

# KAOTISK DOBBELT-PENDEL

Manual & Rapport H2018

Her følger en oversikt over det eksperimentelle oppsettet, gjennomføring av forsøket og noen erfaringer fra semesteret. For videre spørsmål kontakt [olinear@student.matnat.uio.no](mailto:olinear@student.matnat.uio.no).

## I. EKSPERIMENTELT OPPSETT



FIG. 1: Bilde av dobbeltpendelen med maskering og bakgrunnsskiver for maksimal støyreduksjon.

### Utstysrliste

- Dobbelpendelt
- Svarte bakgrunnsskiver som reflekterer lite lys.
- Rødt, grønt og blått fargepapir i sirkulære skiver.  
*Papirene hadde en høy andel av henholdsvis rød, grønn og blå farge i seg og lite av de to andre verdiene. Typisk RGB verdier var 230-250 for den aktuelle fargen, og 100-120 av de øvrige to fargene.*
- Svart maskeringsteip  
*Reduserte støy og "Hull" i bakgrunnen, også brukt til å maskere dobbeltpendelen.*
- svart saks og svarte oppvaskhansker
- Tau til å henge opp pendelen
- Laserpenn
- Mobiltelefon
- Stativ til laserpenn og mobiltelefon
- PC med matlab R2017a

### A. Oppsettet

En dobbeltpendel monteres på et stativ og maskeres med svart teip. På stativet festes svarte bakgrunnsskjermer som reflekterer lite lys. En blå, en grønn og en rød merkelapp plasseres som avbildet i figur 1. Det er viktig at merkelappene plasseres i den samme rekkefølgen, ellers vil ikke dataen som tas opp fra de tre fargekanalene stemme overens med titler på baneplottene siden. Alt annet enn markeringspunktene i rødt, grønt og blått burde være svart for at analyseprogrammet skal fungere så godt som mulig. Dobbelpendelen har et lite hull i enden som brukes for å binde pendelen fast i et opphengspunkt og sette initialbetingelser.

Rett ovenfor dobbeltpendelen settes et stativ som kan holde en mobiltelefon og en laserpenn stabilt under forsøket, stativet er avbildet i figur 2. Kameraet må stå helt stille under og mellom opptakene for at programmet skal plote banene riktig i forhold til hverandre. Dersom dette ikke overholdes vil de endelige resultatene fort bli misvisende. Laserpennen brukes ved finjustering av pendelens initialbetingelser, dette kan også gjøre med andre metoder avhengig av hvor presist man ønsker å kontrollere initialbetingelsene (linjal, elektromagnet, øyemål osv.).



FIG. 2: Stabilt stativ brukt for å sikre at mobiltelefon og laserpenn holdes fast ved gjentatte opptak.

Studentene fester sin egen mobiltelefon i stativet, og setter initialbetingelser i henhold til sin hypotese. En gruppe tar typisk mellom 6 og 12 opptak. Under opptakene bruker studentene svarte oppvaskhansker og svart saks for å kutte tråden mellom pendel og opphengspunkt, for ikke å lage støy i bildet.

Studentene får tilgang på en PC med matlab R2017a. De laster deretter opp opptakene fra mobilen til comupteren via en drive. Et annet overføringsmedium kan brukes, men pass på at opptaket ikke komprimeres. Det er viktig at begge programmene ligger i samme mappe, sammen med videoopptakene. Opptakene skrives inn i matlab, der studentene redigerer klippene og lar programmet analysere banene. Deretter får studentene se tre plott. To som viser øvre og nedre del av pendelens vinkelutslag som funksjon av tid og ett som viser pendelens bane langs begge romakser. Eksempler fra studentenes resultater er angitt i fig. 3, 4 og 5.

## B. Labbens gang

Vi startet dagen med å gi en rask introduksjon til enkelt- og dobbeltpendeler, snakket om labbens formål og hva vi ønsket at studentene skulle ta med seg fra dagen. Vi ga også en rask introduksjon til det eksperimentelle oppsettet i sin helhet. Vi lot studentene relativt raskt sette i gang med del 1 på egenhånd, og ba dem stoppe før de kom til den introduserende teksten ved del 2. Studentene gjennomførte del 1. Deretter ga vi dem en introduksjon til programvaren og lærte litt teknikk rundt å ta videoopptak. Vi prøvde å begrense mengden instruksjoner for å åpne for mer kreativitet i løsningen av oppgaven, og prøvde å gi kun den informasjonen som var strengt nødvendig eller etterspurt. Deretter testet studentene programmet, og satt i gang med å formulere en hypotese. Vi diskuterte så om hypotesen var mulig å gjennomføre, og hva slags resultater vi egentlig ville få fra det eksperimentelle oppsettet studentene satt sammen. Deretter fikk studentene frihet til å gjennomføre forsøket sitt. Når studentene hadde sett gjennom dataen, og forsøkt å analysere den, gikk vi gjennom resultatene i plenum og diskuterte samsvaret med hypotesen.

## C. Studentenes resultater

Avhengig av hypotesen hver gruppe satt, trakk de ulike konklusjoner rundt dobbeltpendelens egenskaper. Eksempler på hypoteser som ble stilt:

- Dobbelpendelen har en predikasjonshorisont, og denne vil ligge på 2 sekunder.
- Predikasjonshorisonten er den samme for alle initialbetingelsene.
- Dobbelpendelens predikasjonshorisont vil være den samme både for det øvre og nedre leddet av pendelen.
- Dobbelpendelen følger en symmetri, det impliserer at predikasjonshorisonten vil være den samme om vi slipper den speilvendt om senteraksen.
- Predikasjonshorisonten vil bli kortere, jo mer energi systemet tilføres.

Den typiske predikasjonshorisonten ligger på mellom 1.5 og 2.5 sekunder. Den varierer stort sett langs hele spekteret av initialbetingelser, men tiden blir lengere for lave energier. Dvs i overgangen fra dobbeltpendel-egenskapene til enkeltpendel. Studentene brukte stort sett 3-4 opptak for å bestemme predikasjonshorisonten til en initialbetingelse noe røft. Herunder følger eksempler fra resultatene til en av gruppene, som er representative for hvordan resultatene burde se ut når den er løst i henhold til oppgaveteksten.

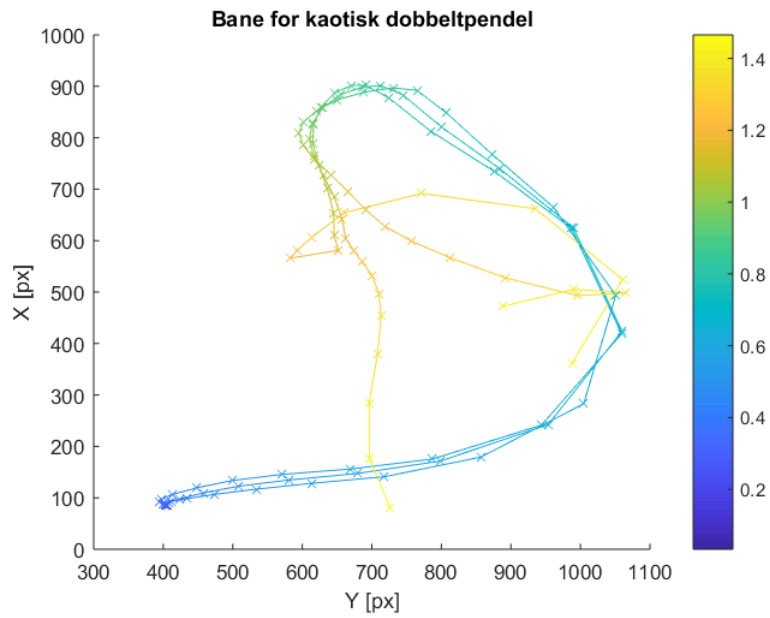


FIG. 3: Forflytning av massesenteret til den kaotiske dobbeltpendelen.

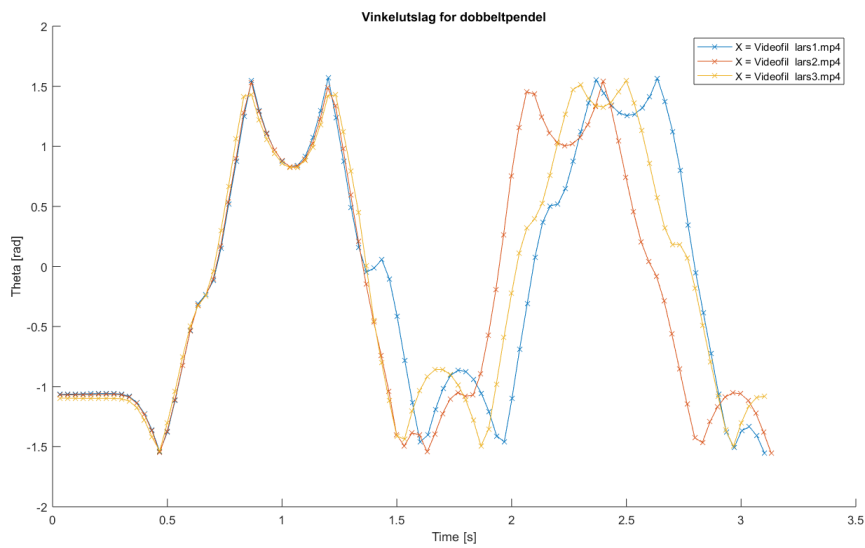


FIG. 4: Vinkelutslag som funksjon av tid for dobbeltpendel (Nederste pendelledd).

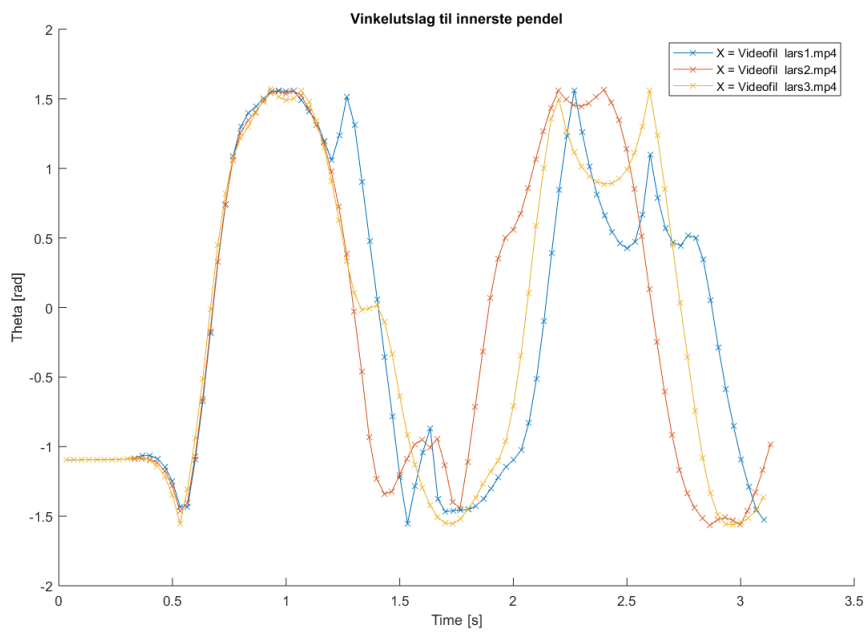


FIG. 5: Vinkelutslag som funksjon av tid for øverste pendelledd. Interessant å også se de kaotiske tendensene i dette leddet.

## II. BRUK AV PROGRAMVARE OG TEKNISKE UTFORDRINGER

Vedlagt program leser bildefiler som studentene laster opp, og finner massesenteret til de røde, grønne og blå markeringsskivene festet på dobbeltpendelen. Deretter plottes massesenterene fra flere løp sammen for at studentene enkelt skal kunne analysere pendelens egenskaper. Alt studentene i praksis trenger å gjøre er å laste inn filmene, trykke på start og følge instruksjonene i kommandovinduet.

### A. Tekniske detaljer og lyssensitivitet

Programmet leser filmene ramme for ramme inn i RGB  $M \times N \times 3$  matriser, der den siste dimensjonen gir henholdsvis mengden rødt, grønt og blått lys i  $M \times N$  pixelen. Når studentene blir bedt om å sample henholdvis hver farge i de første rammene i filmene settes en dynamisk terskel som filtrerer fargeskiven fra bakgrunnen. Denne terskelen resamples automatisk for hver ramme, i et forsøk på å sikre at programmet alltid klarer å spore massesenteret. Vennligst se program for nærmere detaljer. Den blå merkelappen lager et referansepunkt for forflyttingen til den røde og grønne skiven, og er helt nødvendig for at programmet skal funke. Merk at denne kun samples en gang, og en ramme danner slik referansen for alle etterfølgende rammer. Dette er akseptabelt så lenge vi kun ser på de relative forskjellene mellom banene.

Fordi programmet beregner massesenteret basert på lysintensiteten i hver pixel blir det sentralt å ha god kontroll på lysforholdene i rommet. De vanligste utfordringene med bruk av programmet er refleksjoner i teipen og fra umaskerte deler av dobbeltpendelen. Ofte er ikke effekten på forskyvningen av massesenteret veldig betydelig for den påfølgende analysen, men det er greit å være oppmerksom på. Det er normalt ikke noe problem før støyen blir såpass stor at programmet ikke lenger er sikker på hvilket objekt som er pendelen, og resampler bakgrunnsfargen istedenfor pendelen. Merk at jo renere grønn-, rød- og blå farge på markørskivene desto mindre har tilstedeværelsen av støy noe å si.

### B. I praksis

Når studentene redigerer filmene er det viktig at de kutter bort all bakgrunnsstøy, slik at bildet som behandles likner figur 7. Er redigeringen gjort riktig og lys-/støyforholdene bra nok vil en typisk ramme se ut som i figur 6. Dersom det er for mye lysstøy i rommet risikerer man enten støy i dataen på form av forskyvninger i massesenterberegningene, og er det riktig dårlig kontrollert vil programmet kræsje som følge av at det ikke lenger klarer å bestemme hvilket objekt som er dobbeltpendelen.

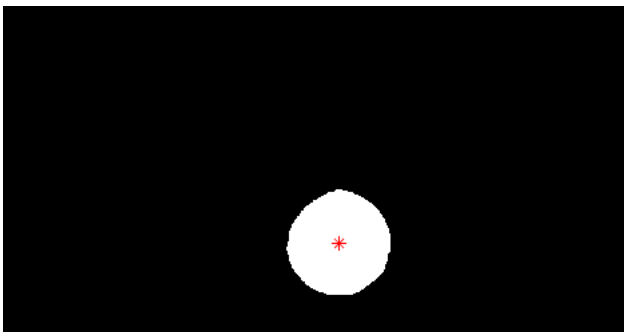


FIG. 6: Bilde av dobbeltpendelen slik utsnitt burde se ut etter redigering.

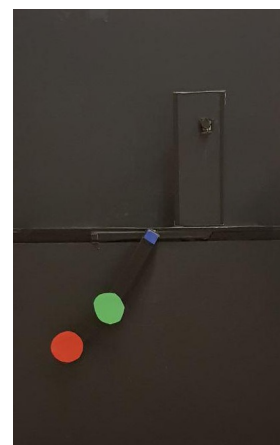


FIG. 7: Bilde fra kjøring av program når støyen er minimal og resultatet optimalt.

Per nå er det et annet større problem som ligger i programmet, som oppstår når banene fra flere løp skal plottes side om side. For at pendelen skal begynne å falle i samme punkt i plottet sporer man når pendelen krysser loddeaksen, og plotter funksjonen fra  $n$ -antall punkter før dette tidspunktet. Hvor mange punkter som kreves er blant annet avhengig av fps i kameraet som ble brukt. Per nå er dette hardkodet i funksjonen *adapt*, og er et element som med tiden burde autmoatiseres. Antallet punkter ligger i variabelen *traceback*, og er i angitt eksempel satt til 20 bilderammer. Dersom programmet ikke har fler en 20 billedrammer før den krysser loddelinjen, vil programmet kræsje og programmet vil ikke klare å plote banene. Vi løste dette midlertidig ved å be studentene holde pendelen i 3-4 sekunder fra de startet opptaket til de lot pendelen falle og ikke kutte filmene for mye i forkant.

Vedrørende sensitiviteten ovenfor lysforholdene: Programmet burde alltid få kjøre en testrunde på 1-2 videofiler før større datasett behandles. Dette lar en effektivt få en oversikt over problemområder og lysforholdene for eksperimentet, som naturlig vil variere fra gang til gang. For å assistere med videre behandling av dataen er det lagt inn 4 toggle-funksjoner. Disse lar deg manuelt behandle situasjoner der støyen blir såpass høy at det er risiko for at farge og massesenter samples feil. Disse benyttes også for å teste lysforholdene i rommet. Togglefunksjonene burde være avskrudd under behandling av større sett, og benyttes ideelt kun for testing. Oversikt over toggle funksjoner:

- *global print\_flag* skriver sentral informasjon til kommandovinduet, og burde stå på. Den krever lite ressurser, og lar deg enkelt holde oversikt over hvor langt beregningene har kommet.
- *global show\_img* kan benyttes for å se på 1-2 videor, men skal skrus av for større mengder data. Dette er en svært krevende funksjon, men den lar seg se ramme for ramme i binært format, som angitt i figur 6. Slik kan man enkelt sjekke at det ikke er betydelig støy i omgivelsene og at alt går som det skal.
- *global debug\_flag* og *global PANIC\_MODE* er støybehandlingsverktøy som lar deg manuelt resample fargen på pendelen i vanskelige regioner dersom dataen er svak men du likevel ønsker å behandle den. Det anbefales likevel å kun forkaste opptaket i slike tilfeller, da dette er en arbeidskrevende prosess.

**OBS!:** Når programvaren ble kjørt på maskiner med en tidligere utgave av Matlab måtte koden skrives om for å fungere. Flere sentrale funksjoner i programmet eksisterer eller fungerer annerledes i tidligere versjoner.

### III. ERFARINGER FRA HØSTSEMESTERET OG NOTATER PÅ OPPGAVEN

Labben ble gjennomført av 4 grupper på 4 personer. Alle deltakerene var studenter i sitt første semester i bachelorgraden fysikk og astronomi ved universitetet i Oslo.

#### A. Totalt tidsbruk

Labben var satt til å vare 3 timer, men varte ofte 4. Tidsbruken og oppgaven var ikke tilstrekkelig for å dekke labbens formål. Studentene brukte i snitt 1.5-2 timer på første del, og 2-2.5 timer på siste del. Det var ønskelig at studentene skulle gjennomføre første del på 1t og annen del på 2-3t. I fremtiden ønskes det at del 2 vektas tyngere, slik at fokuset flyttes mer over fra det teoretiske til å sette opp det endelige forsøket.

#### B. Gruppestørrelser

Elevene gjennomførte øvelsen i grupper på 4. Det hendte ofte at 2 tok ledelsen og 2 falt litt bakpå. For senere bruk anbefales grupper på 2 studenter. Dette burde gi passende rom for diskusjon, samt rom for at alle kan delta på selvstendig vis.

#### C. Motivasjon og utbytte

Ved slutten av hver økt spurte vi studentene hva de synes om oppgaven. Studentene uttrykte at det var et tilbud de satt stor pris på, og var veldig glad for å få mer fysikk det første semesteret. Noe de hadde savnet. De uttrykte at de synes oppgaven var veldig morsom å jobbe med, og at de følte de hadde lært om et nytt om fysikk og eksperimenter. Den eneste klagen de ga var at overføringen av opptakene fra mobiltelefon til PC gikk for tregt. Dette skyldes blant annet at det ikke var wifi på labbsalen.

Noen svarte at de synes oppgaven var krevende, og andre fant den lett å følge, ofte avhengig av hvilken rolle studenten hadde fått i gruppen. I vår opplevelse som labbveiledere for første gang virket oppgaven i snitt passende utfordrende for gruppene. Vi synes studentene viste både glede og nysgjerrighet i gjennomføring av oppgaven, og at de generelt evnet å være selvstendige.

#### D. Vanskelighetsgrad og Læringsmål

Studentene var likevel i varierende grad selvstendige under gjennomføring av labben. Del 1 gjennomførte alle gruppene mer eller mindre selvdrevent. Spørsmålene som ble stilt var relatert til det teoretiske grunnlaget for oppgaven. Studentene ble derimot langt mer avhengig av veiledning i overgangen til del 2 av forsøket. Ingen av gruppene kom med en hypotese helt av seg selv. Vi som veiledere ga dem derfor et par eksempler på hypoteser. Dette kunne virke begge veier. 2 av gruppene var tilbøyelige til å bare velge det vi ga dem, og de 2 andre brukte eksemplene godt. De bygget videre på dem og kom med nye kreative og spennede problemstillinger. Dette tror vi indikerer at del 1 var suksessfull i å ruste studentene for del 2, men at settingen og oppgaveformuleringen for det eksperimentelle oppsettet var uvandt og kanskje burde vært litt mer utfyllende. Kanskje burde man i neste omgang gi en bedre introduksjon av hva som forventes i del 2 også før studentene setter i gang med del 1.

Studentene brukte ganske lang tid på å bli kjent med systemet, og egenskapene ved kaotiske systemer, og fokuserte mer på den bakenforliggende teorien enn på hva eksperimentet kunne fortelle oss. I henhold til labbens intensjon håper vi at man kan videreutvikle og fokusere mer på hvordan studentene setter en hypotese, planlegger et forsøk og lærer fysikk fra hva de selv kan erfare. I denne omgang ble studentene mer eller mindre rushet gjennom denne delen, som burde vært en av de mest sentrale elementene på labben. Vi tviler på at det er mulig å gi denne typen lærdom på 3 timer, men tror labben kan ha vært suksessfull i å vekke noen av disse tankene. Vi ønsker i fremtiden å presisere begrensningene ved det eksperimentelle

oppsettet, og la studentene tenke mer igjennom begrensningene ved informasjonen de har for hånd og hva de faktisk kan finne ut fra hva de har tilgjengelig.

## E. Mobiltelefoner

Programmet har vært testet for mobiler med en billedrate på 24 og 30 fps. 30 fps fungerer svært godt. 24 fps fungerer også, men programmet har lettere for å miste kontroll på dobbeltpendelen.

## IV. FORMEDRINGSELEMENTER

### A. Programvare

Vi ønsket ikke å gjøre databehandlingen for automatisert, fordi vi synes det var fint at studentene lært litt om kostnaden av datamengder i henhold til tid og ressurser. Likevel kan trolig noe kuttes ned på behandlingsfronten for å gi mer rom til analysen av dataen. Her er et par områder som burde forbedres:

*Redigering av filmer* Implementer en automatisering av klippingen av videofilene. I.e. find automatisk når pendelen begynner å falle.

*hardkoding av plotting* omstrukturer adapt-funksjonen for å unngå hardkodingen av startpunktet til grafen, slik at man ikke trenger å ta hensyn til dette når filmene redigeres (Dersom denne funksjonen ikke benyttes vil det være langt mer krevende å analysere dataen, da banene vil dukke opp på vilkårlige punkter langs tidsaksen).

### B. Notater om oppgaven

Oppgaven i sin helhet virket å ha vært lagt opp bra, og burde videreutvikles i samme stil. Studentene evnet å gjøre seg kjent med systemet i del 1, som ga dem et godt utgangspunkt for del 2. Den største ulempen med opplegget var at studentene brukte for mye tid på del 1 og ble rushet gjennom den andre og viktigste delen. Oppgaven fremstår som et første utkast, og er langt fra ferdig.

**Del 1:** Det fungerte veldig fint å la studentene starte med å fritt utforske pendelen. Slik ble de trygge på systemet, og kom raskt i gang. Det var også et godt utgangspunkt for å få i gang diskusjon og la gruppa bli bedre kjent. Spørsmål 1 og 2 virket bra, og ga studentene en trygg grunn å starte fra. Spørsmål 3 kan trolig droppes eller omformuleres. Studentene hadde vanskelig for å forstå hva som ble ment med to parametere, og hvilke som kunne dekke pendelens bevegelse. Vi måtte ofte gi studentene svare på spørsmålet, og forklare dem koblingen med plottene de skulle se siden. På den andre siden kom det ofte mange ideer som kom opp her, og spørsmålet var godt for å skape diskusjon innad i gruppen. Spørsmålet burde nok helst omformuleres, og det burde gjøres klarere hva intensjonen med spørsmålet er (å tenke nøyere gjennom hvordan vi kan bruke oppsettet til å finne ut mer om pendelens bane). Spørsmål 4 og 5 fungerte veldig fint. Bemerk at alle gruppene valgte å forsøke å slippe pendelen to ganger fra samme sted, og allerede her fikk et ganske klart bilde av predikasjonshorisonten. Vi fikk ikke anledning til å se hvordan studentene ville ha forholdt seg til resten om de ikke allerede hadde observert på øyemål at det var noe forutsigbart. Etter spørsmål 6 hadde alle gruppene forstått poenget med predikasjonshorisonten.

**Del 2:** Studentene hadde større problemer med å ta del 2 på alvor enn del 1. Den innledende teksten fungerte bra, og virket bekreftende på hva studentene hadde sett i del 1. De fleste gruppene hadde en god idee om hvordan de kunne lese ut predikasjonshorisonten for en initialbetingelse, og var klare for å stille litt mer avanserte hypoteser. Det var likevel vanskelig å få studentene til å presisere en hypotese, skrive den ned og bygge oppsettet rundt hypotesen. Ingen av gruppene skrev noe mer enn hypotesen ned på planketten, og de fleste gruppene unnlot å forbrede en prosedyre i forkant og diskutere feilkilder. Dette kan også sies å skyldes tidspress, og at studentene begynte å bli klare for å dra hjem når klokken nærmet seg 7 om

kvelden.

Fokuset på det eksperimentelle aspektet av oppgaven burde presiseres bedre. Det var et ønske om at studentene skulle lære mer om forholdet mellom tilgjengelig utstyr, begrensninger ved eksperimenter i henholdt til ideer vi har om systemet. Hva kan studentene lære om fysikk ved å selv sette opp forsøk og observere et system. Disse tankene fremstår fremdeles som svært interessante å få nærmere presisert gjennom oppgaven. Når studentene ble møtt med denne type spørsmål viste de interesse, men fokuset glapp fort og studentene returnerte raskt til fokuset på faktaorientert teori. Det var ikke klart for studentene hvilke av konklusjonene som var grunnløse eller velbegrunnet.