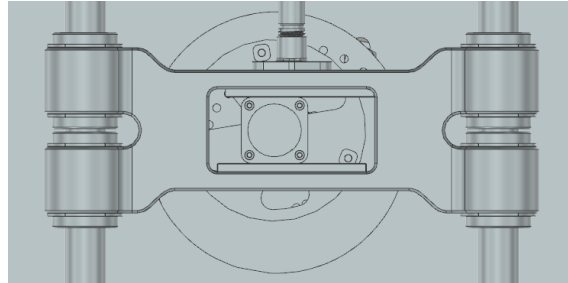
Systemet drivs av den givna elmotorn, men för att denna skall orka driva systemet måste utgående moment från motorn växlas ned. Detta görs med hjälp av en remväxel som driver en axel och visas i Figur 4.3.



Figur 4.3: Sidovy CAD som visar bland annat motor och remväxel.

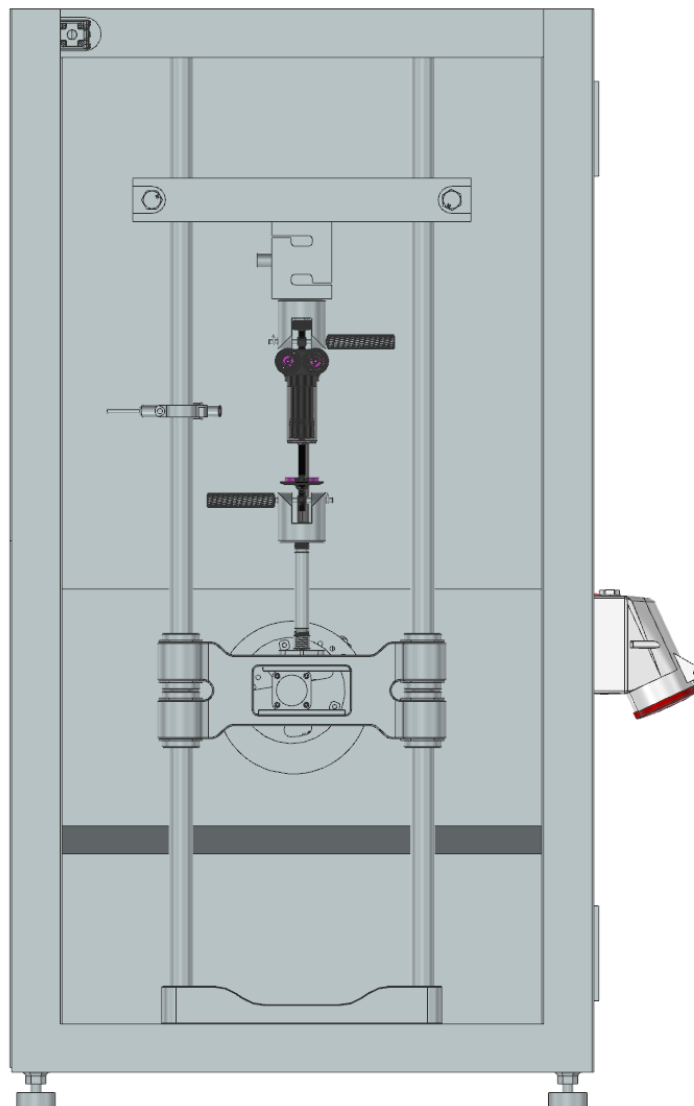
4. Koncept

För att sedan föra över rotationsrörelse från axeln till translation åt dämparen används en scotch yoke-mekanism. Den fungerar genom att en tapp med en lagerhubb roterar på en skiva och förskjuter ett ok i vertikal riktning. Detta visas i Figur 4.4.



Figur 4.4: Scotch Yoke mekanismen.

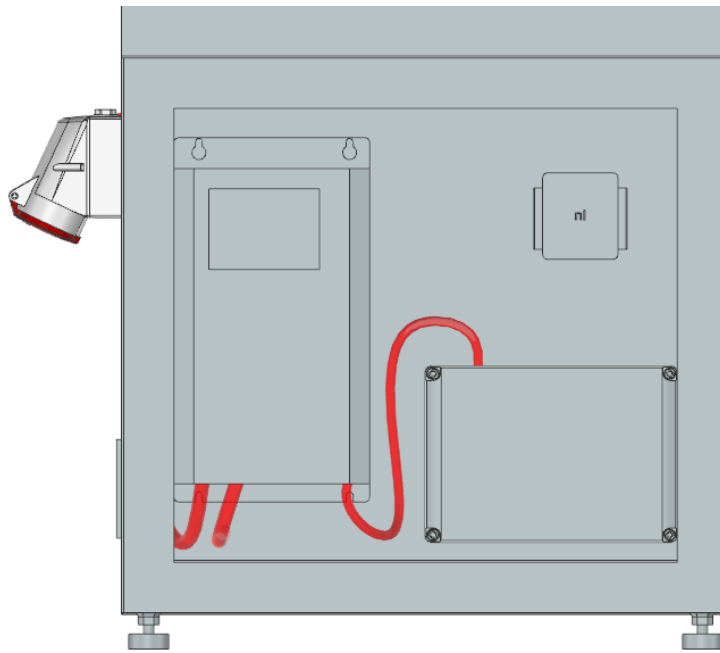
Scotch Yoken glider längs två stänger som är monterade i bottenplattan. På den övre sidan av stängerna sitter ett tvärgående stag som är fastklämt i stängerna. Detta är den övre dämparinfästningen och visas i övre delen av Figur 4.5. Eftersom staget sitter klämt på plats, går detta att förflytta för att tillåta montering av olika långa dämpare.



Figur 4.5: CAD med dämparinfästning framifrån.

4.2 Elsystem

Frekvensomriktaren sitter till vänster i det bakre partiet av testtriggen och en trefashandske är monterad på sidan som kan ses i Figur 4.6. Här ingår även elmotorn som kan ses i Figur 4.3. Dessa komponenter ingår i högspänningssystemet.



Figur 4.6: Elkomponenterna i CAD sett bakifrån.

Lågspänningssystemet är sedan det system som styr frekvensomriktaren samt samlar in mätdata. Styrenhet med spänningsmatning sitter till höger i det bakre partiet som kan ses i Figur 4.6. Högt upp på vänster sida av testriggen finns kontrollpanelen med start-, stopp- och nödstopp som kan ses i Figur 4.1. Sensorerna för kraft, hastighet och temperatur sitter kring dämparen och dess övre infästning som kan ses i Figur 4.5.

5

Konstruktion och tillverkning

De tidigare benämnda delsystemen innefattar alla problem som måste lösas. Saker som generellt måste tas hänsyn till är att komponenter måste väljas som klarar aktuella belastningar och uppfyller de krav som ställs. I systemet finns ett antal kritiska komponenter. Deras konceptval kommer därför att beskrivas mer noggrant än andra.

5.1 Ram

Ramen är tillverkad av 50 mm x 50 mm fyrkantsprofil av stål med en väggjocklek på 4 mm som är uppdelat i olika ”avdelningar”. Den främre delen är den högsta för att ge plats till scotch yoken, dämparen och dämparinfästningen. Mittdelen är motorutrymmet med plats för remväxeln och längst bak är ett utrymme avsett för elkomponenter.

På utsidan monteras plåt som agerar sprängskydd samt förhindrar vidrörning av rörliga komponenter. Fram monteras en dörr med plexiglasfönster så maskinen är fullständigt kapslad vid körning samtidigt som dämparrörelsen kan ses.

5.1.1 Konstruktionsmetod

Valet av fyrkantsprofilen och väggjocklek gjordes utifrån det material som fanns tillgängligt i Prototypplabbet samt att det anses vara väl överdimensionerat. Detta med hänsyn till de krafter som dämparen kommer utsätta konstruktionen för. Ramen konstruerades med fokus på styvhet i det vertikala ledet där dämparen kommer fästas. Detta eftersom det kommer vara den huvudsakliga riktningen på kraften som ramen måste motstå.

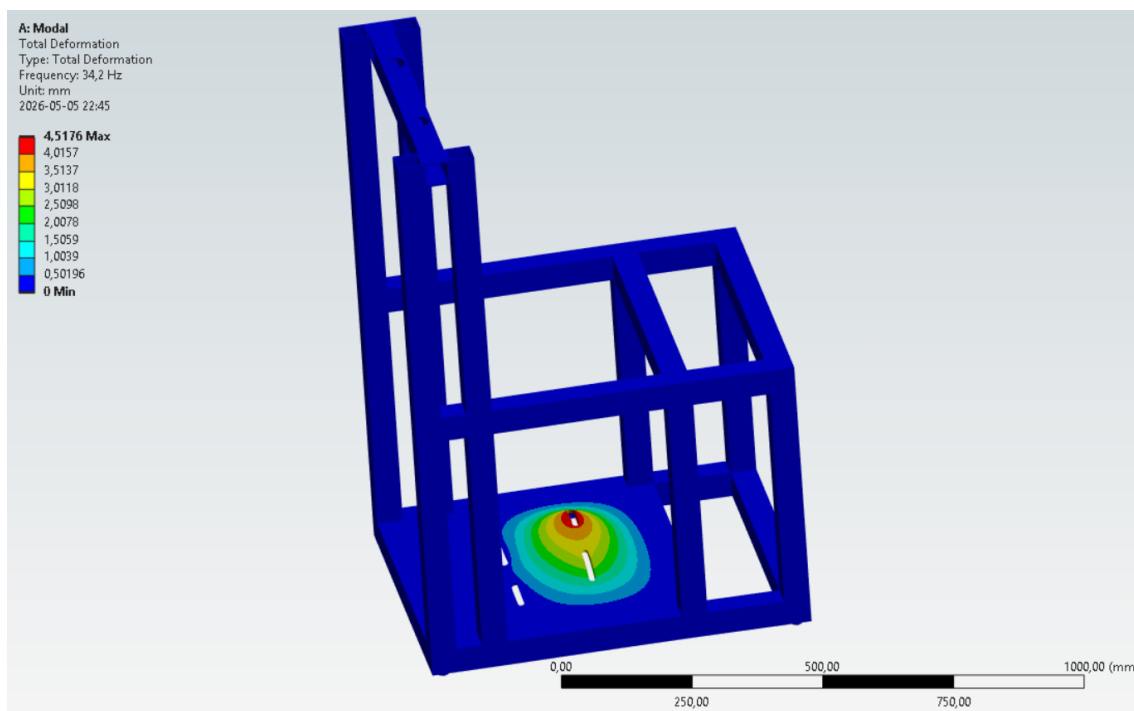
En förenklad vibrationsanalys genomfördes för att kunna säkerställa att ramens egenfrekvenser inte uppnår excitationensfrekvensen när maskinen körs. Högsta excitationensfrekvensen beräknades genom det fall då maskinen körs i högsta hastighet (0.26 m/s) och har kortaste slaglängden (5mm).

$$\frac{0.263}{0.005} = 52.6 \text{ rad/s} \quad (5.1)$$

Med varvtalet på scotch yoke-mekanismen kan den högsta förväntade excitationensfrekvensen beräknas.

$$\frac{52.6}{2\pi} \approx 8.4 \text{ Hz} \quad (5.2)$$

Detta är frekvensen som resultaten från en grov analys i Ansys Modal Analysis jämfördes med. Geometrin för ramen och bottenplattan/motorinfästningen importerades till Ansys. För att representera massan av tunga komponenter, såsom motorn och dämparinfästningens övre delar, användes funktionen *Point Mass* i komponenternas ordinarie fästpunkter. Detta gjordes för att undvika att importera stora mängder geometri och förenkla analysen.



Figur 5.1: Ramens första egenmod.

Denna grova analys visade en lägsta egenfrekvens på cirka 34 Hz, vilket gav en säkerhetsfaktor på 4 till högsta förväntade excitationfrekvens. Vidare finns många möjligheter att vid behov lägga till triangulering i ramen samt förstärkning under motorinfästningen där den första moden i Figur 5.1 visar sig som svängningar i bottenplattan/motorinfästningen.

Bygget av ramen skedde genom att kapa fyrkantsprofil till korrekta längder och sedan MIG-svetsa ihop ramen. Hänsyn fick tas för att se till att ramen blev tillräckligt rak, särskilt där kritiska komponenter ska monteras. På botten svetsades en mutter i varje hörn för att tillgodose montering av justerbara tassar. För rostskydd och estetiska skäl lackerades ramen.

Plåtarna monterades med skruv och gängade hål i ramen för att möjliggöra enkel demontering vid arbete eller underhåll. Även dessa lackerades för rostskydd och estetiska skäl.

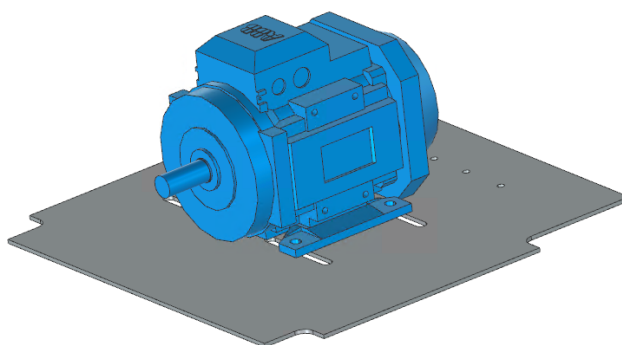
5.2 Motorinfästning

För att åstadkomma en robust motorinfästning som samtidigt tillåter justering och remspänning, integrerades fästet direkt i ramens bottenplatta. Utöver att utgöra ett stabilt fundament för motorn fungerar komponenten även som konstruktionens golv och agerar fästpunkt för bland annat de vertikala stängerna.

5.2.1 Konstruktionsmetod

Infästningens plåttjocklek dimensionerades till 5 mm för att säkerställa erforderlig stabilitet. Bottenplattan utvärderades därefter i samband med ramens övergripande vibrationsanalys i syfte att utesluta resonans och självsvängning till följd av maskinens vibrationer.

Då kraftöverföringen sker via SPA kilremmar, krävs en pålitlig funktion för remspänning. Därför konstruerades motorns fästmönster med spårformade hål (Figur 5.2), vilket möjliggör en steglös linjär förskjutning av motorn. Denna lösning tillåter att avståndet mellan remskivorna justeras för att spänna remmarna, utan att skivornas linjering påverkas. Remskivan som monteras på den andra axeln riktades in med laser för att säkerställa att den linjerade med motorns remskiva. Efter montering kunde remskivorna då endast flyttas i samma plan.



Figur 5.2: Motorinfästning med monterad motor.

För att uppfylla ställda toleranskrav tillverkades detaljen genom vattenskärning, en metod som säkerställer fina snittytor och snäva dimensionstoleranser (Water Jet Sweden, u. å). Efter noggrann inmätning integrerades slutligen bottenplattan i den övergripande ramkonstruktionen (figur 5.3). Sammanfogningen utfördes med TIG-svetsning, vilket valdes för att metoden medger hög precision och utmärkt hållfasthet (ESAB, 2024).



Figur 5.3: Bottenplattan svetsad i ramen.

5.3 Drivsystem och rullningslager

Gruppen valde att dimensionera lager för oändlig livslängd. För att konstruktionen ska uppnå detta är lagervalet i konstruktionen mycket viktig. Därav har lagerdimensionering för de högst belastade och mest kritiska lagren utförts. De lager som ansetts mest kritiska i konstruktionen är de två lagerenheterna för den drivna axeln samt två lagren som är placerade i centrum på scotch yoke-hubben. De lager som inte utförts beräkningar på är de fyra linjärlagren som löper längs de två vertikala rundstängerna.

Axeln drivs genom tvåspårig remdrift från motorn via två remskivor. Valet av remdrift via remskivor gjordes då varvtalet från motorn krävde nerväxling samt att vridmomentet i motorn var för lågt. En annan utväxling som exempelvis planetväxling ansågs onödigt komplicerat för arbetet samt skulle inte rymmas inom tidsramen för utvecklingen.

5.3.1 Beräkningar

Lagerdimensioneringen har beräknats med L_{10} -livslängd, den internationella branschstandarden. Denna metod innebär att den nominella livslängden som erhålls vid beräkning kan garanteras av 90% av identiska tillverkade lager. Denna metod används för att kunna bortse från de fall då lagren vid produktion tillverkats felaktigt (SKF,

2018).

Scotch yoke-designen i denna konstruktion innebär att lagren utsätts för en cykliskt varierande last enligt en sinusformad kurva. Vad detta innebär för lagerdimensioneringen är att Palmgren-Miner-regeln för kumulativ utmattning måste tillämpas, (Mägi m. fl., 2017). En regel framtagen av den svenske Arvid Palmgren och den amerikanske Milton Miner.

Livslängden på lagerbockarna beräknades till 32418 timmar respektive 1429 timmar vilket teoretiskt sett motsäger oändlig livslängd. Livslängden klassas dock fortfarande som oändlig då konstruktionen aldrig antas köras såpass länge. För lagren i navet på scotch yoken beräknades livslängden till 9626 timmar. Exakta beräkningar i Python-kod kan ses under Bilaga D.

Den högst uppmätta translationshastighet för dämparna som CFS testat är (0.263 m/s) vid 25 mm slaglängd. Stötdämpardynamometern bör därmed klara av att köra dämparen med denna hastigheten och slaglängden. Motorn som tillhandahölls för arbetet var en 2-polig asynkronmotor med ett högt nominellt varvtal på 2850 rpm. Därmed krävdes en mekanisk nedväxling av motorns varvtal för att samtidigt erhålla ett större vridmoment.

Tabell 5.1: Beräkningsvärden nedväxling

Beräkningsvärden nedväxling		
F_{max}	1880	[N]
L_{slag}	25	[mm]
v_{max}	0.263	[m/s]
U_{motor}	380–420	[V]
f_{motor}	50	[Hz]
ω_{motor}	2850	[rpm]
P_{motor}	4.0	[kW]
I_{motor}	7.8	[A]
$\cos \varphi_{motor}$	0.91	[-]

Från motorns märkvärden (ABB, 2003) och de önskade testscenarierna från CFS genomfördes enklare beräkningar för vilken utväxling som krävdes för motorn. Det maximala vridmomentet som stötdämparen genererar vid testtriggens drivskiva beräknades enligt Ekvation 5.3.

$$T_{dampner} = F_{max} \cdot \frac{L_{slag}}{2} = 23.5 \text{ Nm} \quad (5.3)$$

Dämparen skapar alltså ett moment på 23.5 Nm för den maximala belastning som CFS uppmätt. Motorns faktiska vridmoment utan utväxling beräknades enligt Ekvation 5.4.

$$T_{motor} = \frac{P_{motor}}{\omega_{motor} \cdot \frac{\pi}{30}} = 13.4 \text{ Nm} \quad (5.4)$$

Detta innebär att motorns moment måste ökas med en utväxlingsfaktor på minst 1.76 (då $23.5/13.4 \approx 1.754$). Detta gäller dock enbart då motorn drivs kontinuerligt på dess maximala varvtal, något som inte är fördelaktigt för stötdämpardynons livslängd. Därmed gjordes ett val att växla ner motorn med en faktor fyra (4:1) som en kompromiss för att uppnå rimligt motorvarvtal vid olika inställda slaglängder utan att överskrida motorns maxvarvtal på 2850 rpm. Denna nedväxling resulterade i ett maximalt drivmoment på 53.6 Nm vid drivna änden av axeln. Detta valet gav en viss säkerhetsmarginal samt att translationshastigheten på 0.263 m/s nås redan vid ett varvtal runt 800 rpm vid 25 mm slaglängd eller 2000 rpm vid 10 mm slaglängd. Denna utväxlingen ger även CFS ett visst spelrum för att testa hårdare dämpare samt högre hastigheter.

5.3.2 Konstruktionsmetod

Utifrån beräkningarna och med hänsyn till tillverkningsekonomi, köptes standardiserade lagerbockar (SKF FY 30 TF) in för drivaxeln. För hubben i scotch yoken där de två inkapslade, enradiga spårkullager sitter monterade tillverkades ett lagersäte för att säkra lagren i axiell riktning. Utanpå hubben fästes även en platta för att ge en ytterligare säkerhet över hubben samt för att ge ett visst skydd för lagren. Drivaxelns yttre diameter dimensionerades efter lagerbockarna inre diameter på 30 mm, Design for Availability (SKF, 2018). Det gjordes inga beräkningar gällande axelns hållfasthet då 30 mm diameter ansågs väl tilltaget.

Tillverkningen av drivaxeln utfördes i Prototyplabbet. Axeln svarvades ned till rätt toleranser för att säkerställa passning mot lagren. Två kilspår frästes in i axeln på vardera sida. Remskivan fästes över det ena kilspåret (drivande ände) med en klämbussning. På den drivna änden av axeln fästes axelnävet som ger kraftöverföringen till scotch yoken.

Remskivorna köptes in externt för att säkerställa passningen mot klämbussningarna. De remskivor som köptes in var 2-spåriga SPA 67 samt SPA 280; specifikationerna för de valda remskivorna redovisas i Tabell 5.2 och Tabell 5.3. Dessa remskivor valdes då de gav en ungefärlig utväxling på (4:1) samt rymdes inom ramens begränsade storlek. Att remskivorna valdes till 2-spåriga grundades i den begränsade remspänningen i motorinfästningen. Genom att fördela kraftöverföringen över flera remmar ökar den totala friktionsytan, vilket resulterar i att remmarna inte behöver spännas lika hårt för att överföra samma vridmoment (Mägi m. fl., 2017).

Tabell 5.2: Specifikation för drivande remskiva (Motoraxel)

Drivande remskiva		
Beteckning	SPA 67	[-]
Profil	SPA	[-]
Antal spår	2	[-]
Delningsdiameter (d_{d1})	67	[mm]
Ytterdiameter (d_{y1})	72.5	[mm]

Tabell 5.3: Specifikation för driven remskiva (Drivaxel)

Driven remskiva		
Beteckning	SPA 280	[-]
Profil	SPA	[-]
Antal spår	2	[-]
Delningsdiameter (d_{d2})	280	[mm]
Ytterdiameter (d_{y2})	285.5	[mm]

$$u = \frac{d_{d2}}{d_{d1}} = \frac{280}{67} \approx 4.18 \quad (5.5)$$

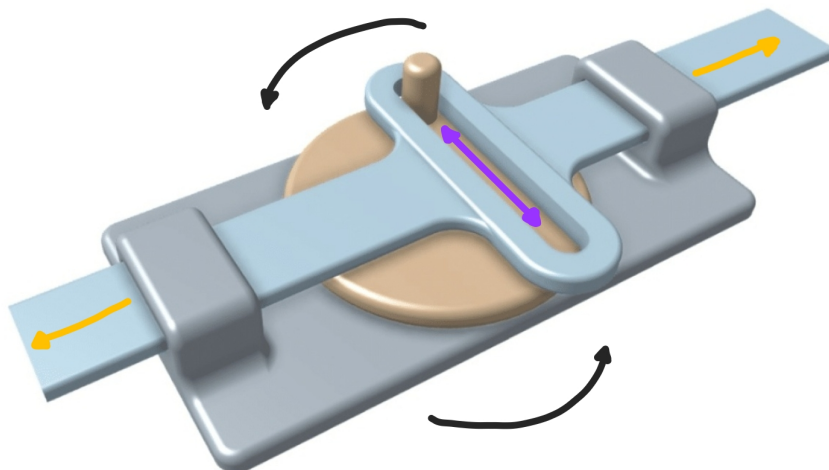
De valda remskivorna gav alltså en utväxling på (4.18:1) vilket gav ytterligare en viss marginal för stötdämpardynon och vilka dämpare som kan testas.

5.4 Scotch yoke

Då det från CFS sida hade vid arbetets start givits en 2-polig asynkronmotor som skulle utnyttjas vid konstruktionen av stötdämpardynon. Detta innebar för arbetet att en roterande rörelse behövde konverteras till en vertikal translation. För att göra detta mekaniskt undersöktes främst två olika principer samt undersökning av andra tillverkares lösningar. Dessa två principer bestod av en konventionell vevstaxmekanism (slider-crank) samt en scotch yoke lösning. Där scotch yoke lösningen används av ledande aktörer inom stötdämpartestning (LABA7, 2024). Anledningen till att scotch yoke lösningen föredrogs för stötdämpartestning är mekanismens harmoniska hastighetsprofil. En traditionell vevmekanism introducerar olinjära rörelser beroende på vevstakens vinkel, vilket leder till en osymmetrisk hastighetsprofil mellan kompression- och returslag. Scotch yoke-mekanismen eliminerar detta vinkelberoende och genererar en ren sinusvåg.

Scotch yoke-mekanismen fungerar genom en monterad tapp på en rotationsdisk som enbart tillåts löpa längs ett linjärt spår. På så sätt omvandlas den roterande rörelsen till en rätlinjig translationsrörelse som följer den sinusformade hastighetsprofilen (Jiga, 2025). För att erhålla en intuitiv förståelse för hur scotch yoke-mekanismen

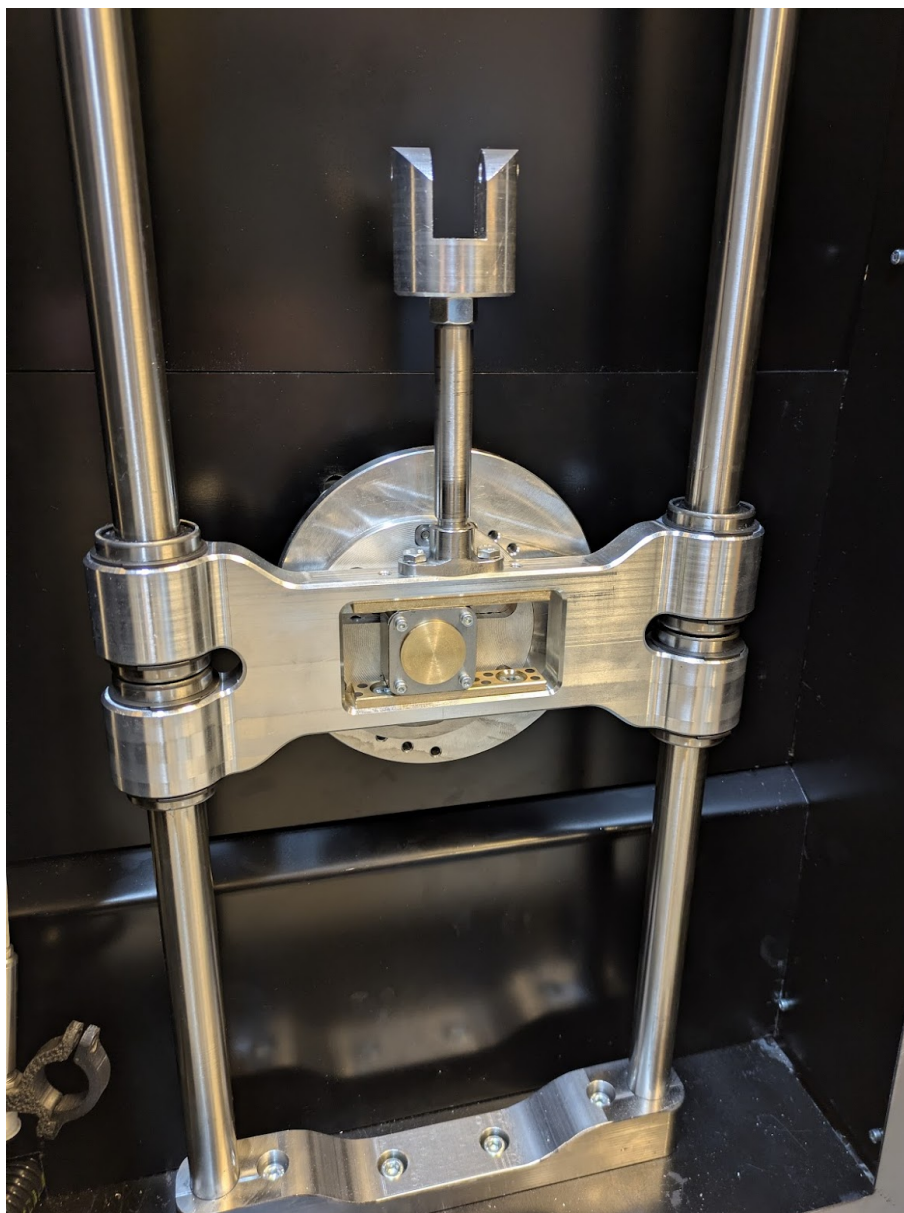
fungerar se Figur 5.4. Rotationsskivan roterar med de svarta pilarna. Tappen på skivan tillåts enbart löpa längs det linjära spåret illustrerat av den lila pilen. Detta resulterar i en translation enligt de gula pilarna.



Figur 5.4: Scotch yoke-mekanism som omvandlar rotation till linjär rörelse. (Jiga, 2025).

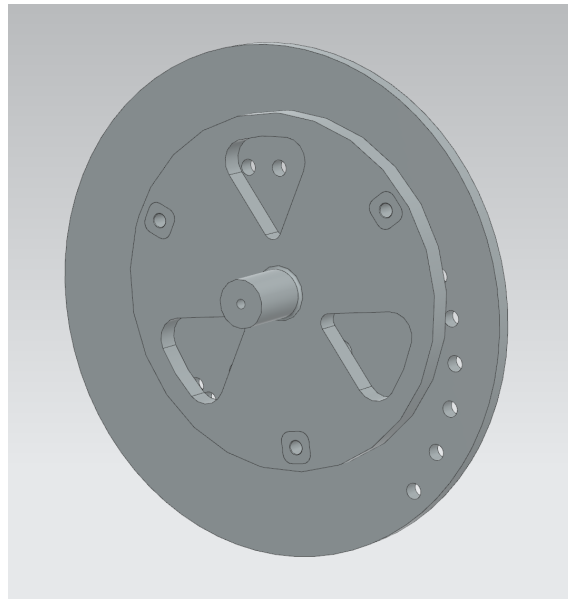
5.4.1 Konstruktionsmetod

Med den traditionella scotch yoke-designen som visas i Figur 5.4 finns det vissa svagheter som skulle begränsa livslängden och val av slaglängd på dämpare vid testning. Då stötdämpardynon tillverkas i syfte för att användas av CFS teamet under längre tid med olika dämpare, inställningar och slaglängder åtgärdades dessa problem. En konstruktion enligt Figur 5.5 togs fram för att åtgärda dessa problem.



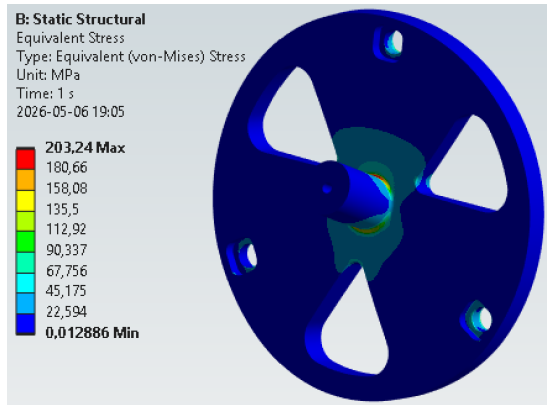
Figur 5.5: Den färdig konstruerade scotch yoke konstruktionen.

För att tillåta att tester utförs med olika slaglängder behövde tappens på scotch yoken kunna flyttas i förhållande till rotationscentrum på den roterande skivan (representeras av den gulgrå skivan i Figur 5.4). För att justera slaglängden övervägdes olika konstruktionslösningar. Ett tänkbart alternativ var att försä drivskivan med ett antal urborrade hål med olika avstånd från centrum där tappens kunde monteras. Detta insågs dock begränsa justeringsmöjligheterna avsevärt då avståndet mellan dessa urborrade hål begränsas av tappens diameter och tillräcklig godstjocklek mellan hålen, (Mägi m. fl., 2017). Då tappens tar emot hela kraften från dämparen ansågs denna lösning inte uppfylla de krav på ställbarhet och hållfasthet som arbetet kräver. Istället skapades en påläggskonstruktion som kan ses i Figur 5.6.

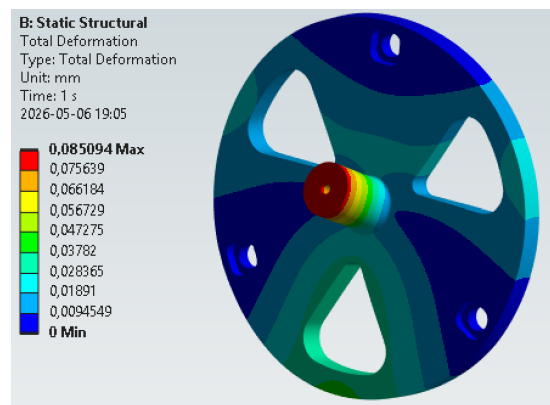


Figur 5.6: Tappskiva monterad på rotationsskiva, dessa är monterade på axeln med axelnavet på baksidan.

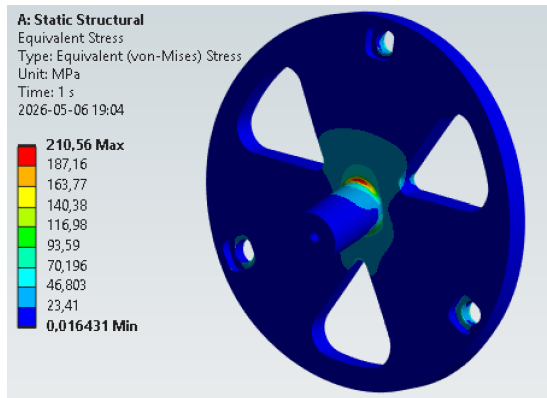
Denna konstruktionen tillåter att en platta med tappen kan monteras på rotations-skivan med tre infästningspunkter längre ut. Tappens radie spelar då inte någon roll för placering eller hållfastheten för rotationsplattan. Dock innebär denna konstruktionen att en större massa placeras utanför rotationssymmetrin. För att minska massan på tapp skivan tillverkades denna av aluminium (Ashby, 2016), samt topologioptimerades med hjälp av Ansys Mechanical (Ansys Inc, 2024), se Figur 5.7a till 5.7d för spänningar och förskjutningar för tappskivan. Vikten på skivan blev då 152 gram, denna massan och dess bidrag till vibrationer beaktades vid vibrationsanalysen av ramen. Med dessa åtgärder kan dämparens slaglängd varieras mellan 5-50 mm, dessutom med fina steg emellan, se Figur 5.8 för detaljerad vy över slaglängdsinställningarna. Se även Figurerna 5.9a till 5.9c för tappskivans montering vid olika slaglängd.



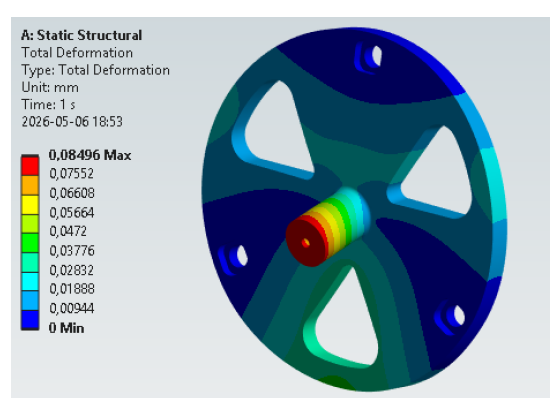
(a) Spänning, lastfall 1, med 5% i konvergens.



(b) Förskjutning, lastfall 1, med 5% i konvergens.



(c) Spänning, lastfall 2, med 5% i konvergens.



(d) Förskjutning, lastfall 2, med 5% i konvergens.

Figure 5.7: Resultat från topologioptimering och FEM-analys av tappskivan.

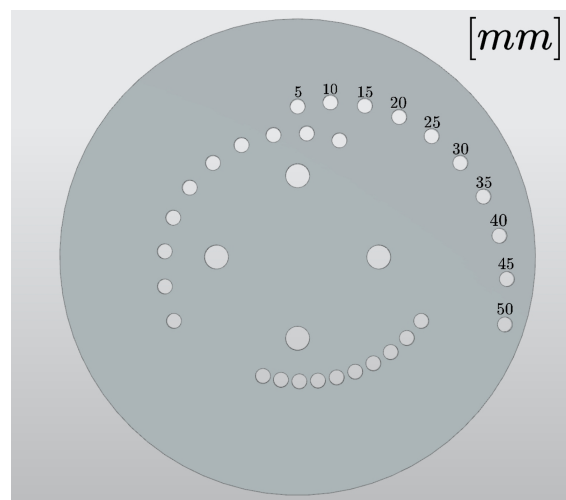
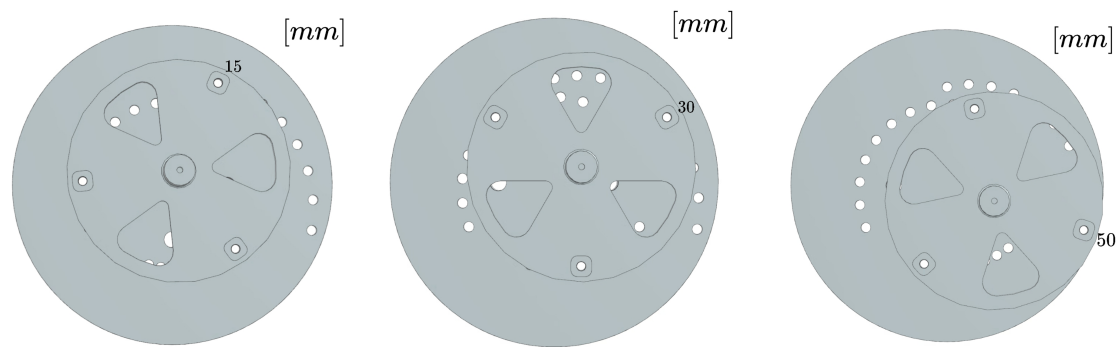


Figure 5.8: Rotationsskiva för scotch yoke, visar vy över slaglängds inställningarna och hålbilden.

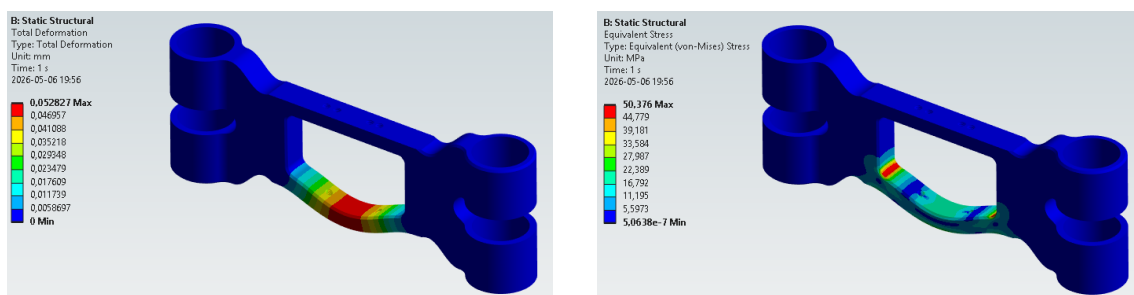


(a) Inställning 3 (15 mm). (b) Inställning 6 (30 mm). (c) Inställning 10 (50 mm).

Figur 5.9: Montering av tappskivan vid tre olika slaglängdsinställningar.

Då tappen i scotch yoke-mekanismen tar upp all kraft som dämparen utsätts för leder det till stora påfrestningar och slitage. För att minska framförallt slitaget som skulle uppstått vid en konstruktion likt Figur 5.4, tillverkades nav med ett kullager istället för en traditionell glid tapp, se lagerhubben i Figur 5.5. Denna hubben placerades på tappen för att sedan tillåtas löpa inuti längs det linjära spåret i scotch yoken. Det linjära spåret försågs även med glidplattor av brons med självsmörjande grafitinsatser för att minska friktionen mellan navet och spåret, (Piping Technology & Products, u. å). Dessa glidplattor kan även mycket enkelt bytas ut vid högt slitage. Det minskade slitaget och friktionen är kritisk för att erhålla goda mätresultat av dämparen samt för att göra det möjligt att använda dämpardynamometern under längre tid framöver.

För okets konstruktion i scotch yoken har vissa åtgärder tagits för att hålla nere vikten, friktionen samt hålla hög hållfasthet. För att säkra hållfastheten för oket gjordes en FEM-analys med Ansys Mechanical (Ansys Inc, 2024), se Figur 5.10a och Figur 5.10b. Då en högre massa på oket kan innebära att konstruktionen vibrerar kraftigt hölls vikten nere genom att använda aluminium 7075 (Pennex, 2026). Infästningen mot de vertikala rundstängerna har även försetts med linjärkullager för att oket ska löpa fritt. Lägre friktion mellan oket och de vertikala rundstängerna resulterar i att finare mätvärden kan erhållas.



(a) Total deformation.

(b) Von Mises-spänningar.

Figur 5.10: FEM-analys av scotch yoke-oket vid maximal kritisk last, med 5% i konvergens.

5.5 Dämparinfästning

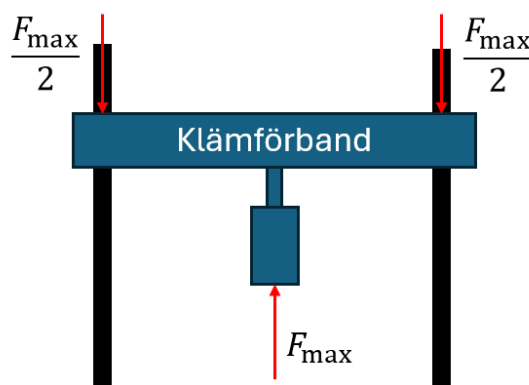
Stötdämparen sitter monterad mellan två infästningspunkter och säkras med två sprintar som monteras genom dessa fästen vilket visas i Figur 5.14. Den undre fästpunkten är monterad i scotch yoken och den övre i en toppinfästning. Denna toppinfästning sitter monterad med två klämförband i samma vertikala stänger som scotch yoken glider längs.

Valet av slaglängd som stötdämpardynon ska testa har baserats på önskemål från CFS 26 och slaglängden som ska testas är 25 mm. Dock finns det justeringsmöjligheter inbyggt i konstruktionen för att tillåta CFS att testa längre samt kortare slaglängder av samma stötdämpare. Designen av dynon möjliggör att dämpare av andra storlekar och modeller kan monteras för att inte begränsa framtida justeringar av bilen.

5.5.1 Konstruktionsmetod

Konstruktionen av dessa komponenter präglades av vilka maskiner och tillverkningsmetoder som kan tillhandahållas i Chalmers prototypplabb.

Toppinfästningen som monteras med två klämförband dimensionerades efter att klara en kraft på minst 1000 N per klämförband (friläggning visas i Figur 5.11) samt att den storleksmässigt skall vara ett naturligt inslag i testtriggen. Komponenten tillverkades med CNC fräsning, borrar och sågning i konstruktionsstål.



Figur 5.11: Friläggning av dämparinfästning.

Beräkningarna för klämförbanden följer enligt nedan. Innan beräkningarna valdes skruvstorleken M12 och åtdragningsmoment 81 Nm (Materialexperten, 2026). Samtliga värden syns i Tabell 5.5. Formlerna och värdena för beräkningarna är hämtade ur Mägi m. fl. (2017).

Tabell 5.4: Beräkningsvärden klämmförband

Beräkningsvärden		
P	1.75	[mm]
μ	0.15	-
d_2	10.863	[mm]
d_3	9.853	[mm]
r_m	7.41	[mm]
d	25	[mm]
L	40	[mm]

Först beräknas skruvkraften enligt ekvation 5.6 där värden från Tabell 5.5 användes.

$$F_s = \frac{M}{0.16P + 0.58\mu d_2 + \mu r_m} \approx 34\,667 \text{ N} \quad (5.6)$$

Detta visar att skruvkraften är 34 667 N vid detta åtdragningsmoment. Vidare beräknas trycket på den åtklämda ytan enligt Ekvation 5.7 där värden från Tabell 5.5 användes.

$$p = \frac{F_s}{d \cdot L} \approx 4.7 \text{ MPa} \quad (5.7)$$

Vidare kan hållkraften för förbanden beräknas enligt Ekvation 5.8 samt säkerhetsmarginalen enligt 5.9.

$$F_f = \mu \cdot \pi \cdot p \cdot d \cdot L \approx 16336 \text{ N} \quad (5.8)$$

$$S = \frac{F_f}{1000N} \approx 16.3 \quad (5.9)$$

För detta förband tillhålls alltså en säkerhetsfaktor på cirka 16.3 vilket är relativt högt men då denna dimensionering inte tar med eventuella tillverkningsavvikelser eller den mänskliga faktorn att dessa skruvar inte alltid kommer att dras åt med exakt 81 Nm. Detta samt i beaktning att detta är en kritisk säkerhetskomponent i dynon medför att denna säkerhetsfaktor anses tillförlitlig.

Sedan beräknades spänningen i skruven enligt Ekvation 5.11 med värden från Ekvation 5.8 och 5.10.

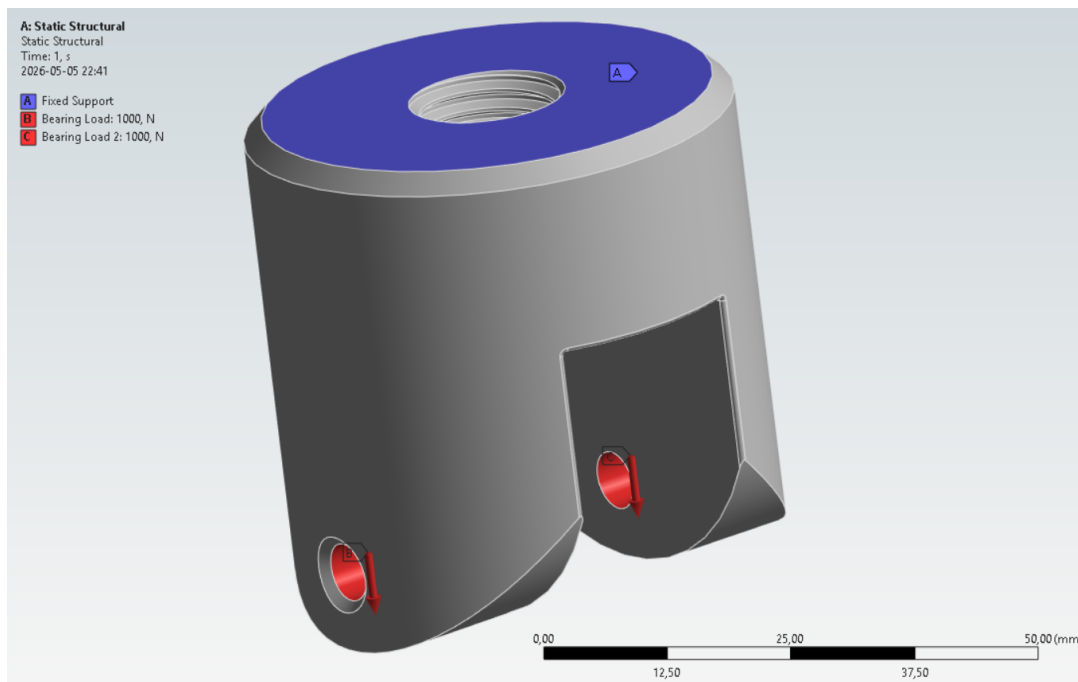
$$A_{sp} = \frac{\pi(d_2 + d_3)^2}{16} \approx 84.3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (5.10)$$

$$\sigma = \frac{F_s}{A_{sp}} = 411.4 \text{ MPa} \quad (5.11)$$

Detta innebär att en skruv av 8.8 kvalitet kan väljas.

För att fixera stötdämparen i rätt position har två specifika infästningar konstruerats. Den ena monteras vid lastcellen i anslutning till toppinfästningen, och den

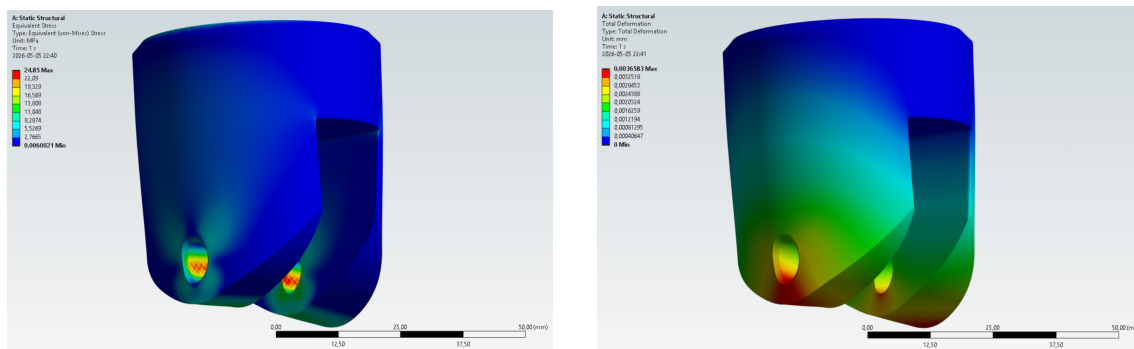
andra monteras vid distansen mellan stötdämparen och scotch yoke-mekanismen. Komponenternas design är snarlik, men de skiljer sig åt i hur de monteras i botten. Infästningen vid toppfästet monteras genom ett frigående hål för ett skruvförband, medan infästningen vid distansen är försedd med en integrerad M12 gänga för montering i distansen. Båda komponenterna kan betraktas som låsta i botten då ingen rotation tillåts. Därav låses botten i beräkningarna för att se om dessa komponenter klarar av lastfallet. Dessa komponenter kommer som mest utsättas för en last på cirka 2000 N som är jämnt fördelat på hålen som sprinten placeras igenom. Mesh storleken som användes för simuleringen av lastfallet var 1.5 mm. Beräkningarna är gjorda i Ansys Mechanical (Ansys Inc, 2024). Det största lastfallet för infästningarna illustreras i Figur 5.12.



Figur 5.12: Lastfall dämparinfästning.

Komponenterna tillverkades med CNC fräsning, manuell svarvning och borrar i materialet aluminium 7075, ett material som valdes för dess kombination av låg vikt och hög hållfasthet (Pennex, 2026). För att säkerställa konstruktionens hållbarhet genomfördes en strukturanalys med finita elementmetoden (FEM). Analysen visade en maximal von Mises-spänning på 24.9 MPa och illustreras i Figur 5.13a

Den maximala spänningen visas i Figur 5.13a, vilket understiger materialets sträckgräns med god marginal. Den största förskjutningen i modellen beräknades till 0.004 mm och illustreras i Figur 5.13b.

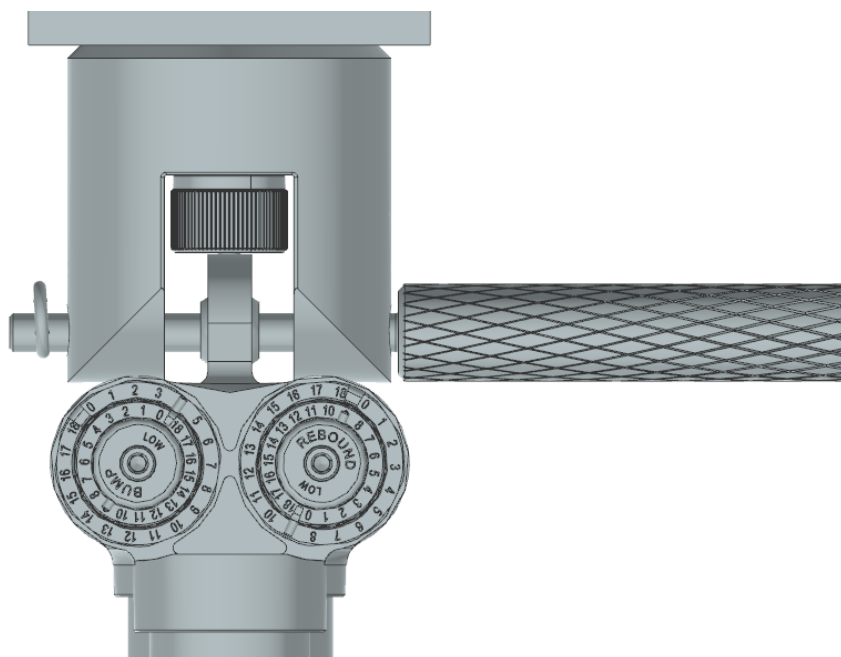


(a) Maximal spänning.

(b) Maximal förskjutning.

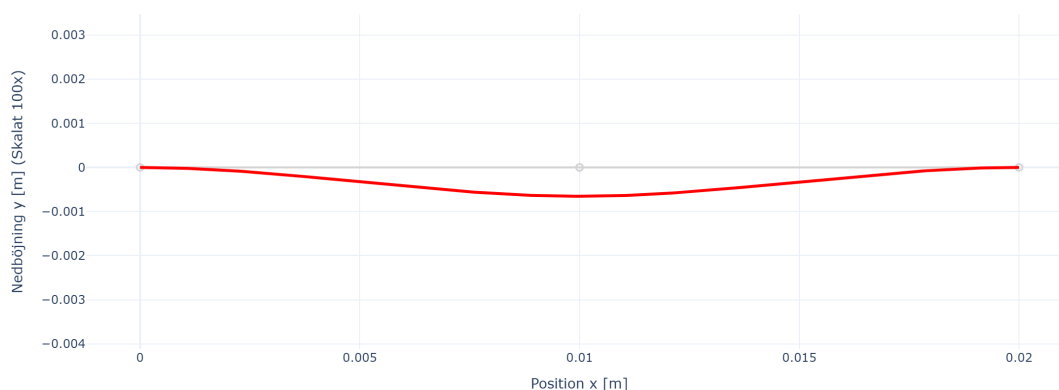
Figur 5.13: Resultat från simulering av dämparinfästning, med 5% i konvergens.

Beräkningarna för sprintarna visas i Bilaga A. Dessa beräkningar gjordes med hjälpfunktioner från Jim Brouzoulis, 2025. Detta illustrerar lastfallet där stötdämparen drar i mitten av sprinten med en kraft på 2000 N. Måttet 20 mm motsvarar distansen mellan de två stöden i dämparinfästningen som sprinten vilar på. Det anses att sprinten är helt låst för förflyttningar i y led samt nedböjning. Utöver det anses det att sprinten är låst i x-led på ena sidan av upphängningen. Illustration av upphängningen visas i Figur 5.14.



Figur 5.14: Stötdämparens övre infästning.

Den största beräknade spänningen uppgår till 235.79 MPa. Därav valdes konstruktionsstål S355J2 som har en sträckgräns på 355 MPa enligt Eriksson och Karlsson, 2014. Detta ger en säkerhetsfaktor på 1.5. Vid detta lastfall blir utböjningen ungefär 0.0065 mm och detta illustreras i Figur 5.15.



Figur 5.15: Deformerad sprint.

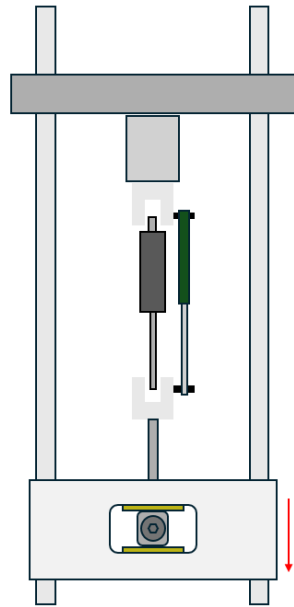
5.6 Total förskjutning

För att få en uppfattning om den totala förskjutningen togs förskjutningarna i dämparinfästningen och scotch yoken fram vid de maximala krafterna som kan uppstå.

Tabell 5.5: Beräknade förskjutningar

Förskjutningar		
Toppinfästning	0	[mm]
Dämparinfästning i drag	0.0037	[mm]
2 x Sprint	0.013	[mm]
Tappskiva	0.085	[mm]
Dämparinfästning i tryck	0.0024	[mm]
Scotch yoke	0.053	[mm]

Den totala deformationen kommer påverka dämparens slaglängd under testning, vilket innebär att den inställda slaglängden inte motsvarar den faktiska slaglängden. Eftersom potentiometern är placerad mellan dämparinfästningarna, se Figur 5.16, inkluderas deformationen i systemet med undantag för deformationen i sprintar och dämparinfästningarna. Det totala mätfelet understiger 2 hundraedels millimeter och har inte ansetts nödvändigt att kompenseras för.



Figur 5.16: Dynamiskt system.

5.7 Högspänningssystem

Högspänningssystemet består till stor del av motorn och frekvensomriktaren samt krav kring säkerhet och inkapsling. För att enklare kunna konstruera både hög- och lågspänningssystemet ritades ett elschema (Bilaga E) med hjälp av programmet KiCad (KiCad, u. å).

5.7.1 Motor

Motorn som används vid detta projekt är en *ABB m2aa 112m* på 4.0 kW och maxvarvtal på 2850 RPM i D-koppling enligt motorns typskylt för 380-420v.

5.7.2 Frekvensomriktare

En frekvensomriktare tilldelades projektet av Stefan Lundberg i grundkurslabbet på Chalmers. Denna frekvensomriktare är en *ABB SAMI-GS* som är lämplig för att styra elmotorn. Den måste anslutas till ett trefasnät för att kunna driva motorn (ABB, u. å).

Motorhastigheten styrs i användargränssnittet och ges till en analog ingång på frekvensomriktaren som en spänning mellan 0-10 volt via den DAQ-dator (styrenhet) som används.

5.7.3 Inkapsling

För att uppfylla de ställda säkerhetskraven behöver alla elkomponenter vars spänning riskerar att orsaka skada vid kontakt kapslas in (SEK Svensk Elstandard, 2023).

I projektet beslutades att alla komponenter med en driftspänning överstigande 10 V ska förses med en kapsling om lägst IP20. Trots att de generella gränsvärdena för lågspänning är högre (50 V AC / 120 V DC), valdes 10 V som gräns för maskinen, eftersom det är den högsta spänning som kan uppstå utan att trefashandsken är ansluten.

Valet av kapslingsklass minst IP20 motiveras av att riggen uteslutande ska användas i torra laboratoriemiljöer. Klassificeringen säkerställer ett fullgott beröringsskydd mot fingrar och förhindrar att föremål större än 12.5 mm kan komma i kontakt med spänningen. För att bibehålla kapslingens skyddsgrad vid kabeldragning används dragavlastande kabelgenomföringar. Dessa förhindrar mekanisk belastning på interna anslutningar och säkerställer att inga öppningar uppstår i höljet.

5.7.4 Konstruktionsmetod

Vid installationen av högspänningssystemet användes skärmat kablage mellan frekvensomriktaren och motorn för att minska störningar. Av samma anledning drogs kablaget för skyddsjorden till ramen så kort som möjligt. För matning av lågspänningssystemets nätaggregat kopplades en 230 V krets in med en 6 A-säkring.

På grund av de höga spänningarna gjordes av säkerhetsskäl en inspektion och ett isolationstest enligt industrins standarder (Elma, 2024) innan första provstart.

5.8 Lågspänningssystem

Lågspänningssystemet avser likströmssystem i stötdämpardynamometern och används främst för sensorer och datainsamlingen som utdata.

Det centrala för lågspänningssystemet är att innefatta mätsystemen som krävs för att få den önskade dämpardatan. För detta krävs stötdämparhastighet, stötdämpar-temperatur och stötdämparkraft. Tre olika mätvärden måste mätas och sparas.

5.8.1 Linjärpotentiometer

Dämparhastigheten under dess kompressions- och returförlopp måste kunna mätas. Detta baserades på hur de mäter dämparhastigheten på CFS-bilen, där används en linjärpotentiometer vars motstånd beror på dess position. Den potentiometer som gavs till projektet från CFS var en *Eurosensor ELPM 100* som använts för just detta ändamål på bilen. Linjärpotentiometern monteras parallellt med dämparen och utsignalens spänning beror linjärt på dess position (Eurosensor, u. å). Monteringens parallellt med stötdämparen kan ses i Figur 5.17.



Figur 5.17: Linjärpotentiometer monterat parallellt med stötdämparen samt lastcellen monterad vid övre dämparinfästning.

Derivering av denna signal i styrenheten ger sedan hastigheten. Fördelen med detta val av sensor är att linjärpotentiometern redan finns hos CFS och kunde införskaffas därifrån samt att utsignalen enkelt kan tas in av en analog ingång på styrenheten.

5.8.2 Temperaturgivare

För att kunna mäta stötdämpartemperatur undersöktes två olika sätt, en kontaktbaserad sensor som monteras på stötdämparen eller en kontaktlös mätning med exempelvis infraröd temperaturmätning. Inspiration togs från kommersiella lösningar som LABA7, de använder sig av kontaktlös mätning vilket underlättar eftersom ingen sensor måste monteras på dämparen innan mätning påbörjas (LABA7, 2024). En infraröd temperatursensor kan monteras fast på stötdämpardynons struktur och riktas mot dämparens kropp för mätning. Med en infraröd sensor undviks dessutom rörligt kablage, vilket hade krävts för en dämparmonterad givare. Den infraröda temperatursensorn Optris CS valdes på grund av dess mätintervall mellan -20° till 350° grader celsius samt att den har en analog utgång som kan kopplas till en analog ingång på styrenheten för att få temperatursignalen (Optris, u. å).

5.8.3 Lastcell

Mätning av dämparkraft måste göras under både tryck och drag, det vill säga under dämparens kompressions- och returförlopp. Lösningen baserades på analysen av kommersiella lösningar av stötdämpardynamometrar. Tillverkare som exempelvis CTW använder en lastcell som kan mäta i drag och tryck monterad i dämparens övre infästning (CTW, u. å). Dess montering till dämparinfästningen kan ses i Figur 5.17. Mätområdet för lastcellen måste vara inom de förväntade dämparkrafterna som anges av dämpartillverkaren, i detta fall är maximal kraft 1880N då dämparen är inställd på dess hårdaste inställningar (KW automotive, u. å). För viss marginal på lastcellen valdes en 300 kg-kapabel 'S-formad' lastcell som mäter i både drag och tryck. Dock leder användning av en lastcell till ett problem på grund av dess mycket små signaler, den valda lastcellen är på 2 mV/V (RS PRO, u. å). Exempelvis vid en excitationsspänning på 10 volt så kommer en maxlast på 300 kg endast ge en signal på 20 mV. Därmed behövs en lastcells förstärkare som är avsedd för just detta.

5.8.4 Lastcells förstärkare

Användandet av en lastcell för mätning av dämparkrafterna kräver en förstärkare för att få en användbar analog signal som styrenheten kan ta emot. För detta krävs en lastcells förstärkare som ger den korrekta excitationsspänning mellan 4-12 volt och kan ta emot den svaga signalen från lastcellen (RS PRO, u. å). Förstärkaren måste även vara anpassad för den mätfrekvens som krävs, därför valdes modeller med inbyggda låpassfilter bort.

Flertalet olika tillverkare och modeller undersöktes med valet föll till slut på Flintec då enheten erbjöds till ett reducerat pris. Till detta ändamål införskaffades en JN Sensor lastcells förstärkare som uppfyller kraven som ställs. Den matchar lastcellens egenskaper samt har en analog utgång mellan 0-10 V. Lastcellen kalibrerades med hjälp av en känd 20 kg vikt som hängdes i lastcellen.

5.8.5 Styrenhet

De sensorer som valts behöver kopplas till en styrenhet för att mätas och sparas för senare analys. Denna styrenheten eller DAQ (Data Acquisition) dator tar emot de analoga signalerna från sensorerna samt erbjuder analoga utgångar som kan användas som styrsignal till frekvensomriktaren och därmed styra motorhastighet (National Instruments, u. å). Till projektet kunde en DAQ-dator från National Instruments av modell *NI 6001 USB* lånas. National Instruments mjukvara *LabVIEW* används för att skapa användargränssnittet samt tillhandahålla datahantering. Denna enhet kopplas till en valfri dator med *LabVIEW* och ansluts med en USB kabel och möjliggör att man får tillgång till styrning av motorhastighet samt uppmätt data.

5.8.6 Konstruktionsmetod

Lastcellen, temperatursensorn och linjärpotentiometern använder sig av analoga signaler som går i kablar genom dämpardynons struktur till styrenheten. Eftersom det finns ett högspänningssystem i närheten i strukturen i form av en trefasmotor samt frekvensomriktare fattades ett tidigt konstruktionsbeslut att placera all högspänning på högra sidan av dämpardynamometern och all lågspänning på vänstra sidan för att åstadkomma så långt avstånd som möjligt mellan de två systemen. Vidare användes skärmade kablar till lastcellen, temperatursensorn och linjärpotentiometern till lastcellsförstärkaren respektive styrenheten. Detta gjordes för att minimera störningar i signalerna och förbättra kvaliteten på de data som loggas.

Styrenhetens program skapades i *LabVIEW* och sparande av mätt data gjordes genom att datan skrivs till en CSV-fil (Comma-Separated Values) med aktuell tid och alla sensorvärden per rad. Temperatursensorn har inga krav på mycket kort responstid och därmed användes ett genomsnittsfiler som gör ett antal mätningar och tar genomsnittet av detta för att få ett mycket stabilt mätvärde på dämparens temperatur. Mer hänsyn får dock tas till linjärpotentiometerns signal då störningar i den blir förvärrade vid derivering av signalen. Samtidigt måste filtreringen inte ta bort det intervall som är av intresse. Liknande gäller signalen från lastcellen då brus önskas att filtreras bort utan att påverka det som är av intresse i signalen.

Av dessa valda komponenter i lågspänningssystemet krävde lastcellsförstärkaren 24 V spänning samt den infraröda temperatursensorn krävde mellan 5 och 30 V spänning. På grund av detta valdes ett nätaggregat för att konvertera den 230 V växelström som fanns tillgängligt till 24 V likström som kan mata båda dessa enheter. Linjärpotentiometern matades direkt från styrenhetens 5 V utgång.

Ett system behövdes för att starta och stoppa frekvensomriktaren och motorn samt uppfylla maskindirektivet angående nödstopp (Arbetsmiljöverket, 2023). I lågspänningssystemet ingår hållkretsen på 24 volt som styr om frekvensomriktaren och i sin tur om motorn är igång eller avstängd. Detta innefattar nödstopp, start- och stopp knapp samt gränslägesbrytare i dörren. Detta åstadkoms genom en hållkrets med ett relä som sätts i självhållning genom att startknappen trycks och bryts av antingen stoppknappen, nödstoppet eller gränslägesbrytaren. Detta säkerställer att vid en brytning av antingen nödstopp, gränslägesbrytare eller strömavbrott så nollställs kretsen så att startknappen måste tryckas igen för att starta stötdämpardynamometern. Detta beteende programmerades frekvensomriktaren för genom dess interface i form av menyer i displayen. På så sätt säkras att maskinen stannar och ej startar av sig själv om någon typ av brytning sker.

Det fullständiga kopplingsdiagrammet finns i Bilaga E.

6

Resultat

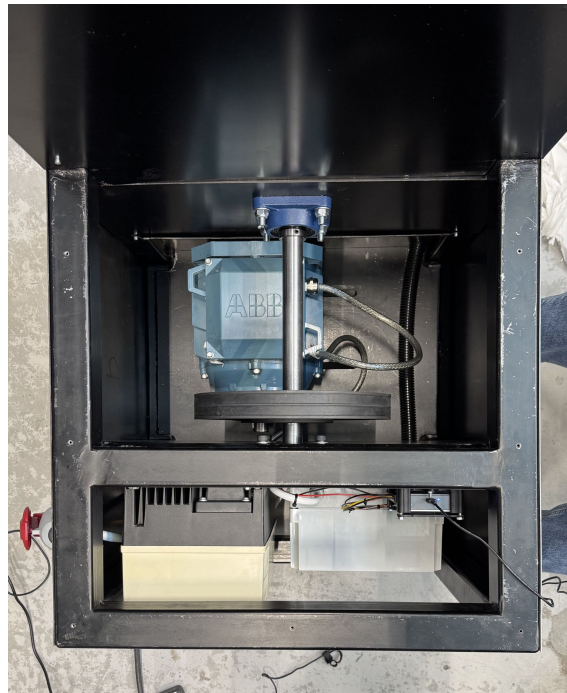
Detta kapitel delas upp i det mekaniska och det elektriska delsystemet.

6.1 Mekanik

Det mekaniska systemet består av ramverk, drivlina och alla tillhörande fästelement. Detta resulterade i en fullständig och robust mekanisk testtrigg, dimensionerad för att hantera de dynamiska krafter som uppstår under provning av stötdämpare. Den huvudsakliga mekaniska konstruktionen kan ses i Figur 6.1, där scotch yoke-mekanismen integrerades i testtriggens främre parti för att effektivt omvandla motorns rotationsrörelse till linjär translation.



Figur 6.1: Mekanisk konstruktion med sidopaneler och säkerhetsdörr.



Figur 6.2: Mekanisk konstruktion sedd uppifrån utan toppanel.

6.1.1 Kravuppfyllnad

Testriggen har utvärderats gentemot de funktionella krav som sattes upp från CFS i början av projektet, och resultaten visar att samtliga mekaniska krav uppfylls. Gällande testriggens mätkapacitet och fysiska begränsningar medger konstruktionen en justerbar slaglängd där det faktiska spannet kan ställas in mellan 5 och 50 mm, som visas i Figur 5.8 och 5.9.

Vidare uppnår riggen en absolut maximal kompressions- och returhastighet på 1.87 m/s vid en slaglängd på 50 mm, beräkningarna för detta visas i Bilaga B, vilket säkerställer att dämparna kan testas i de hastigheter som efterfrågas. Konstruktionen är även dimensionerad och verifierad för att klara de uppkomna krafterna under provning. Utvärderingen påvisar att riggen hanterar de krävda 1880 N utan önskad deformation och instabilitet. Den övre infästningen säkerställer även att längre samt kortare dämpare kan monteras genom att enbart lossa de två skruvarna och förflytta infästningen för hand. Slutligen har den färdiga testriggen yttermått på 740x600 mm, vilket innebär att den klarar det uppställda kravet på max 800x600 mm för att få plats på en halv EU-pall.

För att säkerställa att riggen är säker att använda och uppfyller Arbetsmiljöverkets riktlinjer (Arbetsmiljöverket, 2023) för maskinbyggnation har flera fysiska säkerhetsåtgärder integrerats. Roterande och rörliga delar har byggts in och försetts med skyddskåpor tillverkade av stålplåt. Inkapslingen av motor och remväxel kan ses i Figur 6.1. Utformningen av dessa skyddskåpor säkerställer att inga rörliga delar där klämrisik föreligger är åtkomliga för operatören under drift. Testriggen har även en dörr som är försedd med en gränslägesbrytare för att det inte ska vara möjligt att

komma åt några rörliga delar under drift, dörren fungerar även som sprängskydd för det fall att en dämpare skulle gå sönder och skjutas ut mot operatören.

6.2 El och datainsamling

Låg- och högspänningssystemen installerades i stötdämpardynamometern med montering av alla enheter och sensorer samt kabeldragning. Detta resulterade i ett fullständigt mät- och styrsystem baserat på ett LabVIEW-program. Den huvudsakliga installationen kan ses i Figur 6.3. Sensorerna monterades kring stötdämparen och scotch yoke-mekanismen i testriggens främre parti.



Figur 6.3: Frekvensomriktaren och lågspänningssystemet installerat i den bakre sektionen av testriggen.

6.2.1 Kravuppfyllnad

Högspänningssystemets styrning av motorhastighet genom samspelet mellan styrenheten och frekvensomriktaren uppvisade önskat beteende vid testkörningar. Motorvarvtalet kan styras med styrenheten som i sin tur styr frekvensomriktaren upp till det maximala motorvarvtalet på 2850 varv per minut.

Lågspänningssystemets datainsamling provades vid olika provkörningar av testriggen, med och utan stötdämpare monterad. Vid prover kunde följande konstateras: LabVIEW-programmet ger operatören data i realtid på den inkopplade datorn, uppmätt dämparkraft, dämparhastighet, dämparposition och dämpartemperatur presenteras för operatören i programfönstret. Vidare kan motorns varvtal och därmed stötdämparens testhastighet justeras i programfönstret som kan ses i Figur 6.4. Den insamlade datan vid en provkörning av riggen kan sedan sparas till en CSV-fil för mer detaljerad analys. Detta uppfyller därmed kraven angående insamling av mät-

data och loggning av mätvärden.

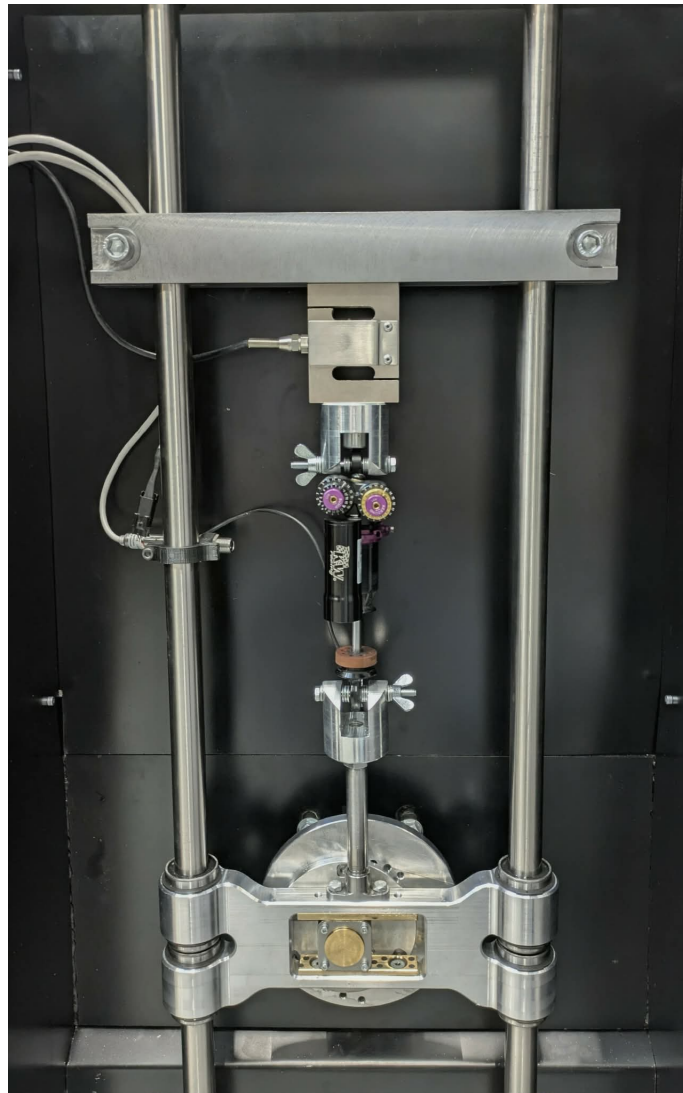


Figur 6.4: Användargränssnittet i LabVIEW.

Start- och stoppsystemet för frekvensomriktaren och motorn arbetar så att gränslägesbrytaren måste vara sluten och nödstopp utdraget för att kunna starta stötdämpardynamometern med startknappen. Om nödstoppet, gränslägesbrytaren eller stoppknappen bryter så stänger frekvensomriktaren av direkt. För att kunna starta igen måste gränslägesbrytaren vara sluten, nödstoppet uppe samt startknappen tryckas. Detta testades vid första provkörningen av elinstallationen och även vid senare provkörningar och fungerade som beskrivet. Detta uppfyller de ställda säkerhetskraven angående lättillgängligt nödstopp, återgång till avstängt läge vid brytning och ställda krav och standarder för komponenter och installation. Detta leder även till uppfyllande av målet att uppfylla maskindirektivets krav.

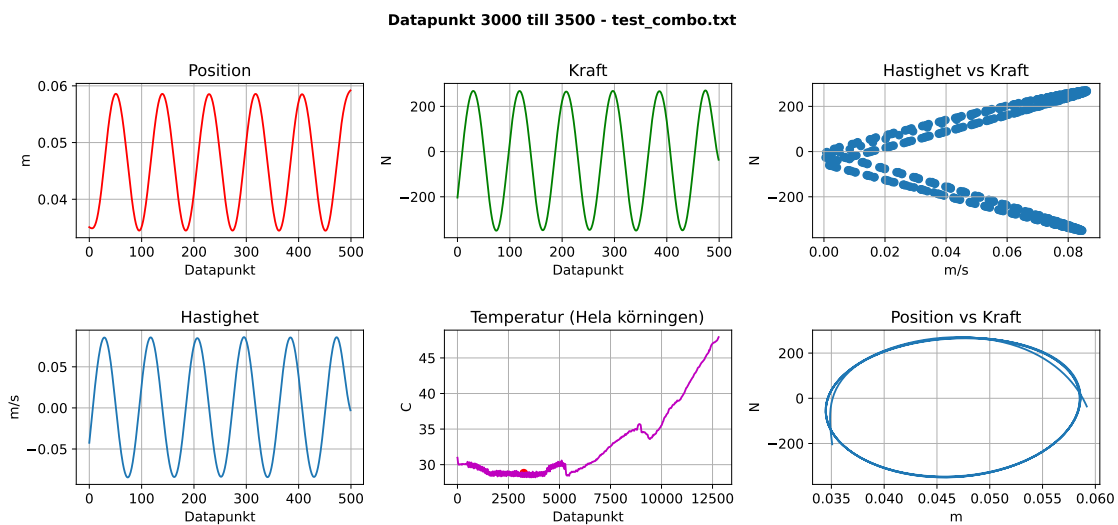
6.2.2 Mätresultat

Mätningar utfördes med den avsedda *KW V5 Racing FORMULA STUDENT* stötdämparen som monterades i testtriggen inställd till 25 mm slaglängd och kan ses i Figur 6.5.

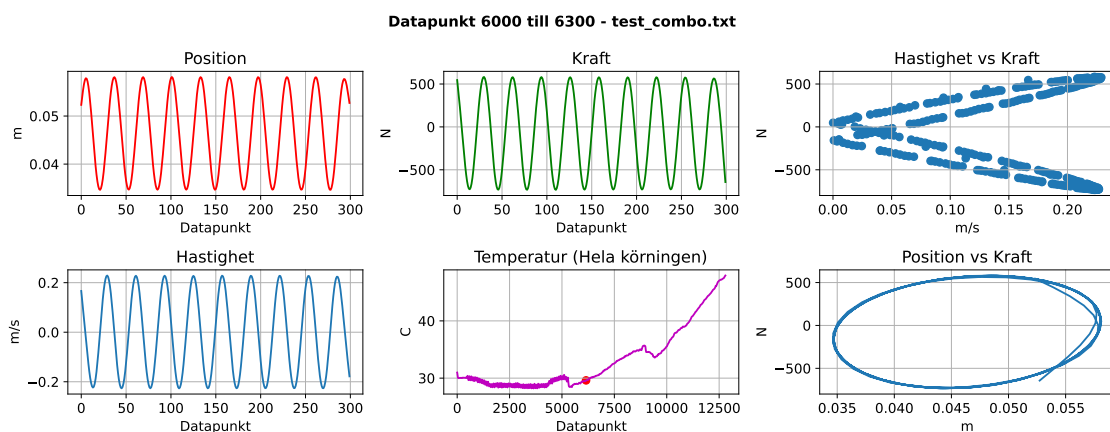


Figur 6.5: Stötdämparen monterad i stötdämpardynamometern.

Testtriggen styrdes med användargränssnittet i LabVIEW enligt Figur 6.4 och kördes i olika hastigheter genom att justera styrspänningen. Styrspänningen justerades i steg upp till cirka 1.4 volt vilket motsvarade en topphastighet på cirka 0.26 m/s. Datan loggades med 100 Hz frekvens och sparades sedan ner till användarens dator. Loggning i 100 Hz ansågs vara tillräckligt utan att få för stora filer eftersom position och hastighetsvärdena var sammanhängande även vid högsta hastighet. I Figur 6.6 och Figur 6.7 visas utdrag från olika prover vid olika hastigheter som skapats med ett Pythonprogram för analys av dataloggarna. Pythonkoden kan ses i Bilaga C.

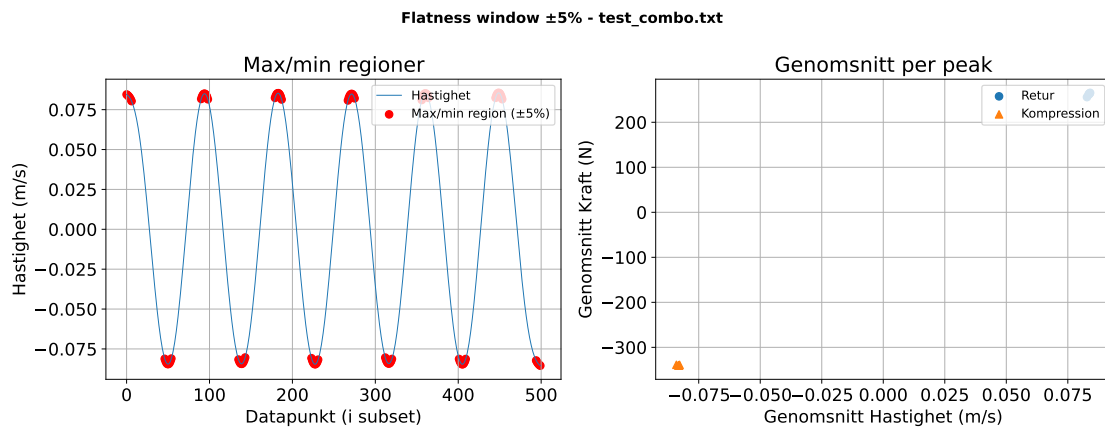


Figur 6.6: Utdrag från en datalogg vid låg hastighet.



Figur 6.7: Utdrag från en datalogg vid högre hastighet.

Prover utfördes vid olika hastigheter och sedan bearbetades dataloggarna genom att filtrera så endast datapunkterna där hastigheten var så konstant som möjligt behålls, det vill säga kring topparna och dalarna av hastighetssignalen. Dessa kvarstående datapunkter kunde sedan användas för att beräkna den genomsnittliga kraften i kompression och returförloppen vid dessa punkter där hastigheten var så konstant som möjligt. Vid proverna som utfördes användes en gräns på $\pm 5\%$ avvikelse från största och minsta värdet per topp. Detta gjordes för att undvika varierande hastighet och få mer representativa kraftvärden på dämparkraften. Detta kan ses i Figur 6.8, detta upprepades för dataloggar med prover utförda vid olika hastigheter för att ge krafterna i kompression och retur vid olika hastigheter med Pythonkoden som kan ses i Bilaga C.

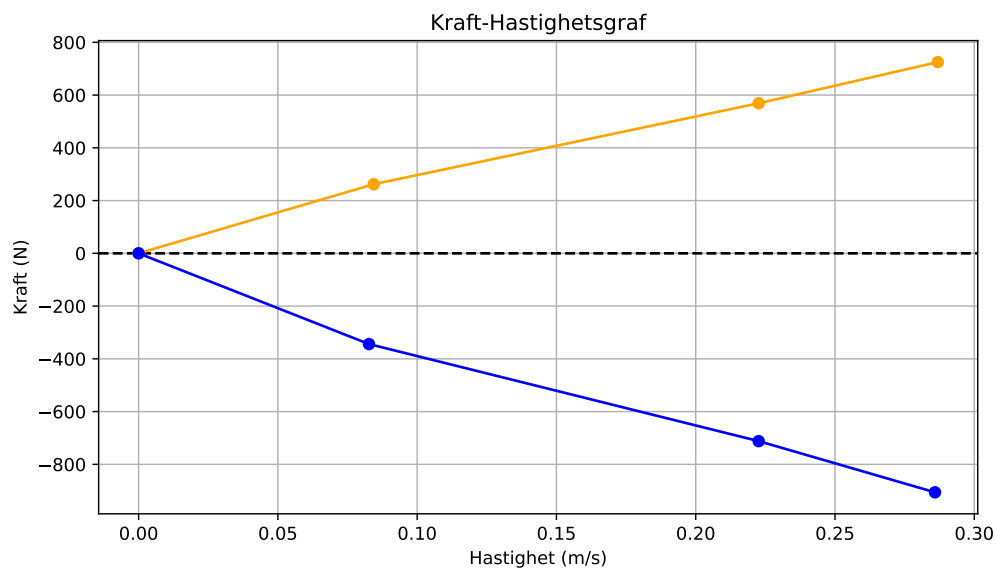


Figur 6.8: Val av datapunkter där hastigheten är relativt konstant samt sammanställning av genomsnittlig kraft och hastighet för varje maximum och minimum.

Med detta sammanställdes en tabell manuellt som kan ses i Tabell 6.1 med krafterna i kompression och retur vid olika hastigheter som sedan kunde användas för att visualisera den slutgiltiga datan i form av en kraft-hastighetsgraf som kan ses i Figur 6.9.

Tabell 6.1: Slutgiltiga genomsnittliga datapunkter

Hastighet (m/s)	Kraft (N)	Förlopp
-0.0827	-344	Kompression
0.0844	262	Retur
-0.2226	-712	Kompression
0.2226	569	Retur
-0.2859	-906	Kompression
0.2869	725	Retur



Figur 6.9: Kraft-hastighetsgraf med huvudsakligen ökande kraft vid högre hastigheter.

Dessa resultat visar att konstruktionen kan användas för att mäta dämparposition, hastighet, kraft och temperatur samt går att använda för att generera data som i form av en kraft-hastighetsgraf för en stötdämpare.

6.3 Diskussion

En av de viktigaste insikterna handlar om placering av det bakre lagret. Som maskinen är byggd sitter det ganska otillgängligt, vilket gör att det tar onödigt mycket tid för montering eller underhåll. I den nuvarande designen sitter det en platta direkt bakom lagerenheten där elkomponenterna är monterade. Denna platta är fastsvetsad. Hade denna platta istället varit monterad med skruv, skulle det gå att montera av den och då förbättra åtkomligheten till lagerenheten. Det gör dessutom jobbet mer ergonomiskt för montörerna. Det i sin tur minskar risken för att det blir fel vid monteringen, och det ökar chansen att det förebyggande underhållet faktiskt blir av, i stället för att man drar sig för det eftersom det är krångligt.

En annan viktig insikt är att vi behöver bygga mer modulärt, speciellt när det gäller elektroniken. Att elplattan är svetsad medför även att elektronik och mekanik sitter ihop permanent, vilket inte är optimalt. Om plattan istället var monterad med skruv skulle det bli det mycket lättare att snabbt byta ut hela elektronikpaketet om någon komponent krånglar. Det ger oss också fördelen att vi kan bygga ihop och testa elsystemen helt separat från resten av maskinen under tillverkningen, vilket gör hela produktionen smidigare och förenklar framtida uppgraderingar av styrsystemet.

Med hänsyn på hur själva grundkonstruktionen tillverkas, så har vi insett att vi behöver ha bättre koll på svetsningen av ramen för att måtten ska bli exakta. Vid

svetsning av ramen hade en fixtur varit till hjälp för att hålla emot när värmen får konstruktionen att slå sig vilket annars ofta leder till att man får tvinga delar på plats i efterhand ifall det inte stämmer. Dessutom måste vi vara noga med att använda rotskyddsgas när vi svetsar. Utan gasen riskerar fogen att oxidera på insidan, och då kan det bildas små mikrosprickor som med tiden växer och leder till utmattningsbrott. Med rätt fixtur och rätt gas ser vi till att ramen blir mer än väl tillräckligt stark för att klara de krafter maskinen utsätts för.

Slutligen analyserades den insamlade mätdatan från systemet och där kan mer tid läggas på mer exakt kalibrering av lastcell och dess förstärkare eftersom begränsad kalibrering gjordes. Detta skulle kunna utökas genom att kalibrera med flera olika vikter. I övrigt har ingen verifiering av datans giltighet hunnit göras, exempelvis att jämföra med kända värden från en annan stötdämpardynamometer vilket bör göras.

7

Slutsatser

Projektets syfte har uppnåtts genom att en fungerande stötdämpardynamometer har konstruerats, tillverkats och slutligen levererats till Chalmers Formula Student. Den färdiga testanordningen är utrustad med mätutrustning som kan läsa kraft, hastighet och temperatur. Genom att noggrant logga dessa variabler genereras en tydlig och detaljerad bild över hur stötdämparna dynamiskt beter sig under varierande belastningar och vid olika inställningar.

Hela testprocessen och den tillhörande datainsamlingen styrs via ett egenutvecklat och intuitivt användargränssnitt som har programmerats i LabVIEW, se Figur 6.4. Mjukvaran i LabVIEW är specifikt designad för att effektivisera CFS-lagets arbete genom att automatiskt sammanställa och exportera alla uppmätta värden till en CSV-fil. Detta standardiserade format gör det möjligt för användaren att därefter använda ett program för att analysera hur stötdämparnas inställningar samverkar, visualisera prestandan och bedöma stötdämparens generella skick och funktionsduglighet.

Sammantaget innebär implementeringen av denna testtrigg, bestående av både mekanisk hårdvara och skräddarsydd mjukvara, att CFS-laget nu kan frångå den tidigare tidskrävande och osäkra iterativa justeringsprocessen ute på testbanan. Det konkreta resultatet av detta projekt är därmed ett färdigt verktyg som ger CFS-laget möjlighet att optimera stötdämparens inställning innan den monteras på bilen vilket i sin tur ger möjlighet till en bättre prestation på tävlingar.

Referenser

- ABB. (u. å). *User's Manual ACS 500 Frequency Converters (ACS 502 – 506, 37 to 315 kW)* [Hämtad: 2026-03-14]. https://library.e.abb.com/public/be2ad54c6368bbe0c1257e0a00321cce/Users%20Manual%20ACS%20502_506.pdf
- ABB. (2003). *DriveIT Low Voltage General Purpose Motors* [Hämtad 2026-05-09]. <https://library.e.abb.com/public/2652441d9397714dc1257b1300571151/General%20Purpose%20Motors%20Aluminium%20GB%20092003.pdf>
- ABB. (2008). *Catalogue: General Performance Motors*. https://library.e.abb.com/public/4721a2aae978d79bc1257b1300570ff6/Catalogue_General%20Performance%20Motors%20EN%2004_2008%20RevB.pdf
- Anglin, D.L. (2019 november). *Mechanical vibration*. [Hämtad 25 mars 2026]. <https://doi.org/10.1036/1097-8542.064600>
- Ansys Inc. (2024). *Ansys Mechanical, Release 2024 R1*. <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-mechanical>
- Arbetsmiljöverket. (2023). *Krav på maskiner*. Hämtad 14 mars 2026, från <https://www.av.se/arbetsmiljoarbete-och-inspektioner/inspektioner-utredningar-och-kontroller/produktregler-och-marknadskontroll/produktregler/krav-pa-maskiner/>
- Ashby, M. F. (2016). *Materials Selection in Mechanical Design* (5. utg.). Butterworth-Heinemann.
- Chalmers Formula Student. (2026). *Chalmers Formula Student*. Hämtad 9 mars 2026, från <https://www.chalmersformulastudent.se/>
- ChassisSim. (u. å). *The Damper Workbook*. Hämtad 21 april 2026, från https://www.chassissim.com/wp-content/uploads/DN_Damper_Work_book-1.pdf
- CTW. (u. å). *RD2 Damper and Shock Dyno Machine*. Hämtad 23 mars 2026, från <https://ctwautomation.com/product/rd2-damper-and-shock-dyno-machine/>
- Elma. (2024). *Värt att veta om isolationstest*. Hämtad 22 april 2026, från <https://elma.se/kunskap-kurser/vart-att-veta/isolationstest>
- Eriksson, N.-O., & Karlsson, B. (2014). *Verkstadshandboken* (15. utg.). Liber.
- ESAB. (2024). *En nybörjarguide till TIG-svetsning*. Hämtad 21 april 2026, från https://esab.com/se/eur_sv/esab-university/articles/a-beginners-guide-to-tig-welding/
- Eurosensor. (u. å). *Eurosensor ELMP Series Specifications*. Hämtad 23 mars 2026, från <https://docs.rs-online.com/b571/A700000012831180.pdf>
- Japp, M. M. (2003 september). *Formelsamling i mekanik*. Chalmers tekniska högskola, Institutionen för teknisk mekanik.

- Jiga. (2025 december). *The Scotch yoke mechanism: An ancient innovation for modern applications* [Hämtad 24 mars 2026]. <https://jiga.io/articles/scotch-yoke/>
- Jim Brouzoulis. (2025). *mha021.py* [Tillhandahållen källkod i kursen MHA021]. Chalmers tekniska högskola, Canvas. Hämtad 6 maj 2026, från <https://chalmers.instructure.com/courses/36880/files/4482272>
- Jim Kasprzak. (u. å). *Understanding your Dampers: A guide from Jim Kasprzak*. Hämtad 21 april 2026, från <https://www.kaztechnologies.com/wp-content/uploads/A-Guide-To-Your-Dampers-Chapter-from-FSAE-Book-by-Jim-Kasprzak-Updated.pdf>
- Johnson, K.W. (2020a januari). *Mechanical vibration*. [Hämtad 25 mars 2026]. <https://doi.org/10.1036/1097-8542.412200>
- Johnson, K.W. (2020b augusti). *Vibration damping*. [Hämtad 25 mars 2026]. <https://doi.org/10.1036/1097-8542.731300>
- KiCad. (u. å). *Schematic Capture in Eeschema*. Hämtad 8 maj 2026, från <https://www.kicad.org/discover/schematic-capture/>
- KW automotive. (u. å). *KW V5 Racing Formula Student*. Hämtad 24 mars 2026, från <https://studylib.net/doc/27798273/kw-v5racing-formula-student-int-technologytesting>
- LABA7. (2024). *Shock Dyno - Professional Suspension Testing*. Hämtad 9 mars 2026, från <https://laba7.com/products/shock-dyno/>
- Materialexperten. (2026). *Tabell över åtdragningsmoment för stålskruvar*. Hämtad 24 april 2026, från <https://materialexperten.se/sidor/atdragningsmoment-for-stalskruv-i-nm-teknisk-information>
- Mägi, M., Melkersson, K., & Evertsson, M. (2017). *Maskinelement* (1. utg.). Studentlitteratur.
- National Instruments. (u. å). *NI USB-6001 Specifications*. Hämtad 14 mars 2026, från <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usb-6001-specs/resource/374369a.pdf>
- Optris. (u. å). *Optris CS / CSmicro*. Hämtad 23 mars 2026, från <https://docs.rs-online.com/a409/0900766b80b0445f.pdf>
- Pennex. (2026). *Types of aluminum*. Hämtad 26 april 2026, från <https://www.pennex.com/press/types-of-aluminum>
- Piping Technology & Products. (u. å). *Bronzphite Slide Plates*. Hämtad 7 maj 2026, från <https://pipingtech.com/resources/technical-bulletins/bronzphite-slide-plates/>
- RS PRO. (u. å). *RS PRO Alloy Steel S Beam Tension Load Cell*. Hämtad 23 mars 2026, från <https://docs.rs-online.com/b571/A700000012831180.pdf>
- SEK Svensk Elstandard. (2023). *Elinstallationsreglerna – Lågspänningsanläggningar* (Svensk Standard Nr SS 436 40 00:2023). SEK Svensk Elstandard.
- SKF. (2018). *Rullningslager*. https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d196802809de/pdf_preview_medium/0901d196802809de_pdf_preview_medium.pdf
- Suspension Secrets. (u. å). *Damper Dyno Graphs Explained*. Hämtad 24 mars 2026, från <https://suspensionsecrets.co.uk/damper-dyno-graphs-explained/>

Water Jet Sweden. (u. å). *Om vattenskärning*. Hämtad 31 mars 2026, från <https://www.waterjetsweden.com/sv/om-vattenskarning>

A

Beräkning av utböjning

```
# IPYNB-kod för att beräkna utböjning och spänning i pinnen
# Kandidatarbete: Stötdämpardyno

from mha021 import *

E = 200e9
D = 0.006
A = (D/2)**2*np.pi
I = (A**2) / (4 * np.pi)

L = 0.02
P = -2000 # Negativ för att vara riktad rakt NEDÅT i y-led
# 3 noder totalt: x=0, x=L/2, x=L
# Detta ger 2 element
ex = np.array([
    [0, L/2],
    [L/2, L]
])

ey = np.array([
    [0, 0],
    [0, 0]
])

# 3 noder * 3 DOFs = 9 frihetsgrader totalt [ux, uy, rz]
num_dofs = 9
k = np.zeros((num_dofs, num_dofs))
f = np.zeros((num_dofs, 1))

# Koppling för varje element
# Nod 1: 1, 2, 3 | Nod 2: 4, 5, 6 | Nod 3: 7, 8, 9
dofs1 = [1, 2, 3, 4, 5, 6]
dofs2 = [4, 5, 6, 7, 8, 9]

# Elementstyvhetmatriser med beam2e
ke1 = beam2e(ex[0], ey[0], E, A, I)
ke2 = beam2e(ex[1], ey[1], E, A, I)

assem(k, ke1, dofs1)
assem(k, ke2, dofs2)

# Nod 2 har DOF 4 (x), 5 (y) och 6 (rotation).
f[4] = P

# Randvillkor
bc_dofs = [1, 2, 3, 8, 9]
bc_vals = [0, 0, 0, 0, 0]

# Lös ekvationssystemet
```

```

a, r = solve_eq(k, f, bc_dofs=bc_dofs, bc_vals=bc_vals)

displayvar('K', k)
displayvar('f', f)
displayvar('a', a)
displayvar('r', r)

#Plotta den deformerade böjda balken
# Extrahera frihetsgrader per element från den globala lösningsvektorn a
ed1 = extract_dofs(a, np.array([dofs1]))[0]
ed2 = extract_dofs(a, np.array([dofs2]))[0]

# Rita upp förskjutningen
ex_list = [ex[0], ex[1]]
ey_list = [ey[0], ey[1]]
ed_list = [ed1, ed2]

fig_def = draw_discrete_elements(ex, ey, color="lightgray", title="Deformerad Sprint")
fig_def = plot_deformed_beams(fig_def, ex_list, ey_list, ed_list, scale=1.0e2,
color="red")
fig_def.update_layout(
    xaxis_title="Position x [m]",
    yaxis_title="Nedböjning y [m] (Skalat 100x)",
    yaxis=dict(
        scaleanchor="x",
        scaleratio=1
    )
)

fig_def.show()

#spänning

r_pinne = 0.003

# Lista med elementens förskjutningar
ed_list = [ed1, ed2]

for i in range(2):
    forces = beam2s(ex[i], ey[i], ed_list[i], E, A, I)

    N = forces["N"]
    V = forces["V"]
    M = forces["M"]

    for pos, label in zip([0, 1], ["Start", "Slut"]):
        # Normalspänning från drag/tryck

```

```

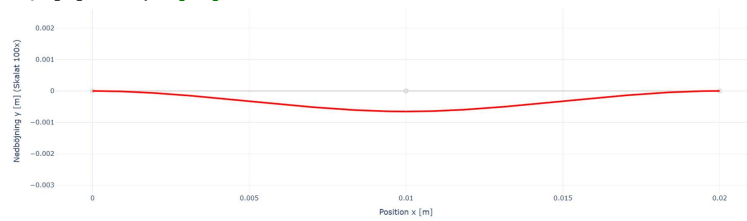
sigma_axial = N[pos] / A

# Böjspänning
sigma_bending = (abs(M[pos]) * r_pinne) / I

# Maximala och minimala spänningen i tvärsnittet
sigma_max = sigma_axial + sigma_bending
sigma_min = sigma_axial - sigma_bending

print(f"Element {i+1} ({label}):")
print(f"  Normalkraft (N): {N[pos]:.2f} N")
print(f"  Böjmoment (M):   {M[pos]:.2f} Nm")
print(f"  Max spänning:     {sigma_max / 1e6:.2f} MPa")
print(f"  Min spänning:     {sigma_min / 1e6:.2f} MPa")
displayvar('a', a[4]*1000) # [mm]

```



B

Beräkning av hastighet

```
# Ipython kod för uträkning av hastighet för scotch yoken beroende på varvtal och slaglängd
# Kandidatarbete: Stötdämpardyno
import math
import matplotlib.pyplot as plt

def plotta_hastighetscykel(slaglängd_mm, motor_rpm, utvaxling):
    # Beräkna varvtal
    vev_rpm = motor_rpm / utvaxling

    # Beräkna vinkelhastighet (omega) i rad/s
    omega = (vev_rpm * 2 * math.pi) / 60

    # Omvandla slaglängd till radie i meter
    radie_m = (slaglängd_mm / 2) / 1000

    vinklar_grader = list(range(0, 361, 1))
    hastigheter = []

    # Beräkna hastigheten för varje grad under varvet
    for vinkel in vinklar_grader:
        vinkel_rad = math.radians(vinkel)
        # Momentan hastighet i en Scotch Yoke:  $v = r * \omega * \sin(\theta)$ 
        momentan_hastighet = radie_m * omega * math.sin(vinkel_rad)
        hastigheter.append(momentan_hastighet)

    plt.figure(figsize=(10, 6))

    plt.plot(vinklar_grader, hastigheter, color='#ff7f0e', linewidth=2,
             label=f'{slaglängd_mm} mm slag, {motor_rpm} RPM (Utvaxling {utvaxling}:1)')

    plt.axhline(0, color='black', linewidth=1.2, linestyle='--')

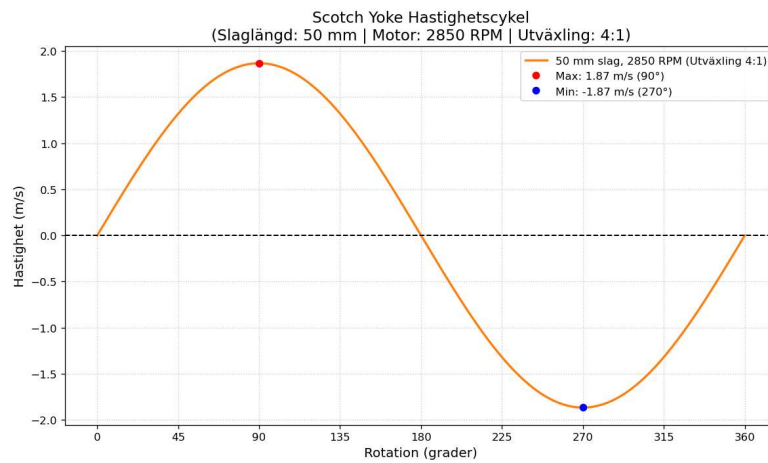
    max_hastighet = max(hastigheter)
    min_hastighet = min(hastigheter)
    plt.plot(90, max_hastighet, 'ro', label=f'Max: {max_hastighet:.2f} m/s (90°)')
    plt.plot(270, min_hastighet, 'bo', label=f'Min: {min_hastighet:.2f} m/s (270°)')

    plt.title(f'Scotch Yoke Hastighetscykel\n(Slaglängd: {slaglängd_mm} mm | Motor:
{motor_rpm} RPM | Utväxling: {utvaxling}:1)', fontsize=14)
    plt.xlabel('Rotation (grader)', fontsize=12)
    plt.ylabel('Hastighet (m/s)', fontsize=12)
    plt.xticks(range(0, 361, 45))
```

```
plt.grid(True, linestyle=':', alpha=0.7)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()

slaglängd = 50
varvtal = 2850
min_utvaxling = 4

plotta_hastighetscykel(slaglängd, varvtal, min_utvaxling)
```



C

Logganalys

```
#Kod/verktyg för analys av dataloggar från stötdämpardynamomtern
#Kandidatarbet: Stötdämpardyno
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.ticker as ticker
from scipy.ndimage import gaussian_filter1d
from scipy.signal import butter, filtfilt

#test9_kw index: 220:1380 - Retur: 8.62N @ 0.0228 m/s, Kompression: 30.51N @ -0.0201 m/s
#test7_kw index: 1340:1560 - Retur: 77.16N @ 0.0846 m/s, Kompression: 35.01N @ -0.0832 m/s
#test8_kw index: 1770:1980 - Retur: 71.16N @ 0.1451 m/s, Kompression: 61.16N @ -0.1394 m/s
#test7_kw index: 1900:2100 - Retur: 98.51N @ 0.1308 m/s, Kompression: 103.19N @ -0.1292 m/s

fs = 100 #Log sampling i hz

LPF_multiplier = 3 #Konstant för lågpasfilter på hastighetssignalen, om spikar är kvar så sänk. 2-3 verkar fungera

Force_offset = 0 #Offset på kraften (N) om man vill nolla.

Flatness = 5 # %, Hur många % från peaken det får avvika för att fortfarande tas med.

#Om man vill klippa ihop olika filer och utdrag från dem.
FleraFiler = 0

if(FleraFiler == 1):

    filnamn1 = "test7_kw.txt"
    filnamn2 = "test8_kw.txt"
    filnamn3 = "test9_kw.txt"

    Index1 = np.r_[1340:1560, 1770:1980]
    Index2 = np.r_[1800:2000]
    Index3 = np.r_[220:1380]

    df1 = pd.read_csv(filnamn1, delimiter=';', decimal=',', skiprows=1, names=['Time', 'Temp', 'Position', 'Velocity', 'Force'], skipfooter=1, engine='python')
    df2 = pd.read_csv(filnamn2, delimiter=';', decimal=',', skiprows=1, names=['Time', 'Temp', 'Position', 'Velocity', 'Force'], skipfooter=1, engine='python')
    df3 = pd.read_csv(filnamn3, delimiter=';', decimal=',', skiprows=1, names=['Time', 'Temp', 'Position', 'Velocity', 'Force'], skipfooter=1, engine='python')

    df_temp = pd.concat([df1, df2, df3]) #För att visa temperaturen under hela körningen och inte bara subset:et

    df_subset = pd.concat([
        df1.iloc[Index1],
        df2.iloc[Index2],
        df3.iloc[Index3]
    ])
    totalfilnamn = filnamn1 + " " + filnamn2 + " " + filnamn3

else:

    filnamn_s = "test7_kw.txt"
    Index_Single = np.r_[1900:2200]
```

```

df_single = pd.read_csv(filnamn_s, delimiter=';', decimal=',', skiprows=1, names=['Time', 'Temp',
'Position', 'Velocity', 'Force'], skipfooter=1, engine='python')
df_temp = df_single #För att visa temperaturen under hela körningen och inte bara subset:et
df_subset = df_single.iloc[Index_Single]

totalfilnamn = filnamn_s

#df["Time"] = pd.to_datetime(df['Time'], format='%H:%M:%S')
#Seconds = (df["Time"] - df["Time"].iloc[0]).dt.total_seconds() #Antal sekunder från start av datalogg.

#Värdena från hela loggen
#Time = df["Time"]
Temp = df_temp["Temp"]
#Position = df["Position"]
#Velocity = df["Velocity"]
#Force = df["Force"]

#Filterera tempsignalen pga brus
Temp_Filtered = gaussian_filter1d(Temp, 15)

Temp_subset = df_subset["Temp"]
Position_subset = df_subset["Position"].values

#Velocity_subset = df_subset["Velocity"].values #Hastigheten NI har beräknat.

#Hastighet beräkant från position i efterhand. (funka bättre)
Velocity_subset = np.gradient(df_subset["Position"].values, 1/fs)
Velocity_subset[0] = Velocity_subset[1] #Första hastighetspunkten är skräp
Velocity_subset[-1] = Velocity_subset[-2] #Samma för sista hastighetspunkten

Force_subset = df_subset["Force"] + Force_offset

#Detektera hastighetens frekvens.
def detect_operating_frequency(velocity, fs):

    signs = np.sign(velocity)
    signs[signs == 0] = 1
    crossings = np.where(np.diff(signs) != 0)[0]
    if len(crossings) < 2:
        return None
    duration_s = len(velocity) / fs
    n_cycles = len(crossings) / 2.0
    return n_cycles / duration_s

Velocity_subset_raw = Velocity_subset
Force_subset_raw = Force_subset
Position_subset_raw = Position_subset
operating_freq = detect_operating_frequency(Velocity_subset_raw, fs) #Hastighetens frekvens.

#Lägg på lågpasfilter på hastighetssignalen något över hastighetsfrekvensen.
if operating_freq is None or operating_freq < 0.01:
    print("No clear sinusoidal motion detected - skipping low-pass filter.")
    velocity_filtered = Velocity_subset_raw
else:
    cutoff_freq = operating_freq * LPF_multiplier
    nyquist = fs / 2.0

    if cutoff_freq >= nyquist:
        cutoff_freq = nyquist * 0.9

```

```

    print(f"\nWarning: cutoff clamped to {cutoff_freq:.2f} Hz (near Nyquist).")

print(f"\nHastighet Operating frequency: {operating_freq:.3f} Hz")
print(f"Hastighet Low-pass cutoff:      {cutoff_freq:.3f} Hz "
      f" (= {LPF_multiplier}x operating frequency)")

b, a = butter(N=4, Wn=cutoff_freq / nyquist, btype='low')

#Kommentera dessa för att stänga av lågpasfilter.
Velocity_subset = filtfilt(b, a, Velocity_subset_raw)
Force_subset = filtfilt(b, a, Force_subset_raw) #Testar filter för kraft, kommentera för att stänga av
Position_subset = filtfilt(b, a, Position_subset_raw) #Testar filter för position, kommentera för att
stänga av

#Plotta generell info
plt.rcParams.update({'font.size': 13})
fig, ax = plt.subplots(2, 3, figsize=(13, 5))

fig.suptitle(f"Utdrag ur datalogg(ar): {totalfilnamn}", fontsize=12, fontweight='bold')

ax[1,0].plot(Velocity_subset)
ax[1,0].set_title("Hastighet")
ax[1,0].set_xlabel('Datapunkt (utdrag)')
ax[1,0].set_ylabel('m/s')

ax[0,0].plot(Position_subset, color='r')
ax[0,0].set_title("Position")
ax[0,0].set_xlabel('Datapunkt (utdrag)')
ax[0,0].set_ylabel('m')

ax[0,1].plot(Force_subset, color='g')
ax[0,1].set_title("Kraft")
ax[0,1].set_xlabel('Datapunkt (utdrag)')
ax[0,1].set_ylabel('N')

ax[1,1].plot(Temp_Filtered, color='m')
ax[1,1].set_title("Temperatur (Hela dataloggen)")
ax[1,1].set_xlabel('Datapunkt')
ax[1,1].set_ylabel('C')

#ax[1,1].scatter(Subset_start+(Subset_end-Subset_start)/2,Temp_Filtered[round(Subset_start+(Subset_end-
Subset_start)/2)], color='r')
#ax[1,1].set_title("Temperatur (Hela körningen)")

ax[0,2].scatter(np.abs(Velocity_subset), Force_subset)
ax[0,2].set_title("Hastighet vs Kraft")
ax[0,2].set_xlabel('m/s')
ax[0,2].set_ylabel('N')

ax[1,2].plot(Position_subset, Force_subset)
ax[1,2].set_title("Position vs Kraft")
ax[1,2].set_xlabel('m')
ax[1,2].set_ylabel('N')

ax[0,0].grid()
ax[1,0].grid()
ax[0,1].grid()
ax[1,1].grid()
ax[0,2].grid()

```

```

ax[1,2].grid()

plt.tight_layout()
plt.show()

#Ta fram ett område kring peaks/dalar där hastigheten bör vara så konstant som möjligt.

def extract_fv_peaks(velocity, force, flatness_pct):

    results = []

    signs = np.sign(velocity)
    crossings = np.where(np.diff(signs) != 0)[0] + 1
    boundaries = np.concatenate([[0], crossings, [len(velocity)]])

    for i in range(len(boundaries) - 1):
        seg_v = velocity[boundaries[i] : boundaries[i+1]]
        seg_f = force [boundaries[i] : boundaries[i+1]]

        if len(seg_v) < 2:
            continue

        abs_v = np.abs(seg_v)
        peak_abs = abs_v.max()

        if peak_abs < 1e-6:
            continue

        threshold = peak_abs * flatness_pct / 100.0
        flat_mask = np.abs(abs_v - peak_abs) <= threshold

        if flat_mask.sum() == 0:
            continue

        avg_v = seg_v[flat_mask].mean()
        avg_f = seg_f[flat_mask].mean()
        std_v = seg_v[flat_mask].std()
        std_f = seg_f[flat_mask].std()
        n_pts = flat_mask.sum()
        direction = "retur" if avg_v > 0 else "kompression"

        results.append({
            "half_cycle" : i + 1,
            "direction" : direction,
            "avg_V (m/s)" : round(avg_v, 5),
            "std_V (m/s)" : round(std_v, 5),
            "avg_F (N)" : round(avg_f, 3),
            "std_F (N)" : round(std_f, 3),
            "n_points" : int(n_pts),
        })

    return pd.DataFrame(results)

peaks = extract_fv_peaks(Velocity_subset, Force_subset, Flatness)

#Totala genomsnittet för kompression och retur
for direction in ["retur", "kompression"]:
    sub = peaks[peaks["direction"] == direction]
    if sub.empty:

```

```

        continue

    print(f"\n{direction.capitalize()} Genomsnitt: {np.abs(sub["avg_F (N)"].mean()):.2f}
N @ {np.abs(sub["avg_V (m/s)"].mean()):.4f} m/s")

#Plotta de valda punkterna från hastighetssignalen
plt.rcParams.update({'font.size': 14})
fig, axes = plt.subplots(1, 2, figsize=(13, 5))
fig.suptitle(f"Max/min avvikelse ±{Flatness}% - {totalfilnamn}", fontsize=12, fontweight='bold')

ax = axes[0]
ax.plot(Velocity_subset, linewidth=0.8, label="Hastighet")

ext_rows = peaks[peaks["direction"] == "retur"]
cmp_rows = peaks[peaks["direction"] == "kompression"]

abs_v      = np.abs(Velocity_subset)
signs      = np.sign(Velocity_subset)
crossings  = np.where(np.diff(signs) != 0)[0] + 1
boundaries = np.concatenate([[0], crossings, [len(Velocity_subset)]])

flat_idx = []
for i in range(len(boundaries) - 1):
    seg_v      = Velocity_subset[boundaries[i]:boundaries[i+1]]
    abs_sv     = np.abs(seg_v)
    peak_abs   = abs_sv.max()
    if peak_abs < 1e-6:
        continue
    threshold = peak_abs * Flatness / 100.0
    mask      = np.abs(abs_sv - peak_abs) <= threshold
    global_idx = np.arange(boundaries[i], boundaries[i+1])[mask]
    flat_idx.extend(global_idx.tolist())

flat_idx = np.array(flat_idx)
if len(flat_idx):
    ax.scatter(flat_idx, Velocity_subset[flat_idx], label=f"Max/min region (±{Flatness}%)", color='r')

ax.set_xlabel("Datapunkt (utdrag)")
ax.set_ylabel("Hastighet (m/s)")
ax.set_title("Max/min regioner")
ax.legend(fontsize=10, loc="upper right")
ax.grid()

# F-V scatter av genomsnitten för varje peak/dal
ax2 = axes[1]
if not ext_rows.empty:
    ax2.scatter(ext_rows["avg_V (m/s)"], ext_rows["avg_F (N)"], label="Retur")

if not cmp_rows.empty:
    ax2.scatter(cmp_rows["avg_V (m/s)"], cmp_rows["avg_F (N)"], label="Kompression")

ax2.set_xlabel("Genomsnitt Hastighet (m/s)")
ax2.set_ylabel("Genomsnitt Kraft (N)")
ax2.set_title("Genomsnitt per peak")
ax2.legend(fontsize=10, loc="upper right")
ax2.grid()

plt.tight_layout()
plt.show()

```

```

#Plotta FV. abs(velocity), förutsätter att hastigheten avgör om det är kompression eller returförlopp och
inte kraften pga konstiga problem.
ext = peaks[peaks["direction"] == "retur"].copy().sort_values("avg_V (m/s)")
cmp = peaks[peaks["direction"] == "kompression"].copy().sort_values("avg_V (m/s)")

ext["abs_V"] = ext["avg_V (m/s)"].abs()
cmp["abs_V"] = cmp["avg_V (m/s)"].abs()

fig, ax = plt.subplots(figsize=(7, 5))

if not ext.empty:
    ax.scatter(ext["abs_V"], np.abs(ext["avg_F (N)"]), label="Retur")
    ax.plot(ext["abs_V"], np.abs(ext["avg_F (N)"]))

if not cmp.empty:
    ax.scatter(cmp["abs_V"], -np.abs(cmp["avg_F (N)"]), marker="^", zorder=4, label="Kompression")
    ax.plot(cmp["abs_V"], -np.abs(cmp["avg_F (N)"]))

ax.set_xlim(left=0, right=peaks["avg_V (m/s)"].abs().max() * 1.12)
ax.set_xlabel("Hastighet (m/s)", fontsize=11)
ax.set_ylabel("Kraft (N)", fontsize=11)
ax.set_title(f"Kraft-hastighet - {totalfilnamn}", fontsize=12, fontweight='bold')
ax.legend(fontsize=10, loc="upper right")
ax.grid()

plt.tight_layout()
plt.show()

```

D

Lagerberäkning

```
# Python-kod för att beräkna lagerlivslängd
# Kandidatarbete: Stötdämpardyno
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

d = 0.40 # Avstånd mellan lager A och B
a1 = 0.090 # Motor (Remdrift) - Mellan A och B (90 mm från A)
a2 = d + 0.10 # Scotch Yoke (Utstick 100 mm utanför B = 500 mm från A)

n = 715 # Varvtal (RPM)
M_max = 53.6 # Max vridmoment (Nm)
F_pinne_peak = 1880 # Maxlast (Peak) för Scotch Yoke

Lager_A = {
    "namn": "SKF FY 30 TF",
    "C": 19.5e3,
    "C0": 11.2e3,
}

Lager_B = {
    "namn": "SKF FY 30 TF",
    "C": 19.5e3,
    "C0": 11.2e3,
}

sakerhetsfaktor_axial = 0.0

Lager_Pinne = {
    "namn": "2x SKF 6002-2RSH",
    "C": 4550,
    "C0": 1960,
}

Last_Motor = {
    "typ": "remdrift", "Rf": 0.145, "spannfaktor": 2.5, "vinkel": 270
}

Last_SY = {
    "typ": "scotch_yoke", "Rf": 0.013, "vinkel": 0
}

def berakna_kraft(last, moment):
    Ft = moment / last["Rf"]
    if last["typ"] == "remdrift":
        Fr = Ft * last["spannfaktor"]
        rad = np.radians(last["vinkel"])
        return Fr * np.cos(rad), Fr * np.sin(rad)
    elif last["typ"] == "scotch_yoke":
        return 0, Ft

fx1, fy1 = berakna_kraft(Last_Motor, M_max)
fx2, fy2 = berakna_kraft(Last_SY, M_max)

Fbx = -(fx1 * a1 + fx2 * a2) / d
Fby = -(fy1 * a1 + fy2 * a2) / d

Fax = -(fx1 + fx2 + Fbx)
Fay = -(fy1 + fy2 + Fby)
```

```

Fr_A = np.sqrt(Fax**2 + Fay**2)
Fr_B = np.sqrt(Fbx**2 + Fby**2)

P_A = Fr_A
P_B = Fr_B

S0_A = Lager_A["C0"] / P_A
S0_B = Lager_B["C0"] / P_B

L10h_A = (10**6 / (60 * n)) * (Lager_A["C"] / P_A) ** 3
L10h_B = (10**6 / (60 * n)) * (Lager_B["C"] / P_B) ** 3

lastfaktor_sinus = 0.65

F_pinne_medel = F_pinne_peak * lastfaktor_sinus

F_pinne_peak_per_lager = F_pinne_peak / 2
F_pinne_medel_per_lager = F_pinne_medel / 2

S0_pinne = Lager_Pinne["C0"] / F_pinne_peak_per_lager
L10h_pinne = (10**6 / (60 * n)) * (Lager_Pinne["C"] / F_pinne_medel_per_lager) ** 3

print("=" * 60)
print(f"RESULTAT: KORRIGERAD ENLIGT FEEDBACK")
print("=" * 60)
print(f" Geometri:")
print(f" Lager A (0 mm) -> Lager B ({d*1000:.0f} mm)")
print(f" Motor: {a1*1000:.0f} mm | Scotch Yoke: {a2*1000:.0f} mm")
print("=" * 60)

print(f"LAGER A: {Lager_A['namn']} (Flytande)")
print(f" Radiell last: {Fr_A:.0f} N")
print(f" Statisk Säk (S0): {S0_A:.2f}")
print(f" Livslängd L10h: {L10h_A:.0f} timmar")
if L10h_A > 50000: print(" -> Oändlig livslängd i praktiken.")

print("-" * 40)
print(f"LAGER B: {Lager_B['namn']} (Låsande)")
print(f" Radiell last: {Fr_B:.0f} N")
print(f" Axialkraft (antagen): 0 N")
print(f" Statisk Säk (S0): {S0_B:.2f}")
print(f" Livslängd L10h: {L10h_B:.0f} timmar")
if L10h_B > 50000: print(" -> Oändlig livslängd i praktiken.")

print("\n" + "=" * 60)
print(f"LAGER C: PINNE ({Lager_Pinne['namn']})")
print("=" * 60)
print(f" Peak-last totalt: {F_pinne_peak} N (Per lager: {F_pinne_peak_per_lager:.0f} N)")
print(f" Medellast (Dim): {F_pinne_medel_per_lager:.0f} N per lager")
print(f" Statisk Säk (S0): {S0_pinne:.2f}")
print(f" Livslängd L10h: {L10h_pinne:.0f} timmar")
print("=" * 60)

fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 5))

ax.plot([0, a2], [0, 0], "k", lw=4, zorder=1)

ax.plot(0, 0, "b^", ms=15, label="Lager A", zorder=2)
ax.plot(d, 0, "b^", ms=15, label="Lager B", zorder=2)

```

```

ax.text(0, 0.1, "Lager A\n(Flytande)", ha="center", color="blue")
ax.text(d, 0.1, "Lager B\n(Lást)", ha="center", color="blue")

ax.plot(d, 0, "rx", ms=10, markeredgewidth=2, zorder=3)

def rita_kraftpil(pos, color, text, y_offset, direction=-1):
    ax.arrow(pos, y_offset, 0, direction*0.25, color=color, width=0.015, head_width=0.04, zorder=3)
    ax.text(pos, y_offset + (0.1 if direction==-1 else -0.15), text, ha="center", color=color,
fontweight="bold")

rita_kraftpil(a1, "orange", f"Motor", 0.4)
rita_kraftpil(a2, "purple", f>Last", 0.4)

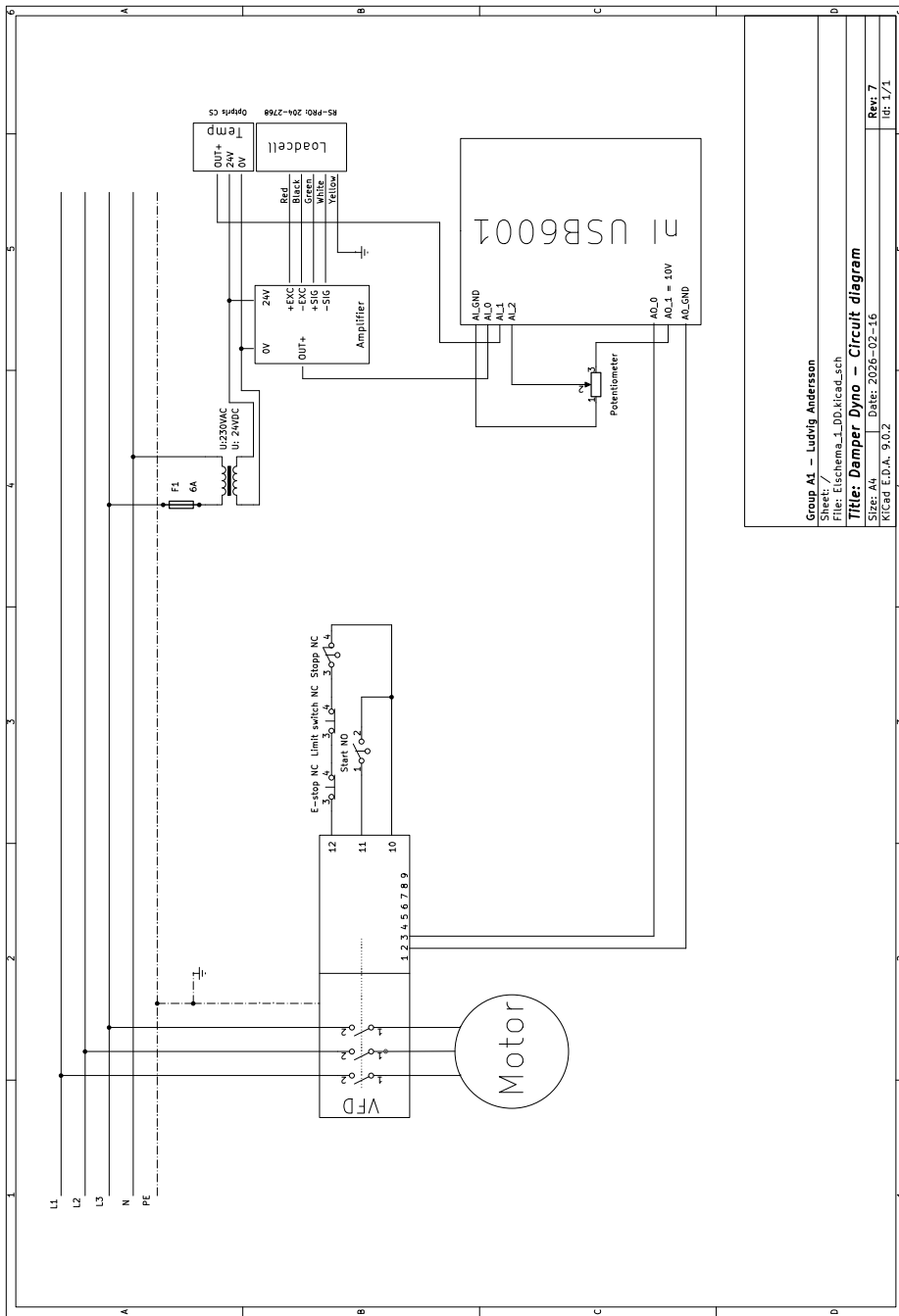
def rita_matt(start, end, y_level, text):
    ax.annotate("", xy=(start, y_level), xytext=(end, y_level),
arrowprops=dict(arrowstyle="<->", color="black", lw=1))
    ax.text((start + end) / 2, y_level + 0.05, text, ha="center", fontsize=9)
    ax.plot([start, start], [0, y_level], "k--", lw=0.5, alpha=0.5)
    ax.plot([end, end], [0, y_level], "k--", lw=0.5, alpha=0.5)

rita_matt(0, a1, -0.2, f"a1={a1*1000:.0f}")
rita_matt(0, d, -0.4, f"d={d*1000:.0f}")
rita_matt(0, a2, -0.6, f"a2={a2*1000:.0f}")

ax.set_ylim(-0.8, 0.8)
ax.set_xlim(-0.1, a2 + 0.1)
ax.axis("off")
plt.title("Lager positioner och laster", fontsize=14)
plt.show()

```


E Elschema



Group A1 - Ludvig Andersson
 Sheet /
 File: Elschema_1_00.kicad_sch
Title: Damper Dyno - Circuit diagram
 Size: A4
 Date: 2026-02-16
 R/Cad E.D.A. 9.0.2
 Rev: 7
 Id: 1/1

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2026

www.chalmers.se



CHALMERS