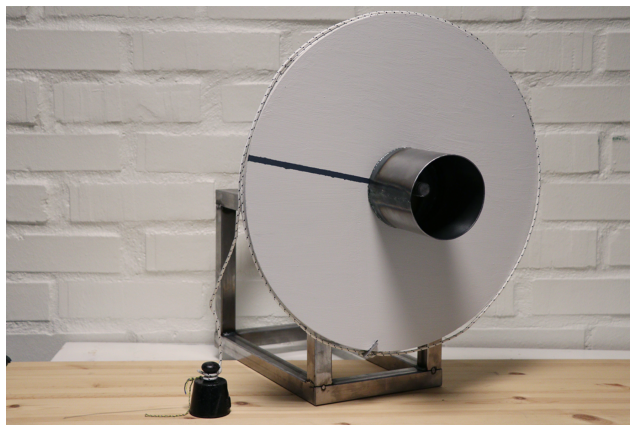
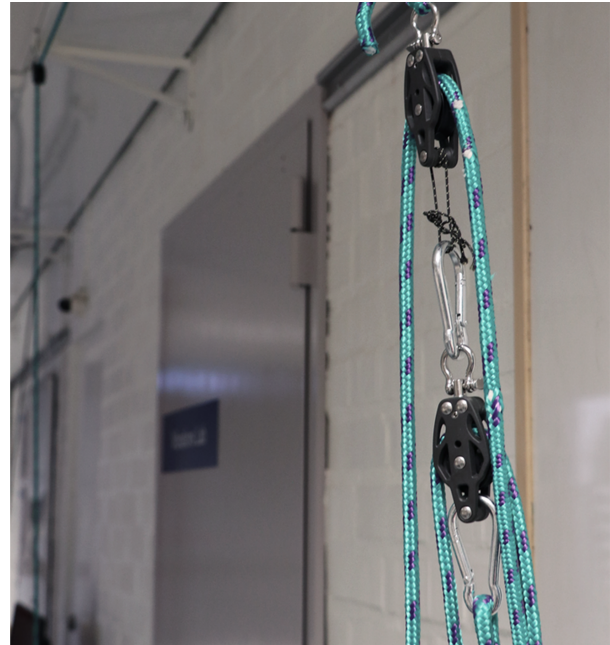
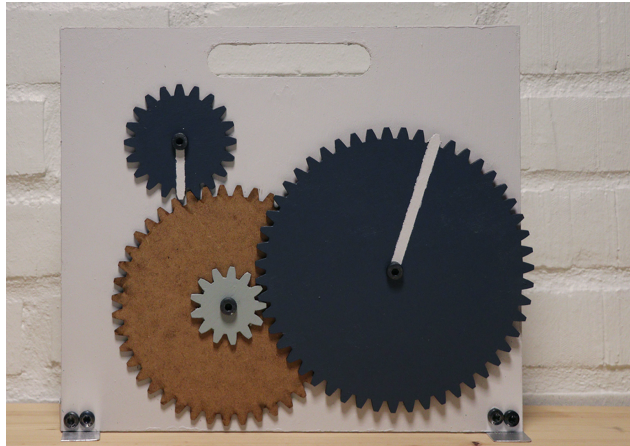




CHALMERS



Studio i mekanik och hållfasthetslära

Utökning av experiment och digital anpassning av studios innehåll

Kandidatarbete inom Mekanik och maritima vetenskaper

PONTUS BORG KARLSSON
ALICE FAKT
OLIVIA JØHANSEN
EMMA SIÖLAND
SIMON SVENSSON
SEBASTIAN ZAMOLA

**INSTITUTIONEN FÖR
MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER**

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2021
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2021:01

Studio i mekanik och hållfasthetslära

Utökning av experiment och digital anpassning av studions innehåll

PONTUS BORG KARLSSON
ALICE FAKT
OLIVIA JOHANSEN
EMMA SIÖLAND
SIMON SVENSSON
SEBASTIAN ZAMOLA

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Avdeleningen för dynamik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2021

Studio i mekanik och hållfasthetslära
Utökning av experiment och digital anpassning av studios innehåll
PONTUS BORG KARLSSON
ALICE FAKT
OLIVIA JOHANSEN
EMMA SIÖLAND
SIMON SVENSSON
SEBASTIAN ZAMOLA

© PONTUS BORG KARLSSON · ALICE FAKT · OLIVIA JOHANSEN · EMMA
SIÖLAND · SIMON SVENSSON · SEBASTIAN ZAMOLA, 2021.

Handledare: Mats Ander, Avdelningen för Material- och beräkningsmekanik, IMS
Examinator: Peter Folkow, Avdelningen för Dynamik, M2

Kandidatarbete 2021:01
Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: +46 (0)31 772 1000

Omslag: Nyttillverkade experiment, sett från vänster till höger, upp till ner: Kugg-
hjulmodell, System med trissor och linor, Visualisering av masströghetmoment,
Krympförband.

Skrivet i L^AT_EX
Tryckeri /Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Göteborg, Sverige 2021

Abstract

The studio in Mechanics and Solid Mechanics was started in 2012. The purpose of the studio is to complement the theoretical material that the basic education on Chalmers University of Technology contains with material that visualizes different elements of primarily mechanics and solid mechanics, but also e.g. machine elements. Since the studio was started multiple bachelor projects have worked to develop and create new material as well as further develop existing material.

The results and conclusions from the studio's previous bachelor projects, as well as interviews with teachers within the areas of study, the development of an educational framework, and own experiences have been used as a base for the production of new material.

Four new experiments have been produced during the project. These additions are about the areas moment of inertia, forces in wires, gearing and shrink joints. Uniquely, this year's project also focuses on digitizing the existing material, as this has become a relevant topic following the COVID-19 pandemic.

The material currently in use in the mechanics and solid mechanics courses is well-complemented by the studio's new additions. A possible next step within this project would be to carry out a more thorough study in pedagogy, on the suggestion of Chalmers students of Chalmers, which later on can be applied to the development of the studio.

Sammandrag

Studion i mekanik och hållfasthetslära tillkom 2012. Innehållet i studion har syftet att komplettera det teoretiska materialet i grundundervisningen på Chalmers tekniska högskola med material som visualiserar olika moment inom främst mekanik och hållfasthetslära, men även t.ex. maskinelement. Sedan studion skapades har flera kandidatgrupper utvecklat dess innehåll med nytt material och vidareutvecklat befintligt material.

Resultat och slutsatser från tidigare års kandidatarbeten, intervjuer med lärare inom ämnena, utvecklandet av ett pedagogiskt ramverk och egna erfarenheter har legat till grund för framtagningen av nytt material.

Under arbetet har fyra helt nya experiment tillverkats. Dessa tillskott berör områdena masströghetsmoment, linkrafter, utväxling på kugghjul och krympförband. Unikt för kandidatarbetet i år är att utöver de fysiska experiment som tillverkats funnits ett fokus på digitalisering av befintliga fysiskt material, då detta blivit högst aktuellt till följd av pandemin COVID-19.

Materialet som idag används i undervisningen av mekanik och hållfasthetslära kompletteras väl av studions nya tillskott. Att genomföra en mer ingående pedagogisk studie, förslagsvis på Chalmers egna studenter, som senare kan appliceras på studions utveckling är ett möjligt nästa steg i arbetet.

Förord

Följande rapport är ett kandidatarbete som har bedrivits vid institutionen för mekanik och maritima vetenskaper under våren 2021. Kandidatgruppen består av sex civilingenjörsstudenter, varav fem läser med inriktning maskinteknik och en med inriktning teknisk fysik.

Vi vill ge ett varmt tack till vår handledare Mats Ander och vår examinator Peter Folkow som har gett oss värdefulla tips och stöd under projektets gång. Vidare vill vi tacka Jim Brouzoulis, Mikael Enelund och Peter Folkow som ställt upp på intervjuer och bidragit med nytänkande idéer. Även tack till Per-Olof Nilsson från fysikaliska leksaker som gett en väldigt inspirerande föreläsning, Chalmers Cortege Committee för utlåning av svets samt xPerimentsverkstaden som har möjliggjort tillverkning av våra experiment.

Pontus Borg Karlsson, Alice Fakt, Olivia Johansen, Emma Siöland, Simon Svensson, Sebastian Zamola , Göteborg, Maj 2021

Innehåll

Figurer	x
Tabeller	1
1 Inledning	2
1.1 Syfte	2
1.2 Avgränsningar	3
1.3 Begreppslista	3
2 Pedagogiskt ramverk	5
2.1 Praktiskt lärande	5
2.2 Digital undervisning och interaktivt lärande	7
2.2.1 Repetition som del av inlärningsprocessen	7
3 Urval och Genomförande	9
3.1 Förarbete	9
3.1.1 Intervjuer	9
3.1.2 Inventering	10
3.1.3 Val av koncept	10
3.2 Nya experiment	11
3.2.1 Visualisering av masströghetsmoment	11
3.2.2 Kugghjulsmodell	12
3.2.3 Krympförband	14
3.2.4 Trissor och linkrafter	15
3.3 Tillämpning av befintligt material	16
3.3.1 Kontinuerligt upplagd balk	17
3.3.2 Laboration i hållfasthetslära	18
3.3.3 Digitalisering av befintliga laborationer	18
4 Resultat	19
4.1 Nya experiment	19
4.1.1 Visualisering av masströghetsmoment	19
4.1.2 Kugghjulsmodell	22
4.1.3 Krympförband	23
4.1.4 Trissor och linkrafter	25

4.2	Tillämpning av befintligt material	26
4.2.1	Kontinuerligt upplagd balk	26
4.2.2	Laboration i hållfasthetslära	27
4.2.3	Digitalisering av laboration inom statik och hållfasthetslära	28
5	Diskussion	29
5.1	Planering och avgränsningar	29
5.2	Pedagogiskt ramverk	29
5.3	Förarbete	30
5.3.1	Intervjuer	30
5.3.2	Val av koncept	30
5.4	Nya experiment	31
5.4.1	Visualisering av masströghetsmoment	31
5.4.2	Kugghjulsmodell	32
5.4.3	Krympförband	32
5.4.4	Trissor och linkrafter	33
5.5	Tillämpning av befintliga experiment	33
5.5.1	Kontinuerligt upplagd balk	33
5.5.2	Laboration i hållfasthetslära	34
5.5.3	Digitalisering av statik- och hållfasthetslaboration	34
	Litteraturförteckning	35
A	Prioriteringsmatris	I
B	Urvalsmatris för experiment till laboration i hållfasthetslära	II
C	Ritningar på Kugghjulsmodellen	III
C.1	Avstånd för andra versionen av Kugghjulsmodellen	III
C.2	Avstånd på den färdigställda Kugghjulsmodellen	III
D	Intervjuer	IV
D.1	Intervju med Mikael Enelund	V
D.2	Intervju med Jim Brouzoulis	VI
D.3	Intervju med Peter Folkow	VII
E	Laboration i hållfasthetslära	VIII
F	Frågeställningar till experimentfilmer	XIV
F.1	Dragprov	XV
F.2	Flytta moment	XVI
F.3	Friktion	XVII

Figurer

2.1	Relationen mellan experiment, laboration och praktiskt arbete, avbildad efter Hodsons modell.	5
3.1	Digital modell för kugghjulsmodell	13
3.2	Friläggning av trissor och linor	15
3.3	Optimistjolle	16
3.4	Första skiss på experiment med trissor.	16
3.5	Elementarfall	17
4.1	Visualisering av masströghetsmoment med testkropp monterad	20
4.2	Energikonservering från tillfälle ett och två	20
4.3	Slutgiltig Kugghjulsmodell i digitalt format	22
4.4	Kugghjulsmodellen	23
4.5	Krympförband	24
4.6	Den digitala finita elementmodellen som visar axelns expansion . . .	24
4.7	System av trissor och linor monterat i studion	25
4.8	Utökning av stödtyper till Kontinuerligt upplagd balk	26
4.9	Utböjning vid användning av det nya stödet	27

Tabeller

3.1	Valda koncept och dess prioriteringsordning	11
4.1	Specifikationer för kugghjulsmodell	22
4.2	Avstånd mellan kugghjulen	23

1

Inledning

Projektet bygger på tidigare kandidatarbeten som utförts vid institutionerna för tillämpad mekanik, mekanik och maritima vetenskaper samt industri och materialvetenskap, med syfte att bygga upp studion i mekanik och hållfasthetslära. Studion används som en del av undervisningen i bland annat statik, dynamik och hållfasthetslära på Chalmers och ligger i Maskinhusets källare. Experimenten visar på fenomen som bland annat balkböjning, masströghetsmoment, spänningskoncentrationer och linkrafter. Dessa visas främst genom fysiska men även genom digitala experiment vars syfte är att öka studenters förståelse inom relevanta ämnesområden. Studion är även utrustad med bänkstationer, en whiteboard, skåp för förvaring och ett anslutande större förråd.

Användningen av studions innehåll varierar beroende på kurs och lärare. Experimenten används både för demonstration i sal och som moment i stationslaborationer där studenterna själva får stå för utförandet. Eftersom kurserna i statik, dynamik och hållfasthetslära ofta är väldigt teoretiskt fokuserade fungerar studions innehåll som ett mer praktiskt komplement till den teoretiska utbildningen. Experimenten kan bidra till studenternas förståelse genom att visualisera de komplexa fenomen som kurserna behandlar.

Till följd av pandemin i COVID-19 uppkom ett behov av att genomföra undervisningen på distans. Dock är inte dagens pedagogik nödvändigtvis anpassad till distansundervisning och laborationer som annars genomförts på plats har varit tvungna att anpassas för detta nya undervisningssätt. Till skillnad från tidigare års arbeten kommer därför en del av arbetet att bestå av att digitalisera studions material.

1.1 Syfte

Projektets syfte är att bidra med material i form av experiment och laborationer, samt digitalt material för interaktivt lärande. Materialet ämnar att utöka studion i mekanik och hållfasthetslära, som kompletterar befintligt kursmaterial som används i undervisning inom ämnena.

För att uppnå syftet delas arbetet upp i följande delmål:

- Tillverka nya experiment.
- Utforma laborationer för de behandlade experimenten.
- Framställa digitalt material för interaktivt lärande.
- Reparera och komplettera befintliga experiment.

1.2 Avgränsningar

Arbetet är avgränsat till att främst behandla områden inom statik, dynamik, hållfasthetslära och maskinelement. Inom de olika områdena sattes avgränsningar utifrån lärandemål för relevanta kurser. Ytterligare avgränsningar inom områdena sattes efter samtal med lärare från relevanta kurser för att undersöka vilka moment som studenter ofta upplever som svåra. Då gruppens majoritet består av studenter från maskinprogrammet kommer fokus ligga på kurser som läses på detta program. Experimenten bör kunna genomföras på så kort tid att de kan demonstreras på en föreläsning eller fungera som del i en stationslaboration.

Lokalen sätter vissa gränser sett till takhöjd och tillgänglig yta. De experiment som tas fram bör lämpligen få plats i de skåp som finns i studion, eller i studions förråd. Tillverkningen av fysiska experiment är begränsad till att utföras i Prototyplaboratoriet. Även arbetets budget är begränsad, vilket kan komma påverka utförandet av experiment. Vidare är arbetet som helhet begränsat till att genomföras under vårterminen 2021. Begränsningen avser tidsramen i sig, men även den pågående pandemin i COVID-19. Följden av pandemin är de gällande restriktionerna, vilka påverkar fysiska sammankomster och besök.

1.3 Begreppslista

I följande lista beskrivs begrepp som senare förekommer i rapporten utan vidare förklaring.

CAD, från engelskans "Computer assisted design", är ett verktyg att designa ritningar och sammansättningar av experiment.

Experiment i det här arbetet syftar på både fysiskt och digitalt material som ska visualisera ett eller flera fysikaliska fenomen och därmed komplettera teoretiskt material kring det.

FEM är en förkortning för finita element-metoden.

Laboration i detta arbete syftar på utförandet av ett eller flera experiment, där studenter själva är delaktiga och följer instruktioner som slutligen ska ge ett resultat.

Laborationsinstruktioner är det dokument som innehåller bakgrund och instruktioner till en laboration för att strukturera genomförandet.

Prototyplabbet är en mekanisk verkstad för att tillverka prototyper som ligger i Maskinhusets källare.

Studion är en kortare benämning av studion i mekanik och hållfasthetslära.

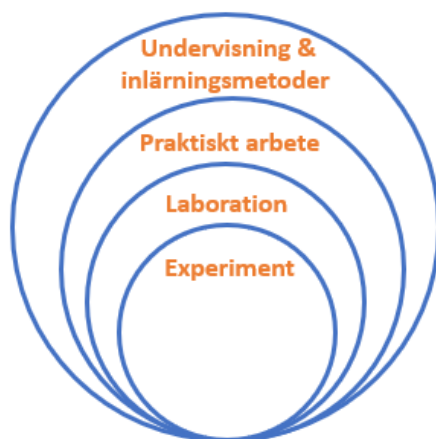
2

Pedagogiskt ramverk

En övergripande undersökning i pedagogik har genomförts för att få en bakgrund till hur experimenten bör utformas för att underlätta studenternas lärande. Inledningsvis undersöktes hur studenter lär sig genom praktiska moment, såsom fysiska laborationer, och varför dessa bör inkluderas i undervisningen även ur en icke-teknisk aspekt. En viktig del av detta är att även undersöka hur dessa bör utformas. Vidare följer en diskussion kring hur en digital hybridundervisning kan inkluderas i undervisningen och hur det kan främja lärandet. Även vikten av repetition som en del av inlärningsprocessen tas upp i samband med införandet av fler digitala moment.

2.1 Praktiskt lärande

Skillnaden mellan begreppen laboration, experiment och praktiskt arbete är sällan uppenbar. Ett sätt att betrakta det är att experiment kan ses som en undergrupp till laborationer, som i sin tur kan ses som en undergrupp till praktiskt arbete [Hodson, 1988]. Praktiskt arbete ser Hodson som en typ av undervisning- och inlärningsmetod, vilket leder till alla tidigare nämnda undergrupper även betraktas som undergrupper till metoder för lärande, se figur 2.1.



Figur 2.1: Relationen mellan experiment, laboration och praktiskt arbete, avbildad efter Hodsons modell.

Det finns flera olika motiv för att inkludera laborativ verksamhet i den högre tekniska utbildningen. Motiven berör ofta rent tekniska aspekter, då laborationer många gånger ämnar att fylla något eller några av följande syften [McKelvey, 1999]:

- **Ge teknisk erfarenhet**, då många inte tillämpat teknik praktiskt innan sina högskolestudier.
- **Skapa intresse och visa tillämpningar** för området experimentet berör.
- **Komplettera teorin**, då laborationer ger en grundläggande förståelse för skillnader mellan en teoretisk modell och experiment som modellen beskriver.
- **Möjliggöra inläring med alla sinnen**, till skillnad från att t.ex. lära sig teori från en bok, där man främst jobbar med endast ett sinne.

McKelvey menar att det även finns motiv som berör icke-tekniska aspekter. Laborationer kan bidra till utveckling av en eller flera kompetenser som inte är direkt kopplade till tekniskt arbete men, som McKelvey argumenterar för, ändå är väldigt viktiga för en arbetsgivare. Han listar följande icke-tekniska syften som laborationer kan ha:

- **Förbättra den sociala kompetensen** då laborationer mestadels utförs i grupp vilket medför samarbete mellan studenterna.
- **Kommunicera** i tal och skrift, då laborationens resultat redovisas ofta i antingen rapportform eller i en presentation.
- **Ställa upp mål** som ska uppnås genom planering och genomförande inom ett visst tidsspann.
- **Kombinera teori, komponenter, instrument och verktyg** till ett fungerande system, samt hitta fel i komplexa system.
- **Träna den analytiska förmågan**, då laborationer bygger på att det ska dras slutsatser utifrån hypoteser och observationer.

Gällande utformningen av laborationer spelar laborationsinstruktionerna en central roll då det är ett viktigt verktyg för kommunikation mellan laborationshandledaren och studenterna. Frågeställningarna i instruktionerna har en stark påverkan på vilken typ av kunskap som involveras när laborationen utförs av studenterna [Tiberghien et al., 2001]. Laborationer inom fysik på universitetsnivå tenderar att vara mer slutna, d.v.s. vara förbestämda gällande följande aspekter:

- **Frågeställningen** som ska adresseras
- **Utrustningen** som ska användas
- **Tillvägagångssättet** som ska följas

- **Metoderna** för att hantera den insamlade datan
- **Tolkningen av resultaten**

2.2 Digital undervisning och interaktivt lärande

Det finns inga tydliga svar på frågan om huruvida studenter lär sig mer genom virtuella laborationer än fysiska, men det finns ständigt pågående forskning kring ämnet. I ett försök från 2016 jämförde Son hur väl elever presterade när de fick arbeta med virtuella laborationer jämfört med fysiska [Son, 2016]. Under samma försök jämfördes även den tid studenterna behövde använda till laborationerna i jämförelsen mellan fysiska och virtuella laborationer. Resultatet av Sons försök var att eleverna som arbetat med den virtuella laborationen presterade bättre på ett efterföljande test än de som utfört den fysiska. Dessutom fann de att eleverna som arbetade med den fysiska laborationen krävde mer tid för utförandet, än till den virtuella.

En ytterligare slutsats är att virtuella element fungerar bäst som komplement till fysiska laborationer eftersom flera representationer av fysikaliska fenomen förbättrar elevernas förståelse [Adadan, 2012]. En studie utförd vid University of Colorado där man framtagit interaktiva simuleringar av ett flertal fysikaliska fenomen upplevde 62 % av eleverna att de hade stor användning av simuleringarna [Perkins, 2006]. Detta kan jämföras med att endast 27 % upplevde att kurslitteraturen var till lika stor nytta för deras inläring. Detta bekräftas även av Sons studie där resultatet visade att de elever som fått en hybridundervisning med både virtuella laborationer och fysiska laborationer fått ökad positiv inställning till ämnet. Dessutom fick eleverna som deltog i hybridundervisningen i genomsnitt högre betyg [Son, 2016].

Virtuella laborationer har även möjligheten att vara mer självinstruerande. Detta innebär att laborationen kan utrustas med exempelvis pilar som representerar kraftvektorer och andra indikatorer som ämnar att förtydliga laborationen. Detta koncept kan även appliceras på fenomen som inte är synliga för ögat, såsom atomer och elektriska fält. Detta ökar elevens möjlighet att förstå komplexa fenomen [Perkins, 2006].

2.2.1 Repetition som del av inlärningsprocessen

Att ha inspelade eller animerade experiment ger studenten en möjlighet att repetera laborationen i efterhand, vilket underlättar inlärningsprocessen. I arbetsminnet processas information men kan endast hålla denna information under en kortare stund. Det är i långtidsminnet som färdigheter och kunskaper sedan lagras, och den kunskap som lagras här kan senare användas snabbt och automatiskt, nästintill omedvetet. Att sortera och organisera kunskapen från arbetsminnet är en iterativ process som kräver upprepning vid flera tillfällen. Om repetitionerna dessutom kan spridas ut med några dagars mellanrum kommer studenten komma ihåg innehållet under en längre tid och öka studentens förståelse [Mayer, 2003]. Denna typ av re-

petition för lagring av kunskap i långtidsminnet kan alltså lättare tillgängliggöras med hjälp av digitala laborationer, genom att studenten själv kan utföra eller se laborationen utföras flera gånger.

3

Urval och Genomförande

Processen för att utveckla experiment har utförts på ett iterativt sätt. Som underlag till konceptgenereringen utfördes intervjuer med lärare i kurser inom mekanik och hållfasthetslära. Vidare inventerades även studion och dess befintliga material. Med denna information kunde sedan en konceptgenerering utföras. Därefter utfördes en urvalsprocess för att bestämma de slutgiltiga experimenten och laborationerna för vidare utveckling. Experimenten utvecklades sedan genom skissande och framtagande av detaljbekrivning. Senare kunde experimenten modelleras i CAD. I de fall där det behövdes byggdes prototyper för att testa nödvändiga funktioner innan de slutgiltigen producerades.

3.1 Förarbete

Som förarbete till projektet gjordes intervjuer och en inventering av studions material. Med detta som underlag togs en prioriteringsmatris fram. Ett urval av konceptidéer kunde sedan göras med hjälp av prioriteringsmatrisen.

3.1.1 Intervjuer

För att undersöka behovet av laborationer och experiment som undervisningsmaterial intervjuades lärare och examinatorer i kurser inom mekanik och hållfasthetslära. Intervjuerna genomfördes i projektets början med syftet att undersöka intresset av de olika experimentidéerna och de planerade laborationerna. Utöver detta undersöktes om det finns specifika kursmoment som examinatorerna märkt att studenterna haft speciellt svårt för. Frågorna som ställdes var öppna för att respondenten själv skulle kunna ta upp saker som den intervjuade ansåg viktiga. Intervjuerna kan läsas i bilaga D.

De intervjuade lärarna är Mikael Enelund, Jim Brouzoulis och Peter Folkow vid Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper. Alla intervjuer genomfördes online via videosamtal.

Genom intervjuerna kunde ett behov av både fysiska och digitala laborationer bekräftas, vilket gav underlag för var fokus bör ligga i projektet. De gav även inspiration för hur digitalt material kan utvecklas för att bäst engagera studenter.

3.1.2 Inventering

Ett tidigt steg i processen var att inventera befintligt material i studion för att få en överblick över studions innehåll. Med detta som bakgrund kunde en sammanställning göras över vilka områden som saknar experiment, vilka experiment som behöver repareras och vilka som har potential för vidareutveckling.

I studion finns material som tillhör en stationslaboration som används i kurser inom statik och hållfasthetslära. Där ingår experiment som berör moment, friktion, linor och trissor, fackverk och ett dragprov med metallstav. Det finns även experiment som berör fler fenomen inom mekanik och hållfasthetslära, samt områden inom maskinelement.

3.1.3 Val av koncept

Redan i projektets början fanns en stor mängd konceptidéer för både framtagning av nya experiment, vidareutveckling av existerande experiment och digitalisering av befintligt material.

För att kunna strukturera upp det fortsatta arbetet togs en prioriteringsmatris fram för de nya experimenten, se bilaga A. Kriteriefrågor sattes för att avgöra hur respektive koncept skulle prioriteras. För varje kriterium fick konceptidéerna antingen ett "ja" eller "nej", och ju fler "ja" ett experiment fick desto högre prioritering fick det. En prioriteringsordning mellan 1 och 4 användes, där fem "ja" motsvarar prioriteringsplacering 1, fyra "ja" motsvarar prioriteringsplacering 2 osv. Om ett experiment fick endast "nej" valdes detta experiment bort, eftersom experimentet då inte uppfyller ett enda av de satta kriterierna.

Kriterierna baserades dels på gruppens egna uppfattning och dels på de genomförda intervjuerna. Kriterierna användes för att undersöka om det finns ett behov av experimentet, om hur lång tid det skulle krävas för att utveckla och tillverka experimentet och om det redan fanns liknande experiment i studion.

De fem kriteriefrågorna som användes är följande:

- Hur relevant är experimentet för kurser inom statik, dynamik, hållfasthetslära och maskinelement?
- Berör det ett komplext område?
- Finns det intresse från lärare och studenter?
- Är det ett unikt experiment för studion?
- Är utvecklingstiden rimlig inom avgränsningarna?

Med matrisen som underlag valdes alltså hur mycket tid som skulle läggas på experimenten, och prioriteringsordningen i vilken experimenten och koncepten skulle genomföras. I tabell 3.1 presenteras de experiment som valdes för utveckling, samt

deras prioriteringsordning. Arbetet med redan befintliga experiment, nämnt i avsnitt 3.1.2, valdes att föras parallellt med utvecklingen av dessa nya experiment.

Tabell 3.1: Valda koncept och dess prioriteringsordning

Koncept	Prioriteringsordning
Krympförband	1
Masströghet	2
Kugghjulsmodell	2
Trissor och linkrafter	2

Utöver dessa nya experiment valdes befintligt material ut för vidareutveckling. För dem krävdes ingen prioriteringsordning, utan planerades utföras parallellt med tillverkningen av de nya experimentet.

3.2 Nya experiment

För att arbeta vidare med de valda koncepten för nya experiment studerades teorin bakom området som respektive experiment berör. Nedan beskrivs denna teori samt utveckling och produktion.

3.2.1 Visualisering av masströghetsmoment

Om en ihålig boll och en solid boll med samma massa rullas nedför en backe kommer den ena accelerera snabbare. Detta beror på att när en stel kropp roteras kring en axel finns det en tröghet i kroppen som vill förhindra rotationen. Detta är kroppens masströghetsmoment. Det går att likna en partikels masströghetsmoment vid rotation med partikels massa vid translation [Simonsson, 2016]. Till skillnad från motståndet vid translation är det inte bara massan som bestämmer kroppens masströghetsmoment utan också avståndet från masscentrum till den axel som kroppen roteras runt. En kropps masströghetsmoment fås genom att multiplicera kroppens massa med avståndet till axeln som kroppen roterar kring i kvadrat. Betraktas ett partikelsystem av flera element eller kroppar blir summan av elementens bidrag systemets totala masströghetsmoment [Grahm and Jansson, 2013]. Formeln för masströghetsmoment för ett system kring en axel λ , J_λ finns i ekvation 3.1.

$$J_\lambda = \sum m_i a_i^2 \quad (3.1)$$

Av formeln går att utläsa att masströghetsmomentets enhet är $[kgm^2]$. Det inte är samma som hållfasthetslärans yttröghetsmoment, $[m^4]$, som istället berör hur mycket motstånd ett balktvärsnitt erfar vid utböjning. Dessa bör därför inte förväxlas. I ekvation 3.2 och 3.3 finns de matematiska definitionerna för yttröghetsmoment, I_y och masströghetsmoment, J_y med avseende på y-axeln. Avståndet till axeln betecknas z . Detta betyder att yttröghetsmoment och masströghetsmoment är lika

matematiskt, men de betyder olika saker rent fysikaliskt [Ljung et al., 2007].

$$I_y = \int_A z^2 dA \quad (3.2)$$

$$J_y = \int_m z^2 dm \quad (3.3)$$

Om masströghetsmomentet runt tyngdpunkten för en kropp är känt (betecknad \bar{J}) går det att använda Steiners sats, ekvation 3.4, för att räkna ut det kring en parallell axel för samma kropp. Formeln ger att man använder tröghetsmomentet kring tyngdpunkten och adderar Steinertillägget vilket består av kroppens massa och den parallella axelns avstånd till tyngdpunkten i kvadrat.

$$J = \bar{J} + md^2 \quad (3.4)$$

Om endast konservativa krafter påverkar ett system så bevaras den mekaniska energin enligt energilagen, se ekvation 3.5 [Grahn and Jansson, 2013]. Vid applicerande av lagen betraktas systemet vid två olika lägen. Ofta först när systemet är i vila och har potentiella energin V_1 och kinetiska energin T_1 , för att sedan vara i rörelse och ha potentiella energin V_2 och kinetiska energin T_2 . Lagen gäller då inga icke-konservativa krafter, såsom friktion eller luftmotstånd, verkar på systemet.

$$T_1 + V_1 = T_2 + V_2 \quad (3.5)$$

Hur den kinetiska energin T är definierad beror på systemets rörelse. Är systemet satt i en rätlinjig rörelse ges kinetiska energin av ekvation 3.6. Roterar systemet ges den kinetiska energin enligt ekvation 3.7.

$$T = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.6)$$

$$T = \frac{1}{2}J\omega^2 \quad (3.7)$$

Genom diskussioner och skissande genererades ett koncept för att demonstrera kroppars masströghetsmoment. För att modellera och generera ritningar till konceptet användes CATIA V5 [3DS, 2019]. Därefter tillverkades konstruktionen i prototyp-labbet.

3.2.2 Kugghjulsmodell

En växellåda består av en samling kugghjul som är kopplade till varandra. Med hjälp av dessa är det möjligt att justera rotationshastigheten från ett hjul till ett annat. Konceptet som uppstår kallas utväxling och har många användningsområden.

Då ett kugghjul roterar så följer sammankopplade kugghjul den totala rörelsen. Denna princip gäller allmänt och kan exemplifieras med att ett hjul som har en omkrets $2\pi R$ behöver rotera två varv för att motsvara ett helt varv för ett hjul med omkrets $2\pi 2R$. Utväxlingen i för två sammanlänkade kugghjul beror av förhållandet mellan vinkelhastigheterna ω_1 och ω_2 . Även förhållandet mellan antalet tänder, n_1 och n_2 ,

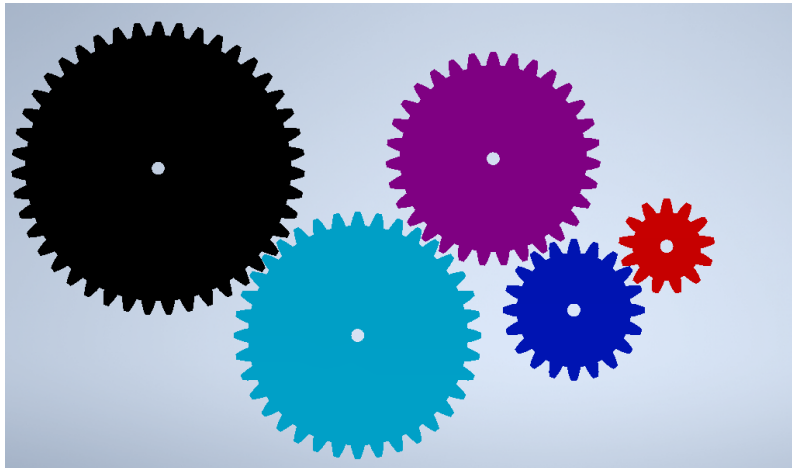
påverkar utväxlingen [Evertsson and Svedensten, 2009]. Sambandet kan beräknas enligt formel 3.8.

$$i = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (3.8)$$

Målet för kugghjulsmodellen är att visa hur utväxlingar kan åstadkommas i mekanismer, instrument och maskiner. Vid framtagande av modellen beaktas att kugghjulen inte kan vara för små i storleksordning, då det medför en risk för att tänderna går sönder när systemet används. För att göra modellen enkel att presentera, så måste kugghjulens dimensioner anpassas så att det är lätt att se skillnader mellan specifika kugghjul. Systemet behöver vara mobilt för att kunna användas som demonstrationsmaterial på t.ex. föreläsningar.

Kugghjulsmodellen ska visa hur utväxlingen kan fördelas jämnt för kugghjulen. Därför behöver antalet tänder väljas till vardera kugghjul så att dem inte har några gemensamma nämnare.

För att modellera kugghjulen användes CAD-programmet Autodesk Inventor [Autodesk, 2020] och programmets "Spur gear"-verktyg. Verktöget illustrerar ett kugghjulspar, med möjlighet att ställa in storleken och utväxlingen. Funktionen gjorde det även möjligt att ställa in tandgapet mellan kugghjulen. Eftersom flera kugghjul önskades så justerades detta i en gemensam modell för alla kugghjulen. En första digital modell konstruerades enligt figur 3.1. Med hjälp av denna modell kunde sedan en prototyp tillverkas för att testa konstruktionens funktioner praktiskt. Därefter kunde den digitala modellen justeras, för att åtgärda problem som uppstod, och den slutgiltiga produkten tillverkades.



Figur 3.1: Digital modell för kugghjulsmodell

3.2.3 Krympförband

Om man tar ut en glasburk med ett metallock från kylskåpet kan det vara svårt att öppna den, men om den fått stå en stund i rumstemperatur går det lättare. Det beror på att olika material expanderar olika mycket vid uppvärmning. I detta fallet expanderar metallocket mer än glasburken. Hur mycket det expanderar beror även på hur mycket värme som tillförs. Den termiska töjningen kan beräknas enligt formel 3.9 där ϵ^T är töjningen som beror på temperaturskillnaden. Värmeutvidgingskoefficienten α är materialspecifik och mäts i $1/^\circ C$. Temperaturskillnaden ΔT är differensen mellan temperaturerna före och efter materialet värmts.

$$\epsilon^T = \alpha \Delta T \quad (3.9)$$

Töjningen är enhetslös då den anges som förhållandet mellan den radiella förlängningen δr och kroppens ursprungsradi r_0 , se formel 3.10.

$$\epsilon = \frac{\delta r}{r_0} \quad (3.10)$$

Vid montering av axlar är det vanligt att man passar in dessa genom att värma dem eller dimensionera för att de kommer värmas under drift. Om en axel monteras och expanderar uppstår tryck i kontaktpunkten. Vid dimensionering av axlar är det viktigt att det trycket inte gör att axeln eller det axeln monteras till plasticerar.

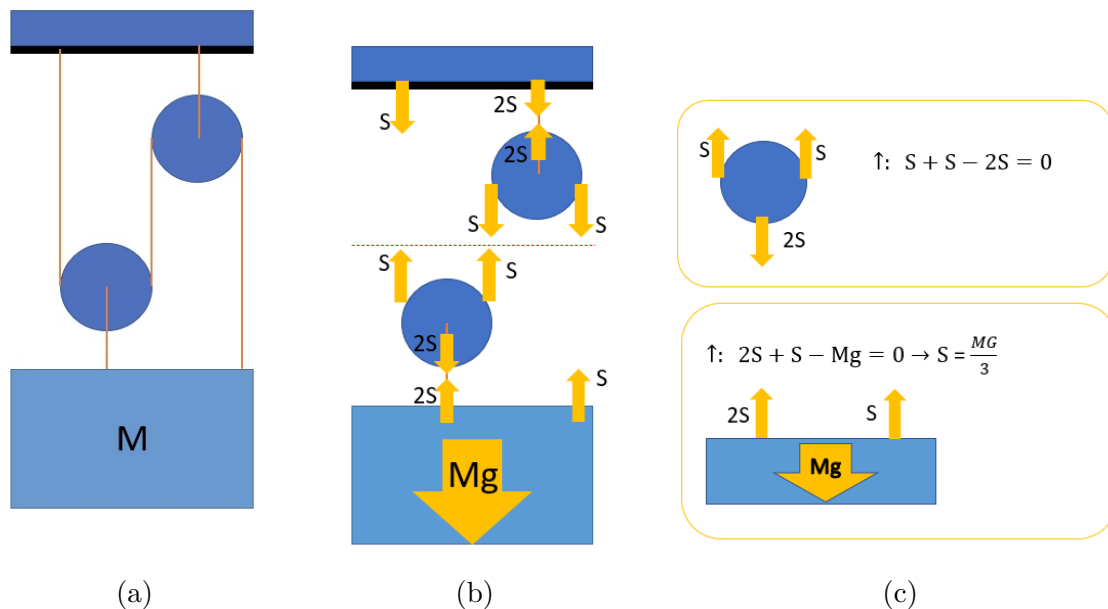
Intervjun med Mikael Enelund, se bilaga D, grundlade idén till experimentet med krympförband. Mikael önskade ett experiment att demonstrera i en föreläsningssal och samtidigt ha en digital tvilling, som med hjälp av FEM visar vad som sker med materialen vid uppvärmning.

För att uppfylla Mikael Enelunds önskemål tillverkades ett fysiskt experiment i prototypplabbet och en digital tvilling i ANSYS Workbench modellerades [ANSYS, 2021].

3.2.4 Trissor och linkrafter

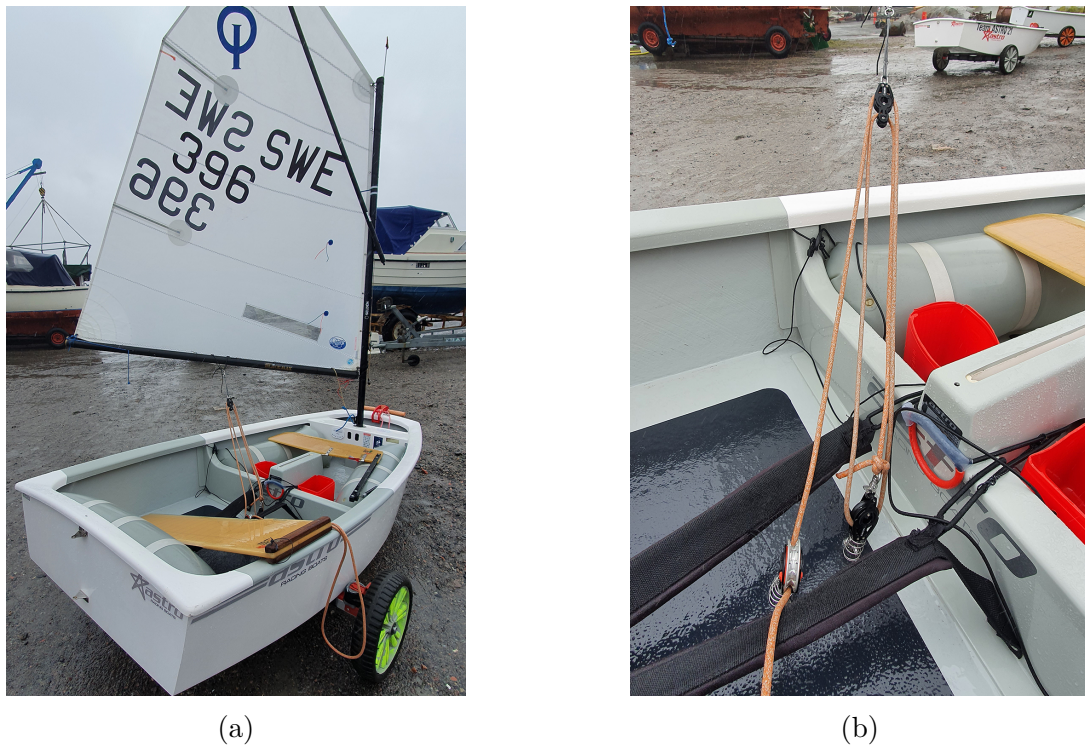
Trissor används t.ex. för att tillsammans med linor både dra in segel på båtar och att lyfta husmoduler på en arbetsplats. Det som gör tekniken användbar är att den behövda kraften kan minskas när något ska lyftas. Däremot kommer det krävas att linan dras en längre sträcka, vilket kräver en längre lina.

I figur 3.2a visas ett exempel på ett system med linor och trissor. I friläggningen i figur 3.2b syns att samma lina måste ha samma linkraft S . I figur 3.2c syns det att linan som håller fast blocken enligt Newtons tredje lag [Grahm and Jansson, 2013] måste ha en linkraft på $2S$. Vilket gäller då Newtons tredje lag säger att alla krafter måste ha en lika stor motkraft. Avslutningsvis genom att frilägga vikten M så går det att bestämma linkraften S . Då S är etablerat i figur 3.2c så kan systemets alla individuella linkrafter för systemet bestämmas då allt beror på S .



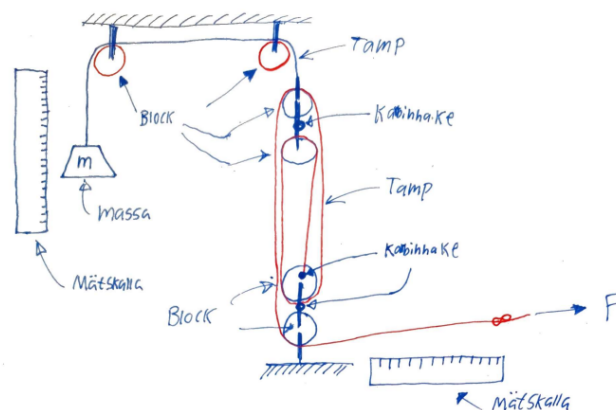
Figur 3.2: Friläggning av trissor och linor

Syftet med detta experiment är att skapa en fysisk modell av ett block- och taljasytem som skall kunna användas i laborativt syfte i kurser inom grundläggande mekanik. Inspirationen kom från ett redan befintligt system med trissor. Systemet i fråga är skotanordningen som används för att dra in seglet i en optimistjolle. Exempelbild på en optimistjolle återfinns i figur 3.3a. Denna lösning är användbar då man lätt kan byta mellan flera olika utväxlingar genom att haka av och på en till tre karbinhakar. Den redan befintliga lösningen kan man se i figur 3.3b. Själva experimentet utvecklades enligt samma princip för att kunna visa på fyra olika lastfall beroende på hur man växlar systemet.



Figur 3.3: Optimistjolle

Vid framställningen köptes alla delar in för att sedan monteras på plats, så inga delar behövde tillverkas till detta experiment. En enkel skiss på systemet kan man se i figur 3.4.



Figur 3.4: Första skiss på experiment med trissor.

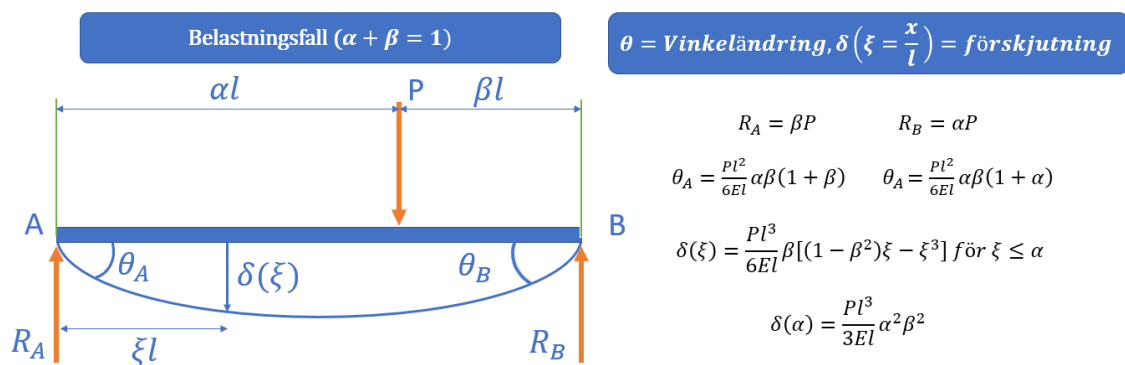
3.3 Tillämpning av befintligt material

Flera experiment i studion har en tydlig koppling till lärandemål, men har inte implementerats i passande kurser. Därför har ett flertal experiment sammanställts i en

stationslaboration i hållfasthetslära. Utöver detta har det möjliggjorts för studenter att digitalt genomföra laborationer.

3.3.1 Kontinuerligt upplagd balk

Inom hållfasthetslära studeras ofta hur olika balkar beter sig när de belastas på olika sätt. För att kunna beskriva de vanligaste utböjningarna används olika elementarfall. Dessa elementarfall är lösningar till balkens differentialekvation för vanligt förekommande laster och randvillkor. Ett vanligt elementarfall visas i figur 3.5. En punktlast P placeras någonstans på balken och då kan rotationsvinklarna, θ_A och θ_B , samt reaktionskrafterna, R_A och R_B vid stöden, bestämmas med hjälp av givna formler. Slutligen kan även utböjningen, $\delta(\xi)$, bestämmas.



Figur 3.5: Elementarfall

Experimentet “kontinuerligt upplagd balk” vidareutvecklades i syfte att öka experimentets användningsområde. I det ursprungliga utförandet fanns inte alla stödtyper. För att kunna täcka fler elementarfall för balkar utvecklades ett nytt stöd och ett befintligt modifierades.

3.3.2 Laboration i hållfasthetslära

Flera av gruppmedlemmarna hade under sin utbildning på Chalmers upplevt en avsaknad av laborationer inom hållfasthetslära. Därför granskades inventeringen, med avsikt att göra ett urval av passande experiment att kombinera till en stationslaboration inom hållfasthetslära. Eftersom det finns en befintlig stationslaboration som berör statik och hållfasthetslära ansågs de moment som ingår i den inte lämpliga att ta upp igen i ytterligare en stationslaboration. Även experiment som främst är utformade som demonstrationsmaterial snarare än laborationsmaterial bedömdes som irrelevanta. Dessa kriterier sammanställdes för samtliga experiment som berörde hållfasthet i en urvalsmatris som återfinns i bilaga B.

Under intervjuerna i kapitel 3.1.1 stämde efterfrågan på vardera experiment av med de intervjuade lärarna för att säkertställa ett generellt värde i att utföra laborationen för studenter som läser hållfasthetslära.

När urvalet av experiment gjorts utformades tillhörande laborationsinstruktioner. Experimenten, dess befintliga laborationsinstruktioner, manualer och lösningsförslag har från början inte utformats för att utföras tillsammans med andra experiment. För att skapa en helhet i den utformade stationslaborationen utformades därför en gemensam mall för de nya laborationsinstruktionerna.

3.3.3 Digitalisering av befintliga laborationer

För att bidra med en utökad hybridundervisning anpassades de experiment som ingår i den befintliga laborationen ”Stationslaboration med dragprov” för digital undervisning. Samtliga experiment digitaliserades genom samma process. Denna process bestod av att skapa filmmaterial som en bas med kompletterande frågor för att öka interaktionen för studenterna under laborationen.

En storyboard skrevs för varje experiments utförande, som sedan följdes vid filmning. Det fysiska genomförandet av experimenten filmades för att den som tar del av det digitala materialet ska få samma upplevelse som om den deltagit fysiskt. Materialet redigerades sedan i programvaran Adobe Premiere [Adobe, 2019] på ett sätt som tydligt visar experimentets utförande, men samtidigt engagerar tittaren. Materialet laddades upp på läroplattformen Canvas tillsammans med frågeställningar tillhörande varje film. Frågeställningarna har skapats för varje specifikt experiment för att stimulera den tankeprocess som sker vid en fysisk laboration. Frågor och videor har utvecklats parallellt för att i hög grad engagera studenten. Vidare har frågeställningarna gjorts tillgängliga för att kunna användas i samband med att videorna laddas upp på Canvas.

4

Resultat

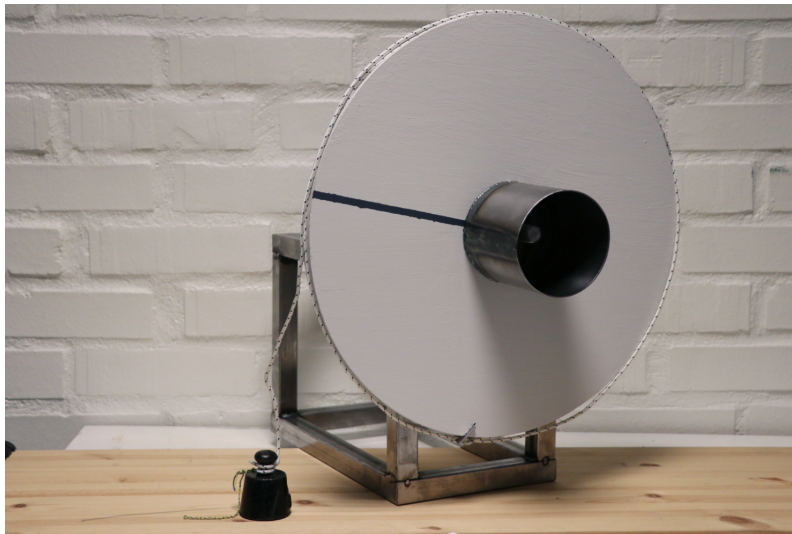
I detta kapitel presenteras de experiment som har tillverkats samt tillämpning av befintligt material från studion. Experimentens funktion och design beskrivs utförligt, samt hur de förslagsvis kan användas i undervisning.

4.1 Nya experiment

Fyra för studion unika experiment har skapats under projektets gång. Experimentet ”Visualisering av masströghetsmoment” är tänkt att kunna användas i både demonstrativt och laborativt syfte, alltså både av lärare och studenter. Experimenten ”Kugghjulsmodell” och ”Krympförband” har tillverkats i demonstrativt syfte, exempelvis i föreläsningssal. Experimentet ”Trissor och linkrafter” har tillverkats i syfte att användas i en laborativ miljö av studenter.

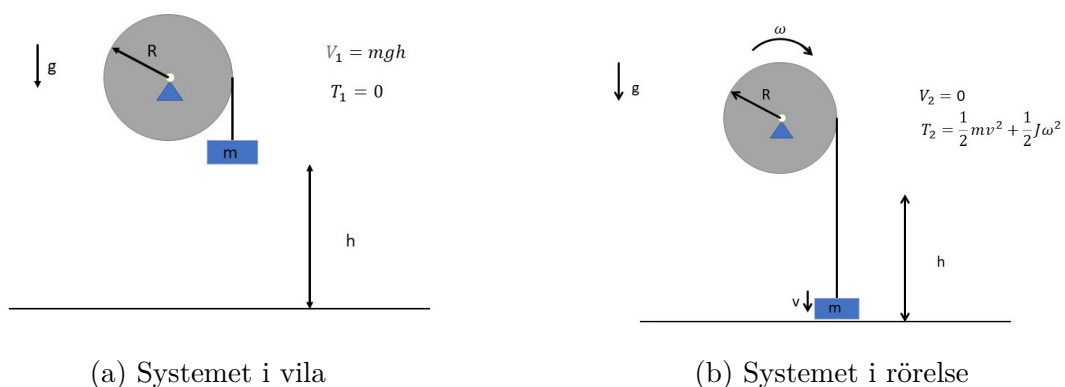
4.1.1 Visualisering av masströghetsmoment

Det slutgiltiga experimentet går att se i figur 4.1. Konstruktionen består av en stålram varpå två lagerbock är fästa. Genom lagren går en axel som är gängad i ena änden. På axeln är en träplatta monterad och kring denna lindas ett snöre som är fäst i en vikt. På den gängade delen av axeln monteras en testkropp. När sedan vikten släpps startar systemet från vila och börjar rotera. Kullagren gör att plattan roterar med mindre friktion. Beroende på vilket masströghetsmoment testkroppen har kommer systemet att rotera med olika vinkelhastigheter.



Figur 4.1: Visualisering av masströghetsmoment med testkropp monterad

Genom att använda energilagen, se formel 3.5, och betrakta systemet vid två olika lägen kan det fastställas att hjulet bör rotera med olika vinkelhastigheter ω då kroppar med olika masströghetsmoment J fästs till plattan. Först betraktas systemet i vila se figur 4.2a där den potentiella energin V_1 är maximala potentiella energin mgh och den kinetiska energin T_1 är 0. Sedan betraktas systemet i rörelse se figur 4.2b där den potentiella energin V_2 är minimal och istället den kinetiska energin T_2 är fullt utvecklad och består av både viktens, testkroppens och plattans rörelseenergi. I detta teoretiska fall försummas friktionen från lagren och därför finns ingen icke-konservativ kraft som påverkar systemet.



Figur 4.2: Energikonservering från tillfälle ett och två

Beräkningen av hur vinkelhastigheten beror av masströghetsmomentet $\omega(J)$ visas stegvis i ekvation 4.2-4.5.

$$T_1 + V_1 = T_2 + V_2 \implies \quad (4.1)$$

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}J\omega^2 \quad (4.2)$$

Massans hastighet v är samma över hela linan då den är spänd. Därför är massans hastighet samma som linans på randen av cirkelplattan och ges således av $v = \omega R$.

$$mgh = \frac{1}{2}m\omega^2 R^2 + \frac{1}{2}J\omega^2 \implies \quad (4.3)$$

$$mgh = \frac{1}{2}\omega^2(mR^2 + J) \implies \quad (4.4)$$

$$\omega(J) = \sqrt{\frac{2mgh}{mR^2 + J}} \quad (4.5)$$

I ekvation 4.5 går det att se $\omega(J)$ med J i nämnaren i högerledet vilket gör att ett högre J ger en lägre vinkelhastighet ω .

De kroppar som tillverkades var en solid stålcylder med massan 2 kg och ett tunt cylindriskt skal av stål med massan 0.5 kg. Den solida stålcyldern hade diameter 98 mm och tunna skalet 100 mm. Masströghetsmomentet för de båda kropparna beräknas i ekvation 4.6 och 4.7.

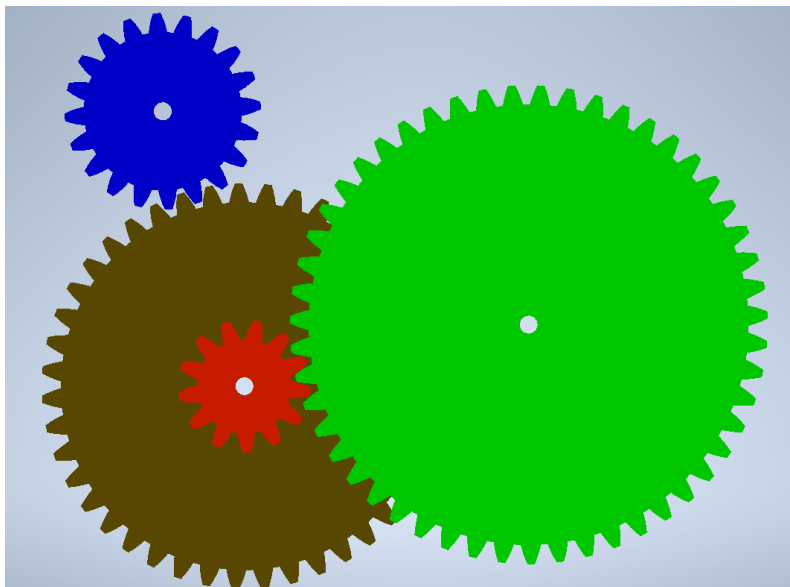
$$J_{solid} = \frac{1}{2}mr^2 = 2.401 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2 \quad (4.6)$$

$$J_{skal} = mr^2 = 1.25 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2 \quad (4.7)$$

Experimentet är tänkt att kunna användas på föreläsningar där föreläsaren kan fästa olika kroppar och visa att plattan snurrar olika fort. Experimentet går även att användas av studenter i exempelvis en stationslaboration ska kunna fästa olika kroppar till axeln och räkna ut den fästa kroppens masströghetsmoment. För att göra det behöver de mäta cirkelskivans vinkelhastighet vilket kan göras genom att filma med mobilkamera när systemet sätts i rotation. När experimentet används behövs även träplattans masströghetsmoment tas med i beräkningen. En ungefärlig hastighet kan då räknas ut genom att se tiden för hur lång tid det tagit för skivan att snurra ett varv.

4.1.2 Kugghjulsmodell

Tavlans storlek behövde anpassas för att kunna demonstreras på t.ex. föreläsning och valdes därför till att ha dimensionerna 350×300 mm. Tänderna på kuggarna valdes till att ha ett djup på ca 9 mm.



Figur 4.3: Slutgiltig Kugghjulsmodell i digitalt format

Kugghjulsmodellen konstruerades med fyra olika kugghjul med olika storlekar, se tabell 4.1 för specifika dimensioner. Hålen i kugghjulen borrades med en diameter på 8 mm, vilket begränsade den minsta storleken för kugghjulen. På den färdiga modellen sattes modulstorleken till 4 mm, vilket gav upphov till de övriga dimensionerna. Tandbredden avser bredden på tandens yttre del, toppdiametern avser hjulets diameter mätt från tandens yttre del och tanddjupet avser tandens höjd.

Tabell 4.1: Specifikationer för kugghjulsmodell

Kuggnummer (färg)	Antal tänder	Tandbredd	Toppdiameter	Tanddjup
1 (Grön)	51	3.240 mm	210.5 mm	8.9576 mm
2 (Brun)	43	3.258 mm	178.5 mm	8.954 mm
3 (Blå)	20	3.392 mm	86.3 mm	8.935 mm
4 (Röd)	13	3.526 mm	58.5 mm	9.912 mm

Systemets avstånd mellan de olika kugghjulen har anpassats för att låsningar förhindras, där de olika avstånden beskrivs enligt tabell 4.2.

Tabell 4.2: Avstånd mellan kugghjulen

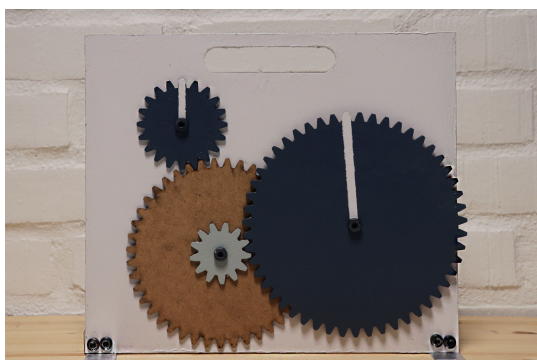
Tandtal av Hjulparen	Avstånd mellan centrum
51 och 13	128 mm
43 och 20	126 mm

Kugghjulsmodellen kan även visa hur kugghjulspår med gemensamma axlar orsakar mycket större utväxlingar än om kugghjulen endast var kedjekopplade till varandra.

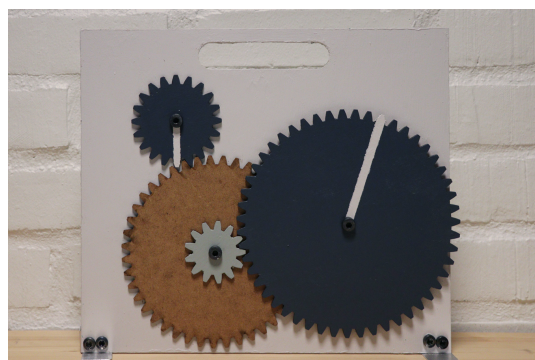
Med hjälp av ekvation 3.8 beräknades den slutgiltiga utväxlingen i ekvation 4.8 nedan.

$$\frac{51}{13} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{43}{20} = 8.43 \quad (4.8)$$

Kugghjulsmodellen är anpassad för att kunna användas under exempelvis en föreläsning för att underlätta förståelsen för utväxling. Av denna anledning har det målats linjer för att tydliggöra rotationen på det största respektive det minsta hjulet. I figur 4.4a visas kugghjulsmodellen i ett ursprungligt läge. I figur 4.4b har det största hjulet endast roterats ca 20°, och det syns tydligt att det minsta hjulet roterat ca 180°.



(a) Kugghjulsmodellen i ursprungligt läge



(b) Kugghjulsmodellen efter ca 20° rotation på det största hjulet

Figur 4.4: Kugghjulsmodellen

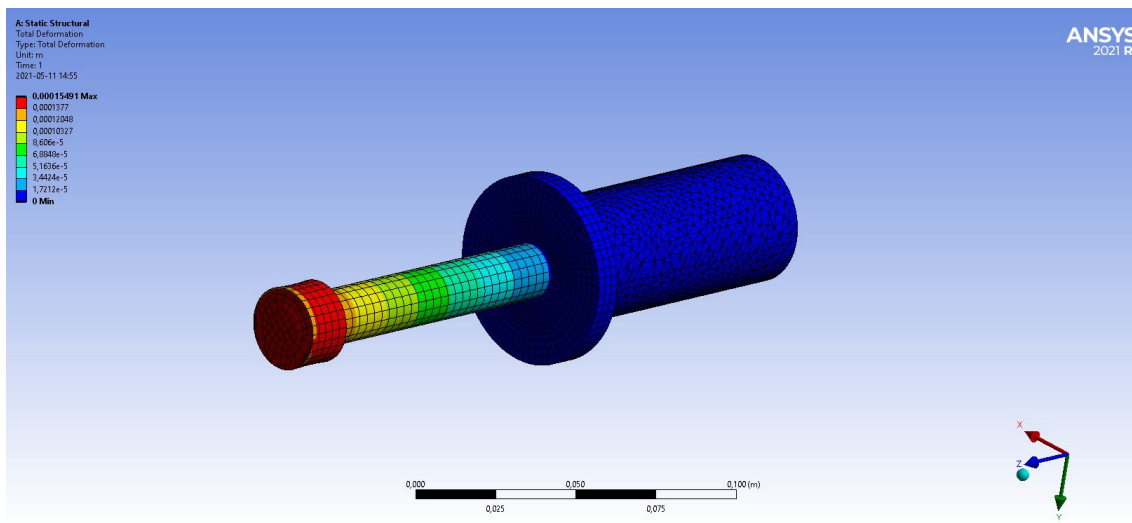
4.1.3 Krympförband

Experimentet för att visa termisk töjning går ut på att värma en axel till en temperatur som gör att den fastnar i en ring som har en större innerdiameter än axelns ytterdiameter vid rumstemperatur. Axeln är gjord av aluminium då aluminium har en högre utvidgningskoefficient än stål, vilket gör att det krävs mindre tillförd värme för att axeln ska expandera. Axeln är fäst i ett trähandtag för att användaren inte ska behöva hålla direkt i axeln som värms, se figur 4.5. Axeln värms med värmepistol för att nå temperaturen som gör att axeln fastnar i ringen.



Figur 4.5: Krympförband

Som komplement till det fysiska experimentet skapades en digital tvilling. Tvillingen skapades i ANSYS Workbench som med FEM simulerar axelns utvidgning och trycket som uppstår i kontakten mellan axeln och ringen, se figur 4.6.



Figur 4.6: Den digitala finita elementmodellen som visar axelns expansion

Aluminiumaxeln har ytterdiameter 16 mm och ringens innerdiameter är 16.02 mm. Aluminium har värmeutvidgningskoefficienten $\alpha = 23 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Den temperaturökning, ΔT som krävs för värma fast ringen på axeln beräknas enligt ekvation 4.9 och 4.10.

$$\epsilon = \alpha \Delta T \implies \quad (4.9)$$

$$\Delta T = \frac{0.02 \cdot 10^{-3}}{16 \cdot 10^{-3} \cdot 23 \cdot 10^{-6}} = 54.35^\circ\text{C} \quad (4.10)$$

Experimentet är tänkt att användas vid föreläsningar. Axeln värms så att studenterna ser vad som händer i verkligheten samtidigt som den digitala tvillingen används som komplement för att med hjälp av FEM numeriskt redovisa den termiska töjningen och kontaktrycket.

4.1.4 Trissor och linkrafter

Den slutgiltiga anordningen är ett system av linor och trissor där en massa på tio kilo skall lyftas. Systemet i fråga tillåter även att utväxlingen mellan de olika trissorerna går att justera mellan ett till fyra. Justeringen görs genom att släppa på en av tre befintliga kabinhakar för varje steg. Själva utväxlingen är i princip identisk med det block- och taljasystem som finns i en optimistjolle. Experimentet är utformat på så sätt att man både kan räkna på utväxlingen men även bara känna kraftskillnaden vid de olika utväxlingarna genom att dra i linan. Bild på det fullständiga experimentet finns i figur 4.7.



Figur 4.7: System av trissor och linor monterat i studion

Experimentet är tänkt att användas som laboration där studenter får testa de olika möjligheterna systemet medför.

4.2 Tillämpning av befintligt material

I detta avsnitt presenteras hur det befintliga materialet i studion använts och vidareutvecklats. Experimentet kontinuerligt upplagd balk har vidareutvecklats, en laboration för hållfasthetslära har sammanställts och digitalt material har skapats för laborationen inom statik och hållfasthetslära.

4.2.1 Kontinuerligt upplagd balk

Experimentet modifierades genom att ett nytt stöd utvecklades och ett existerande stöd uppdaterades. Det nya stödet är glidinspönt och det modifierade stödet tar krafter i båda riktningar men tillåter rotation. Genom att borra ett hål genom skivan som fixerar själva experimentet så fås åtkomst till skruven som fäster stödet. Med hjälp av en insexnyckel är det då möjligt att låsa stödet genom att dra åt skruven, se figur 4.8b, och göra stödet till fast inspönt.

Det glidinspända stödet utvecklades från grunden då det ej fanns något tidigare att utgå från. För att vara enhetligt med de tidigare så tillverkades även detta stöd i fräst aluminium. Slutprodukten blev ett stöd som tillåter translation i sidled, men som även kan låsas vid behov av ett fast inspönt stöd, se figur 4.8a.



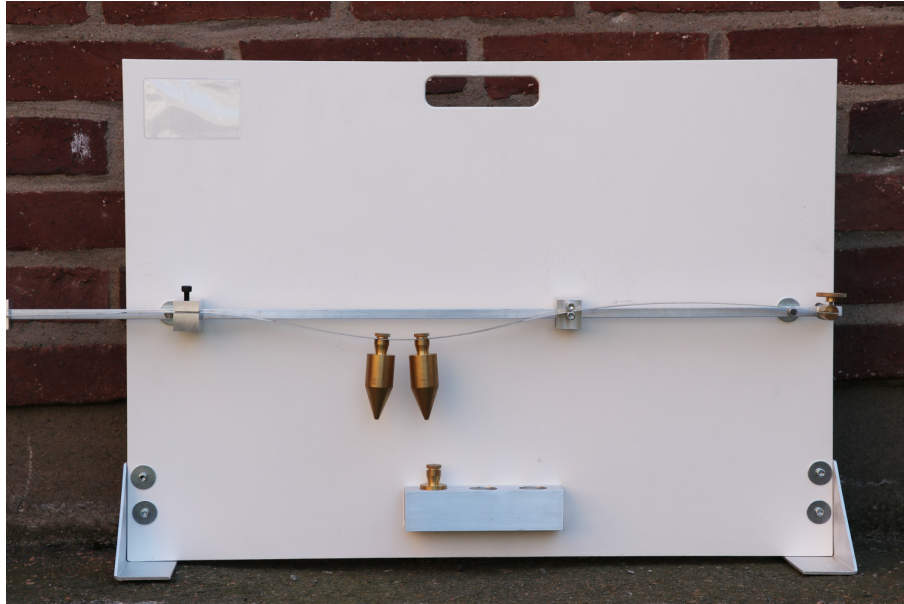
(a) Nytt stöd



(b) Modifierat stöd

Figur 4.8: Utökning av stödtyper till Kontinuerligt upplagd balk

I figur 4.9 syns utböjningen på balken med det nya stödet, använt som glidinspänning, till vänster och ett befintligt momentfritt upplagt stöd i mitten. Till höger syns det modifierade stödet i sitt ursprungliga tillstånd, där det alltså är momentfritt.



Figur 4.9: Utböjning vid användning av det nya stödet

4.2.2 Laboration i hållfasthetslära

De befintliga experiment som valdes ut att ingå i den nya stationslaborationen inom hållfasthetslära är följande:

- Kontinuerligt upplagd balk [Komarovski, 2014]
- Spänningsoptik [Eliasson et al., 2013]
- Balkrigg [Alexandersson et al., 2016]
- Nedböjning av balk [Eliasson et al., 2013]

Som tidigare nämnt vidareutvecklades experimentet ”Kontinuerligt upplagd balk”. De andra experimenten inkluderades i laborationen i sin ursprungliga form.

Till varje experiment utformades en ny laborationsinstruktion, dessa återfinns i bilaga E. I bilagan är de samlade som dellaborationer i stationslaborationen, men instruktionerna är utformade för att laborationer med varje experiment även ska kunna utföras separat.

Nya frågeställningar utformades för ”Kontinuerligt upplagd balk” och därför utformades även en tillhörande laborationsinstruktion från grunden. Innehållet i de befintliga laborationsinstruktionerna gällande de övriga experimenten behövde förändras väldigt lite. De befintliga instruktionerna återfinns i den rapport tillhörande

de det kandidatarbete vid respektive experiment utformats. Eftersom ändringarna främst berörde omstruktur av instruktionerna bör de nya instruktionerna snarare betraktas som omformuleringar än helt nytt material.

4.2.3 Digitalisering av laboration inom statik och hållfasthetslära

Digitaliseringen resulterade i en serie filmer med tillhörande frågor. De experiment som valdes att digitaliseras är följande:

- Emmas stege (friktion) [Alexandersson et al., 2016]
- Flytta moment [Eliasson et al., 2013]
- Dragprov

Dessa experiment är material som redan fanns i studion och som ingår i en stationslaboration inom områdena statik och hållfasthetslära. De har filmats för att på ett så tydligt sätt som möjligt kunna förmedla samma lärandeupplevelse som när experimenten utförs fysiskt av studenten. Eftersom experimenten ingår i en redan sammansatt laboration har frågorna ställts för att överensstämma med originallaborationen. De har även formulerats på ett sådant sätt att studenten aktivt behöver observera händelser i filmerna för att sedan kunna besvara frågorna. Detta för att efterlikna hur studenten deltar på den fysiska laborationen.

Studion har en egen sida på Canvas. De olika filmerna har delats in i moduler, där både filmer och tillhörande frågor ingår. Frågorna återfinns i bilaga F. Modulerna kan sedan användas i andra kurser genom att kopiera över dem från studios Canvassida till Canvassidan för respektive kurs.

5

Diskussion

En diskussion har förts för att reflektera kring olika aspekter som har påverkat projektet. Där ingår bland annat en reflektion av processen och arbetssättet, anledningar till revideringar av ursprunglig plan, samt oförutsägbara händelser som dykt upp under arbetets gång. Vidare diskuteras även möjliga steg för vidareutveckling och förbättringar.

5.1 Planering och avgränsningar

För att strukturera arbetet och ge gruppen ett mer översiktligt mål skapades en tidig plan över de experiment som skulle tas fram. En översiktlig tidsplan i form av ett gantt-schema gjordes, och senare en mer detaljerad planering över när varje experiment beräknades vara färdigställt. Eftersom det i planeringsstadiet upplevdes väldigt svårt att bestämma tidsramen för varje experiment har den ursprungliga planeringen reviderats under arbetets gång. En orsak till svårigheten att bedöma tidsramen är att arbetet till stor del har utförts på distans, till följd av COVID-19. På grund av COVID-19 har även tillgången till verkstaden varit begränsad vilket har bromsat arbetsprocessen för en del experiment.

En av de större revideringarna var att utformandet av ett experiment för att visualisera ett fjäder-massa-system prioriterades bort. Trots revideringarna har tidsplaneringen fungerat som en bra utgångspunkt för färdigställandet av de olika experimenten.

5.2 Pedagogiskt ramverk

Inför arbete gjordes en kortare litteraturstudie i pedagogik. Eftersom pedagogik är ett väldigt brett begrepp valdes att inrikta sig på två huvudsakliga områden. Dessa områden behandlar praktiskt lärande och digital undervisning eftersom de ansågs vara mest relevanta för projektet. Pedagogikstudien användes som bakgrund till utformningen av experimenten och digitaliseringen. De källor för delen som behandlar digitalt lärande är främst baserade på olika studier som gjorts för att undersöka effekten av att integrera digitalt material i undervisningen. För att bekräfta att även detta digitaliseringsprojekt fått önskade resultat hade en egen studie kunnat

genomföras där studenter fått prova det digitala material som tagits fram. Detta har på grund av tidsbegränsning inte hunnit göras, men hade varit intressant att se om det digitala materialet får önskad effekt på lärandet.

Majoriteten av källorna till delen om praktiskt lärande var teoretiska studier som bygger på praktiskt utförda studier om praktiskt lärande. För att ytterligare underbygga den pedagogiska studien hade det varit fördelaktigt att undersöka fler källor. Även här hade en egen undersökning kunnat utföras för att bekräfta det som undersökts i pedagogikstudien. En sådan undersökning hade kunnat riktas till den avsedda målgruppen, d.v.s. ingenjörstudenter på högskolor i Sverige. Undersökningen hade då kunnat resultera i en sammanställning över vilka undervisningsmetoder som passar bäst för den specifika målgruppen.

5.3 Förarbete

Som förarbete till projektet gjordes tre intervjuer som underlag till konceptvalen. Nedan följer en diskussion kring genomförandet av intervjuerna och hur de hade kunnat förbättras, samt för urvalsprocessen av de genererade koncepten.

5.3.1 Intervjuer

Intervjuer genomfördes i arbetets början som en första del av den iterativa processen. När de genomfördes var de flesta av experimenten fortfarande i planeringsstadiet, så intervjuerna gav en god grund för var projektets fokus bör ligga. De tre intervjuade är alla lärare inom kurser i hållfasthetslära eller mekanik och anses därför vara lämpliga källor. De är även väl insatta i de kurser där experimenten är tänkta att användas.

För att ge en bredare bild av vad studenter har svårt för hade studenter på olika program kunnat intervjuats. I övrigt anses lärarintervjuerna ha varit mycket givande för arbetet. Eftersom Jim Brouzoulis arbetat en del med digitalt material kunde han vara till stor hjälp i utformningen av det digitala materialet.

5.3.2 Val av koncept

Själva konceptgenereringen baserades främst på diskussioner inom gruppen samt med examinator och handledare. Detta var ett bra tillvägagångssätt ur den aspekten att ett intresse skapades för de koncept som diskuterades i ett tidigt stadiet. Ett eventuellt problem med detta tillvägagångssätt var att fem av sex gruppmedlemmar läser inriktningen maskinteknik. Följden blev att konceptgenereringen till stor del baserades på moment som ingår på just maskinprogrammet. Det kan ha medfört att svåra moment som inte ingår på maskinprogrammet men däremot på andra program inte behandlades.

Metoden som användes för att välja vilka idéer på koncept som skulle vidareutvecklas har stor utvecklingspotential. Den prioriteringsmatris som utformades i samband

med detta skulle enligt en rad krav, som antingen uppfylldes eller ej, bestämma vilka koncept som skulle utgöra hela arbetets gång samt ordningen på hur dessa olika koncept skulle prioriteras. Det ingick fem krav i matrisen, som alla bedömdes utifrån gruppens gemensamma värderingar samt utifrån lärarintervjuerna.

För att göra denna urvalsprocess mer robust skulle kraven kunna utvecklas. Flera av de kraven som användes skulle kunna definieras ytterligare för att göra bedömningen mindre subjektiv.

Ett av kraven som hade kunnat utvecklas betydligt var ”relevans för kurser”. Detta hade istället kunnat utvärderas med en sammanställning av kursmålen i alla kurser på grundnivå på Chalmers inom de berörda ämnena. På så sätt hade man tydligt kunnat jämföra vilka moment som är återkommande i fler kurser och därmed är relevant för fler studenter.

Kriteriefrågan ”Berör det ett komplext område?” utvärderades även det baserat på gruppens erfarenheter. För att göra den utvärderingen mindre subjektiv hade t.ex. kursenkäter istället kunnat sammanställas och analyseras, vilket även hade gett ett mer generellt resultat.

Prioriteringsordningen följdes inte helt. Att uppskatta tiden för varje projekt var svårt, vilket medförde att alla ville komma igång tidigt med utvecklingen av de experiment de hade ansvar för. Detta ledde till att en stor del av allt arbete pågick parallellt, vilket medförde både för- och nackdelar.

5.4 Nya experiment

För varje experiment har en diskussion förts över inspirationskällor, konstruktionsprocessen och möjligheter till vidareutveckling. En möjlig vidareutveckling för analysen av experimenten kan vara att låta studenter testa dem, för att säkerställa att de fungerar bra i utbildningssyfte. Experimenten har testats så långt det går genom logiskt resonemang och analys av gruppen.

5.4.1 Visualisering av masströghetsmoment

Konstruktionen som byggts roterar med olika vinkelhastighet när olika testkroppar fästs till den gängade axeln. De testkroppar med lägre masströghetsmoment ger som väntat en högre vinkelhastighet än de med högre.

Till skillnad från det teoretiska fallet som tagits upp gällande att plattan roterar friktionsfritt så bromsas rotationen av de lager som används. Eftersom det är samma lager som används går det bra att använda på föreläsningar, men det är något som behöver beaktas vid en stationslaboration. När studenterna själva ska bestämma masströghetsmoment på testkroppar behövs motståndet från lagren tas med i beräkningen som en icke-konservativ kraft. Att byta lager, eller slita in dem, är därför en möjlig förbättring på detta experiment.

Ytterligare förbättringspotential är att skapa fler testkroppar av olika massor och geometrier som kan rotera kring olika axlar. De skapade testkropparna roterar enbart genom origo, men tillverkas lite större kroppar är det enkelt att borra hål vid testkroppens kant för att visa olika tröghet kring olika axlar och exempelvis påvisa Steiners sats.

5.4.2 Kugghjulsmodell

Tanken bakom kugghjulsmodellen var att visa hur utväxlingar framgår i ett relativt enkelt system. Det ger en grundläggande förståelse för system som använder kuggar för möjliggöra utväxlingar.

Under inledningen av produktionen så konstruerades en avlång platta för att bekräfta att de teoretiska avstånden mellan kugghjulens centrum var korrekta. Detta användes då kugghjulsfunktionen på CAD-programmet inte hade möjlighet att beräkna avstånden för de mindre kugghjulsparen i systemet. Ett kollisionstest existerar i programmet, men testet är inte tillräckligt tydligt om var kollisionerna inträffar.

Det var idealt att få en jämn övergång på kugghjulen, för att minska risken för att kugghjulen skulle låsa sig. Det var då uppmätt att använda ett tanddjup som höll sig till samma skala. Tandbredden skulle också vara lika varandra.

Det var inte endast hålstorleken som begränsade den minimala storlekkonfigurationen för kugghjulen, utan kugghjul med ett litet antal tänder skulle göra kopplingarna ineffektiva.

Ett problem när de första kugghjulsmodellerna skrevs ut, var att centrumavstånden inte passade för kuggarna. Det berodde på att tänderna antingen låste sig eller var orörliga mellan dem mindre kugghjulen. Kugghjulen designades om med en mindre topphöjd på tänderna och detta löste problemet.

Det var planerat att kugghjulen skulle rotera runt ett rullningslager, för att underlätta drivning av modellen. Dock var kugghjulen för små för att detta skulle hålla, vilket resulterade i en konstruktion utan rullningslager.

Den slutgiltiga konstruktionen för kugghjulsmodellen valdes för att modellen enligt bilaga C.1 var för stor för att smidigt transporteras. Samma princip kunde visas mer tydligt med färre kugghjul, och dessutom hade två av kugghjulen samma axel.

5.4.3 Krympförband

Den axel som värms expanderar tillräckligt mycket för att ringen inte ska gå att sätta på axeln när ringen är kall. Däremot så fastnar inte ringen på axeln när axeln värms och ringen är placerad på den. Detta beror sannolikt på att ringen också värms och därmed också expanderar. Alltså fungerar experimentet, men inte som först planerat.

Därför blir den digitala tvillingen i detta fall inte så representativ. I ANSYS Work-

bench är det modellerat att enbart axeln värms, även när ringen sitter på axeln. Det är alltså inte medräknat att ringen också expanderar. För att den digitala tvillingen ska kunna vara representativ kan den producerade axeln behöva vara längre så ringen kan flyttas längre in under uppvärmningen.

Att den verkliga axeln blev så kort beror på att produktionen var svårare än förväntat. För att vara säker och möjlig att användas under en föreläsning kan inte stängen behöva hettas upp hundratals grader. Därför krävdes väldigt fina toleranser vid tillverkningen. Det krävdes flera försök att tillverka axeln och ringen innan de hade tillräckligt fina toleranser för att ringen inte skulle gå att trä på axeln efter att axeln värmts upp. Tillverkningen gjordes i en metallsvav och när en längre axel svarvas uppstår vibrationer längs axeln vilket gör att ytfinheten blir sämre. Skillnaden mellan axelns ytterdiameter och hålets innerdiameter var 0.02 mm vilket ställde höga krav på ytfinheten.

Ringens är gjord i stål och därför bör ring och axel inte förvaras i direkt kontakt med varandra då korrosion kan uppkomma.

5.4.4 Trissor och linkrafter

Grundidén med detta experimentet var att kunna ersätta ett redan befintligt experiment som används inom en stationslaboration i flera kurser inom området statik och hållfasthetslära. Målet var att man skulle lösa de problem som man bedömde att de tidigare experimentet hade. Originalen var ett mindre trissor och linsystem som monterades på en whiteboard-tavla.

Till följd av att optimistjollen var en sådan stor inspirationskälla i detta experiment så blev det naturligt att använda sig av block och tamp från segelbåtar för att skapa experimentet. Vilket gjorde att experimentet naturligt skalades upp i storlek jämfört med det tidigare experimentet. Då experimentet blev större så kunde gruppen även använda tyngre vikter i systemet. Detta gjorde att man kan känna en skillnad mycket tydligare vid de olika utväxlingarna. Genom detta så uppfyllde experimentet alla målen som gruppen hade avsett för det nya experimentet.

5.5 Tillämpning av befintliga experiment

För tillämpningen av de nya experimenten förs en reflektion kring möjligheter för ytterligare vidareutveckling. Vidare diskuteras hur väl de utförda modifieringarna och tillämpningarna uppfyller sitt syfte samt varför revideringar skett under arbetets gång.

5.5.1 Kontinuerligt upplagd balk

Det nyproducerade stödet är ett glidinspant stöd och ger förväntad utböjning när last appliceras. Det går även att låsa stödet så det tar axiell belastning och således bli ytterligare ett fast inspant stöd. Hålet som borrades förenklade processen att

göra det sedan tidigare tillverkade stödet till fast inspänt. Alltså finns det nu fler sätt att applicera stöd och titta på utböjning.

Trots det nyproducerade stödet så är fortfarande inte alla hållfasthetslärans stöd representerade i experimentet Kontinuerligt upplagd balk. För att ytterligare utveckla experimentet kan fler stödtyper tillverkas, framförallt fjädrande stöd.

5.5.2 Laboration i hållfasthetslära

De ingående experimenten i laborationen i hållfasthetslära består uteslutande av befintliga experiment. Ett ytterligare område som vore relevant att inkludera är passning och krympning. Ett av de nya experimenten som utvecklades, krympförband, kapitel 4.1.3, berör detta område och anses därför passa bra in i laborationen. Dock är det experimentet mest passande som demonstrationsmaterial, då studenterna annars behöver utföra uppvärmningen själva. Det kan vara problematiskt ur ett säkerhetsperspektiv.

Som vidareutveckling skulle hela laborationen i hållfasthetslära även den kunna digitaliseras, likt digitaliseringen som utförts av laborationen i statik- och hållfasthetslära. På så sätt skulle krympförbandsexperimentet kunna inkluderas som endast ett digitalt inslag.

5.5.3 Digitalisering av statik- och hållfasthetslaboration

Den första tanken med digitaliseringen var att materialet skulle vara interaktivt och låta studenten delta aktivt. Detta skulle kunna realiseras med hjälp av exempelvis quiz-funktionen i Canvas. Där skulle filmerna delas in i mindre klipp, med tillhörande frågor. Quizet skulle sedan kunna vara utformat på så sätt att studenten måste svara rätt på en flervalsfråga för att komma vidare till nästa klipp. Tanken var att det digitala materialet skulle med detta upplägg efterlikna utförandet av den fysiska laborationen. Istället resulterade digitaliseringen i längre, sammanhängande filmer för respektive experiment vilket i sin tur är mindre interaktivt. Filmerna har tillhörande Canvas-quiz, men dessa kan genomföras efter att ha visat filmen. En möjlig anledning till detta är att experimenten i sig håller en ganska låg komplexitet, och då inte tillät några tankeställare som kunde förmedlas på film. På grund av tidsbrist lämnas detta som en potentiell möjlighet för vidareutveckling för kommande kandidatarbeten.

Idén med digitaliseringen uppkom i samband med att undervisningen tvingats genomgå en omställning till att genomföras på distans på grund av pandemin i COVID-19. Enligt den pedagogiska förstudien finns det dock fördelar med att ge studenterna tillgång till digitalt material. Detta gör att det digitaliserade materialet kommer kunna användas även när undervisningen återgått till att utföras på plats. En del av förstudien i pedagogik tar upp repetition som del av inlärningsprocessen. Detta är en direkt nytta av filmerna, då studenterna kan se filmerna i efterhand, efter att ha genomfört laborationen på plats. På så sätt blir det mer lättillgängligt för studenterna att repetera materialet, vilket bör bidra till en ökad inlärninng.

Litteraturförteckning

- [3DS, 2019] 3DS (2019). Catia v5. <https://www.3ds.com/products-services/catia/>.
- [Adadan, 2012] Adadan, E. (2012). Using multiple representations to promote grade 11 students' scientific understanding of the particle theory.
- [Adobe, 2019] Adobe (2019). Adobe premiere pro cc 2019. <https://www.adobe.com/>.
- [Alexandersson et al., 2016] Alexandersson, S., Bäckgren, P., Eriksson, S. E., and Hedin, E. (2016). Studio i mekanik och hållfasthetslära, organisering och uppdatering av experimentell utrustning.
- [ANSYS, 2021] ANSYS (2021). Ansys workbench 2021 r1. <https://www.ansys.com/>.
- [Autodesk, 2020] Autodesk (2020). Autodesk inventor. <https://www.autodesk.se/products/inventor/>.
- [Eliasson et al., 2013] Eliasson, S., Jösok, A., Nävert, L., and Sundbeck, L. (2013). Studio i mekanik och hållfasthetslära.
- [Evertsson and Svedensten, 2009] Evertsson, M. and Svedensten, P. (2009). *Maskinelement Övningar*. Studentlitteratur AB.
- [Grahn and Jansson, 2013] Grahn, R. and Jansson, P. (2013). *Mekanik - Statik och Dynamik*. Studentlitteratur AB.
- [Hodson, 1988] Hodson, D. (1988). Experiments in science and science teaching.
- [Komarovski, 2014] Komarovski, K. (2014). Studio för mekanik och hållfasthetslära.
- [Ljung et al., 2007] Ljung, C., Ottosson, N. S., and Ristinmaa, M. (2007). *Introduktion till hållfasthetslära, enaxliga tillstånd*. Författarna och Studentlitteratur AB.
- [Mayer, 2003] Mayer, R. (2003). The promise of multimedia learning: using the same instructional design methods across.

- [McKelvey, 1999] McKelvey, T. (1999). Laboteket ett laborationskoncept i riktning mot ett ökat studentansvar för lärandet.
- [Perkins, 2006] Perkins, K. (2006). Phet: Interactive simulations for teaching and learning physics.
- [Simonsson, 2016] Simonsson, B. (2016). Elektriska drivsystems mekanik. <https://www.iea.lth.se/eief10/lectures/F2.pdf>.
- [Son, 2016] Son, J. (2016). Comparing physical, virtual, and hybrid flipped labs for general education.
- [Tiberghien et al., 2001] Tiberghien, A., Veillard, L., Maréchal, J.-F. L., Buty, C., and Millar, R. (2001). An analysis of labwork tasks used in science teaching at upper secondary school and university levels in several european countries. science education 85, 483-508.

A

Prioriteringsmatris

Prioriteringsmatris för nya experiment						
Skapad: 030221 Modifierad: 030221						Ja' Behåll lösning Nej' Lägre prioritering ? Sök (mer) information ! Kontrollera kravspec.
	Lösning	Elimineringskriterier				BESLUT
	Relevans för kurser	Komplex område	Intresse från programmet	Unikt experiment	Kort tid för utveckling	Prioriteringslista, siffror utefter hur experimenten bör prioriteras (1-4)
Masströghet	Ja	Ja	Ja	Nej	Nej	3
Fjäder-massa-system	Ja	Ja	?	?	Nej	3
Kugghjulsmodul	Ja	Nej	?	Ja	Nej	3
Passning och krympning	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	1
Trissor och linkrafter	Ja	Nej	?	Nej	Ja	3

B

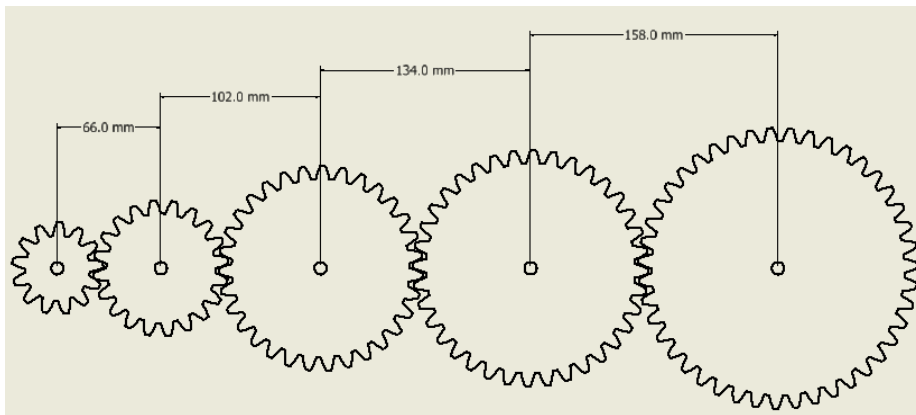
Urvalsmatris för experiment till laboration i hållfasthetslära

Experiment	Område	Relevans
Spänningsoptik	Visar spänningskoncentrationer, t.ex. kring hål	Mycket relevant
St Venantsk vridning	Visar hur plana tvärsnitt är konstant vid vridning	Ej relevant för stationslabb
Stålbalksprofiler	Visar upp olika balktvärsnitt	Ej relevant för stationslabb
Kontinuerligt upplagd balk	Visar utböjningen av en belastad balk	Mycket relevant
Balkrigg	Visar utböjning med olika randvillkor	Relevant
Nedböjning av balk	Visar nedböjningen av belastad balk	Relevant
Förflyttning av last på balk	Visar stödreaktionerna hos belastad balk	Ev. relevant (dock trasig väg)
Eulerfallen	Demonstration av Eulers fyra knäckfall	Relevant som föreläsningdemo
Tryckkärl	Demonstrationsmaterial med ett trasigt tryckkärl	Relevant som föreläsningdemo
Strawbees	Används för att bygga upp olika strukturer	Ej relevant för stationslabb
Skumgummibalkar	Demonstration av böjning och vridning av balkar	Relevant som föreläsningdemo
Fiberexperiment	Visar fiberriktningen och dess påverkan på hållfastheten	Ej relevant för stationslabb

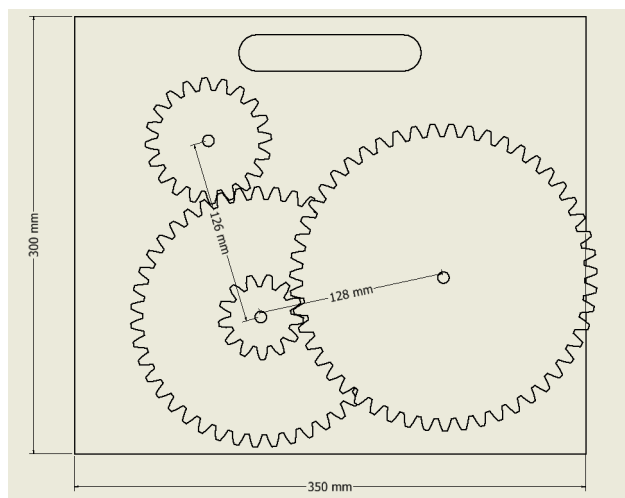
C

Ritningar på Kugghjulsmodellen

C.1 Avstånd för andra versionen av Kugghjulsmodellen



C.2 Avstånd på den färdigställda Kugghjulsmodellen



D

Intervjuer

D.1 Intervju med Mikael Enelund

Intervju med Mikael Enelund

Vi planerar att göra en laboration för hållfasthetskurser, likt den som redan finns för Statik och hållfasthetslära. Tanken är att utforma en stationslaboration med hjälp av redan befintliga experiment, men att också tillföra egna nya experiment. Finns det någon anledning till att det inte ingår en stationslabb idag?

- Det finns ingen stationslabb idag eftersom det inte finns tid, och för att det ska kunna läggas mer fokus på FEM.

Något vi upplever är svårt att förstå är tryckkärl och hade själva tyckt att ett experiment hade tillfört mycket. Vi finner det dock svårt att utforma en lämplig labb, som kan utföras av studenterna själva. T.ex. något för att visualisera tryck i mantelarea. Har du nån tanke?

- Det finns hydraulcylindrar för uppump. Man skulle kunna pumpa upp ett tryck och mäta töjning, kanske det redan finns någonting liknande?

Hade det varit relevant att ha en laboration där man studerar olika brott och får koppla det till teorin, varför de blivit som de blev typ? Lite inspirerat av en laboration vi hade i tillverkningsteknik där man skulle identifiera olika korrosionstyper.

- Det låter kul! Finns något där man skulle kunna dra i papper, uppritad på väggen? Jag tror att någon tidigare har gjort något med brott.

Är det några återkommande moment inom hållfasthet som studenter brukar ha svårt att förstå?

- Främst deformationssamband och stabilitet. Där kan ni göra en fin simulering på pressförband och göra en film. Utnyttja inte rotationssymmetri som man gör i ANSYS, utan kolla på hela förbandet, det blir mer visuellt då. Det är svårt att göra experiment på, men en simulering hade varit trevligt och gör att hela förloppet syns.

Så visuellt och digitalt alltså?

- Det är svårt för studenterna att utföra själva eftersom gasolbrännare och liknande behövs, man kan filma det och visa. Sen det här med plastisk zon, vi har just nu ingen brottmekanisk testapparat till det. Man hade kunnat ha ett fixtur till dragprovsmaskinen - kanske en speciell provstav? Se formelsamlingen för CT-provstav. Man skulle även kunna utnyttja dragsprovsmaskinen, kanske hitta ett youtubeklipp där experiment görs? Om man absolut vill ha med en laboration finns det en film där någon håller metallkuler i glas och något bucklar. Finns i en gammal canvas-aktivitet. Montering av pressförband är också intressant, kul att se efteråt hur det ser ut.

Hade det varit mer relevant med ett canvasquiz t.ex? Som gör det visuellt lättare att förstå?

- Filmer är lättast för att se hur saker fungerar. Finns en kul grej att göra, som dock är statik och hållfasthet snarare: ta tre brädor och låt de ligga på varandra. Mät nedböj. Limma sedan ihop dem och mät nedböjning igen. Se att styvheten har ökat. Sen kan man skjuva sönder limmet, hoppa på balken och sådant. Det är lite kul, kanske finns saker till att göra det? Skjuvspänning är svårt. Det kanske hade varit ett bra tillägg till stationslabben. Finns femminutershårdlim, alltså att det stelnar snabbt. Ta en plank, ca 1.5 m och höjd 1 tum. Fritt upplagd i båda ändar, prata med Mats om detta och testa lämpliga dimensioner.

D.2 Intervju med Jim Brouzoulis

Intervju med Jim Brouzoulis

Vilka kurser är eller har du varit inblandad i?

- Ganska många hållfasthetskurs för Industriell ekonomi, Teknisk design, Maskin, Samhällsbyggnad, Automation och mekatronik. Jag har inte varit inblandad i någon mekanikkurs, men både hållfasthet och FEM. Har varit examinator för två FEM-kurser, är med i hållfasthetkurs för Teknisk design just nu och har haft blandade roller mellan handledare och examinator.

Vi planerar en stationslaboration till hållfasthetskursen, finns det några specifika områden som du tycker att vi borde fokusera på?

- Tror du det hade varit värdefullt?

- Jag hade en stationslaboration för Industriell ekonomi, på hemsidan finns bilder från den första labben och det var uppskattat på den tiden. Jag har inte haft rollen som examinator på några år och det har inte blivit av på grund av corona, men tycker det är kul med laborationer!

Finns det återkommande moment du tror elever har svårt för? Finns det någon typ av experiment du känner hade behövts? Kan gälla både experiment som utförs av studenterna själva eller experiment som kan demonstreras.

- Ofta är det enkla saker som t.ex skumgummibalk som är bäst. Även knäckstativet med Eulerfallen är bra. Testriggen med balkböjning är trevlig, den är dock klumpig. Fotoelastisitet är trevligt men jag vet inte hur mycket det ger egentligen.

Det hade varit kul med någon typ av byggsats för fackverk och ramverk. Det är smidigt att koppla ihop och går att böja eller knäcka. Överhuvudtaget är en byggsats trevligt. Andra kurser, som t.ex statik och hållfasthet hade kanske velat ha en enkel modell av ett varlv eller en valvbrosom man får bygga upp själv och lista ut hur man får en stabil struktur. Den kan göras i trä med klossar till en valv så bygger man upp den själv.

Är detta mest relevant för Samhällsbyggnad?

- Ja men det är ändå ett bra exempel som kan uppskattas.

Vad fick dig att starta youtubekanal och hemsidan (de mechanica)?

- Efterfrågar studenter digitala medel?

- Har du märkt av någon respons? Positiv/negativ från studenter eller andra lärare?

- Hemsidan startade jag i samband med första året jag tog en över hållfasthetskurs och en maskinelementskurs. De hade tre olika böcker men jag tyckte inte att de skulle behöva köpa en bok. Så istället kondenserade jag ner anteckningar från hållfasthetsläran och gjorde det mer tillgängligt. Jag ville få hållfasthetsboken närmare studenten. Digitalt är också trevligt, och jag höll på med webbutveckling. Jag har lagt till fler exempel på hemsidan efter hand. Jag har även tänkt länge att det varit bra med videor, och det har varit efterfrågat. Jag sökte utvecklingspengar till att ta fram youtubvideor för hållfasthetsuppgifter som skulle kunna vara till nytta för många studenter. Youtube är en bra plattform eftersom det är tillgängligt för fler än bara på Chalmers. Men det tar mycket tid att spela in och redigera, man blir lite perfektionist.

D.3 Intervju med Peter Folkow

Intervju med Peter Folkow

Vilka kurser har du varit involverad i?

- Har aldrig varit examinator i någon hållfasthetskurs, utan bara mekanikkurser på både grund- och masternivå. Har dock varit assistent i hållfasthetskurser. Håller kurs på Teknisk design och Samhällsbyggnadsprogrammet och har ofta experiment med Teknisk design eftersom de är så få i varje klass. För Samhällsbyggnad demonstrerar jag experimenten eftersom de är fler i kurserna.

Har du använt studion i dina kurser?

- Ja, har använt experiment från studion och ibland tagit med dem och använt för att demonstrera i sal.

Vi har valt att rikta arbetet till en laboration i hållfasthetslära. Har du upplevt något återkommande moment som studenter har svårt för?

- Det hade behövts experiment för yttröghetsmoment, skjuvspänningar och tvärsnitt.

Vi har tänkt utforma ett experiment för masströghetsmoment. Det finns redan experiment för detta, som t.ex. ölburkarna. Vad ska dessa visa?

- Ingår inte i så många kurser, men ingår på maskin i dynamikkurser. Man ställer upp en friläggning, energikonserveration och mäter tiden för hur snabbt de rullar. Kontentan är att det inte har med massa att göra hur snabbt de rullar, utan det har med geometrin att göra. Man lägger de på ett sluttande plan. Den tunna burken är bara ett skal, vilket blir en annan geometri jämfört med den med cement som är en solid cylinder, samt en med tunt skal med vätska i som mest är ett roligt "mellanfall". Det är alltså inte massan som påverkar.

Vi förklarar vår plan med masströghets-experimentet. Vill du kolla så att vi är rätt ute med hur vi tänker. Antingen kan man sätta ett snöre som man snurrar runt plattan, då kommer momentet som uppkommer bero av radien på plattan och massan. Beroende på den orangea massa (syftar på skissen), se när systemet börjar snurra?

- Oavsett massa som hängs på kommer det börja snurra eftersom lagret är lättroligt. Beror snarare på masströghetsmomentet på den blå cylindern (syftar på skiss), för att kunna beräkna masströghetsmomentet behöver rotationshastighet kunna mätas på plattan.

Varvmätare med laser?

- Antingen mäter ni med varvmätare hur plattan snurrar eller hastigheten som den orangea vikten faller. Jag brukar låta studenter filma med mobilen för att skapa en uppfattning. Masströghetsmoment ingår i rörelseenergi och även vinkelacceleration. Jag tycker att det är ett trevligt experiment, om rullagren inte har för låg friktion.

Vi har diskuterat vilket plan experimentet ska ske i, antingen på bord eller hänga ut från en vägg.

- Du menar att den blå biten är riktad i horisontell riktning? Det finns ett sådant experiment i studion. Den har för dålig noggrannhet, men ni borde titta på det.

Om man sätter den i ett annat plan behöver man tänka på andra krafter som verkar då?

E

Laboration i hållfasthetslära

LABORATION I HÅLLFASTHETSLÄRA

KANDIDATARBETE
STUDIO I MEKANIK OCH HÅLLFASTHETSLÄRA

Läsåret 20/21

Kontinuerligt upplagd balk

Bakgrund

En balks utböjning varierar beroende på vilka typer av stöd som används och hur dessa stöd är placerade. Även lasternas placering och storlek påverkar utböjningen.

I detta experiment representerar metallremsan som är monterad på tavlan en balk. De olika stöden i figur 2a kan placeras var som helst på metallremsan, medan stödet i figur 2b är fastmonterat. Dock kan stöden av typ A och C spännas åt med hjälp av en skruv, vilket gör att stöden i det fallet representerar andra typer av stöd än tidigare.



Figur 1: Kontinuerligt upplagd balk utan last



(a) Ett stöd av typ A och tre av typ B



(b) Ett stöd av typ C

Figur 2: Experimentets tillhörande stöd

Frågeställning

Para ihop stödtyperna **A**, **B** och **C** med motsvarande stödsymboler. Då både **A** och **C** verkar som två olika typer av stöd beroende på om de är spända eller inte kommer de paras ihop med två olika stödsymboler var.

Genomförande

Säkerställ att stödet av typ **C** som är placerat i punkt **3** inte är spänt (justera annars på baksidan av tavlan).

Placera stöd enligt nedanstående instruktioner. Innan en last placeras mitt mellan stöd **2** och **3**, diskutera och skissa hur ni tror utböjningen över hela balken kommer se ut.

- Position 1: Stöd **B**
Position 2: Stöd **B**
Position 3: Stöd **C** ej spänt
- Position 1: Stöd **B**
Position 2: Stöd **B**
Position 3: Stöd **C** spänt
- Position 1: Stöd **A** ej spänt
Position 2: Stöd **B**
Position 3: Stöd **C** ej spänt
- Position 1: Stöd **A** spänt
Position 2: Stöd **B**
Position 3: Stöd **C** ej spänt

Spänningsoptik

Bakgrund

När en geometri utsätts för olika typer av krafter (t.ex. drag, tryck, vridning) uppstår spänningar i materialet.

Genom att belysa plasten polykarbonat med polariserat ljus kan spänningskoncentrationer synliggöras. Detta kallas för spänningsoptik. Syftet med laborationen är att m.h.a. skivor i polykarbonat visualisera och därmed öka förståelsen för var spänningar uppstår i grundläggande geometrier.

Större deformation i polykarbonatskivorna leder till tätare färgskiftningar. Om deformationen är proportionell mot spänningarna kan färgskiftningarna ses som ett spänningsmönster.

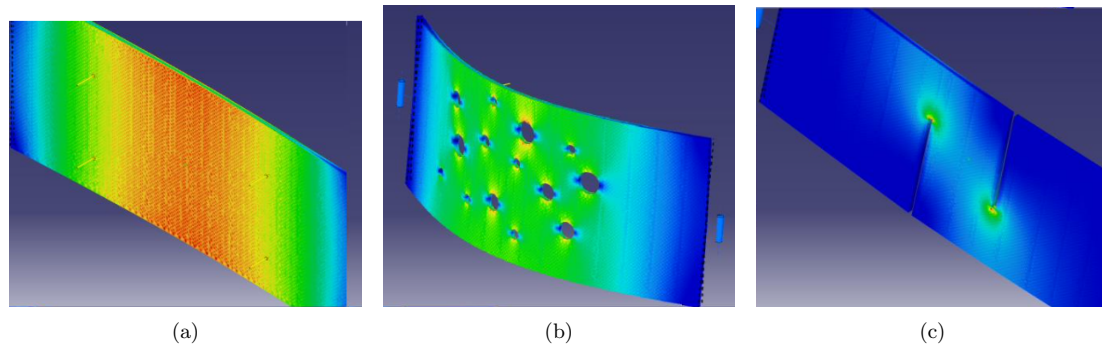
Genomförande

Diskutera var ni tror spänningar uppstår i de olika skivorna. Böj dem sedan framför det polariserade ljuset i lådan.

Var i geometrin uppstår de största spänningarna?

Diskutera varför spänningarna uppstår på just dessa ställen. Jämför sedan varje skiva med dess tillhörande FEM-analys i figur 3.

Vad är det för skillnader? Vad kan dessa skillnader bero på?



Figur 3: Spänningsanalyser av geometrierna utsatta för böjning

Nedböjning av balk

Bakgrund

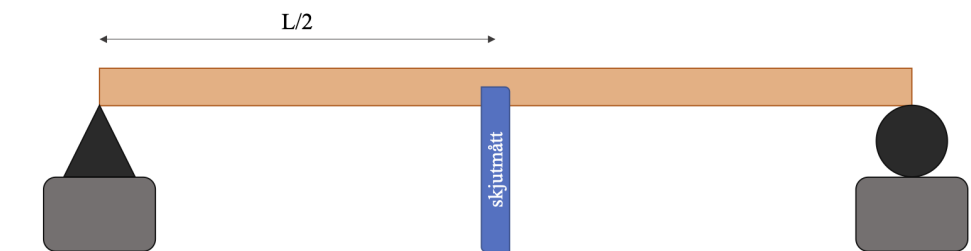
En balks material påverkar dess nedböjning. Olika geometrier ger olika yttröghetsmoment, vilket gör att även det är en betydande faktor när beräkningar på en balk ska göras.

För att beräkna nedböjningen u i mitten av en fritt upplagd balk gäller ekvation 1, då balken även belastas på mitten.

$$u = \frac{PL^3}{48EI} \quad (1)$$

Tillsammans med formeln för rektangulärt yttröghetsmoment, ekvation 2, kan E-modulen bestämmas.

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (2)$$



Figur 4: Uppställning av balken i liggande läge

Frågeställning

Plankans yttröghetsmoment I samt E-modul ska bestämmas för både liggande och stående läge.

Genomförande

- Placera träbalken i liggande läge på stöden enligt figur 4, samt skjutmättet.
- För mätarmen upp till undersidan balken och nolla displayen på mätaren.
- Mät avståndet L mellan stöden.
- Låt en student ställa sig jämfota på balkens mitt och läs av nedböjningen u på skjutmättet.

Upprepa proceduren ovan med träbalken stående på hökant. Beräkna därefter E-modulen för båda fallen. Skiljer sig E-modulen mellan fallen? Diskutera eventuella anledningar till att en skillnad kan uppstå!

Balkrigg

Bakgrund

En balks deformation varierar beroende på vilken typ av inspänning som används. En fast inspänd konsolbalk med en punktlast är ett vanligt förekommande elementarfall.

Vinkeländringen θ kan beräknas enligt:

$$\theta = \frac{PL^2}{2EI}\beta^2 \quad (3)$$

Frågeställning

Beräkna vinkeländringen θ hos en fast inspänd konsolbalk som funktion av lastens placering.

Genomförande



Figur 5: Fallet fast inspänd konsolbalk visualiserat i balkriggen

- Kontrollera att uppsättningen med balk och indikatorklocka stämmer med figur 5.
- Kontrollera att indikatorklockan står på 0 innan vikten placeras. Gör den inte det bör indikatorklockan placeras om. Kontrollera att mätspetsen är vinkelrät mot balken och endast intryckt några millimeter. Justera därefter indikatorklockan så att den står på noll m.h.a. att rotera den yttre ringen.
- Mät balkens längd L .
- Placera en vikt i mitten av balken och mät avståndet β mellan vikten och inspänningen.
- Läs av indikatorklockans utslag θ .
- Beräkna den teoretiska vinkeländringen θ m.h.a. ekvation 3.
- Diskutera eventuella felkällor!

F

Frågeställningar till experimentfilmer

F.1 Dragprov

Dragprov

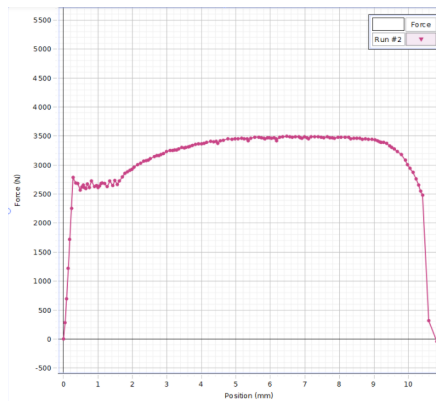
Dragprovkurvan för kolstål ser lite annorlunda ut jämfört med arbetskurvan för konstruktionsstål. Varför gör den det?

- *Kolstålet är segare och har en lägre flytgräns (rätt)*
- *Kolstål har en högre densitet*
- *Annat*

Vilket av materialen har högst E-modul?

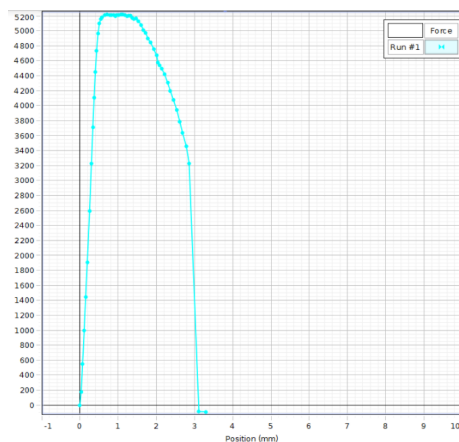
- *Kolstål*
- *konstruktionsstål*
- *De har ungefär samma E-modul (rätt)*

Här ser du dragprovkurvan för kolstål. Vid vilken kraft börjar den deformeras plastiskt?



Svar: ca 2800 N

Nedan ser du dragprovkurvan för konstruktionsstålet. Avläs i grafen vid vilken kraft brottet sker [N].



3200 N (+-50N)

F.2 Flytta moment

Flytta moment

Hur påverkades utslaget på momentnyckeln av att flytta angreppspunkten längre ut på hävarmen?

- *utslaget förblir detsamma (rätt)*
- *utslaget blir större*
- *utslaget blir mindre*

Hur kan man tolka förhållandet mellan moment och angreppspunkt?

- *Angreppspunkten spelar ingen roll (rätt)*
- *Angreppspunkten kan öka och minska momentet beroende på om angreppspunkten flyttas längre ut eller in på hävarmen.*

F.3 Friktion

Friktion (Emmas stegen)

En matta placeras under stegen. Kommer vinkeln (mellan golv och stegen) där stegen börjar glida öka eller minska?

- *Minska (rätt)*
- *Öka*

Stegen står stabilt men en vikt hängs på långt upp på stegen. Vad händer?

- *Stegen faller (rätt)*
- *Stegen fortsätter att stå stabilt*

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

Göteborg, Sverige 2021

www.chalmers.se



CHALMERS