

Om brug af enkle eksperimenter i begynderundervisningen i fysik

Peter Ditlevsen

Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Fysik er en eksperimental videnskab. Vores teorier og modeller skal ultimativt kunne prøves ved eksperimenter eller observationer. Omvendt danner eksperimenter og iagttagelser i forskningen grundlag for nye teorier og modelbygninger. Derfor har eksperimenter traditionelt indgået i fysikundervisningen op gennem folkeskolen, gymnasiet og universitetet.

I gymnasiet har eksperimentet i undervisningen typisk udviklet sig til en fast form med teoretisk indledninger, udførelse af et standard eksperiment efter en skabelon og afrapportering i form af den obligatoriske “fysikrapport”.

På Københavns Universitet har eksperimenterne i begynderundervisningen haft lidt forskellige former igennem tiden med større eller mindre vægt på selvstændige projekter. Denne undervisning har forgået parallelt med men uafhængigt af de traditionelle forelæsninger og regneøvelser. Der har således ikke været nogen direkte sammenhæng imellem den teoretisk undervisning og laboratorieøvelser. Fokus i eksperimenterne har derfor i høj grad været “indlæring af eksperimental praksis”, altså hvorledes et eksperiment bør udføres, dataopsamling og behandling, elimination af fejlkilder, bedømmelse og beregning af måleusikkerheder osv. Altsammen gode og relevante kompetencer i fysikuddannelsen.

Den store didaktiske udfordring i denne opsplitning i teori og eksperiment har været at de studerende har svært ved at se sammenhængen imellem de to og især svært ved at forstå relevansen af eksperimenterne. Et typisk eksempel fra begynderundervisningen er måling af fart og acceleration ved bevægelse ned ad et skråplan. Eksperimentet findes i varierede former med forskellige instrumenter til tidsmålinger og dataopsamling, generelt for

eksperimentet gælder at fokus ikke er på det fysiske fænomen: Acceleration i tyngdefeltet, som er langt under det faglige niveau i den sideløbende teoretiske undervisning. Fokus er udelukkende på selve måleteknikken. Denne form for undervisning får sædvanligvis ikke god bedømmelse af de studerende.

Denne iagttagelse fik mig til at overveje om ikke bøtten kunne vendes således at de studerendes eksperimenter snarere kunne understøtte og styrke den teoretiske forståelse af begreberne og de fysiske sammenhænge. Eksperimenterne skulle have en meget mere direkte forbindelse med den øvrige fysikundervisning. Dette fordrede to ændringer: for det første måtte de fysiske eksperimenter måtte have en mere åben problemformulering og de studerende mulighed for en mere undersøgende tilgang. For det andet skulle eksperimenterne udføres i mere direkte sammenhæng med den teoretiske undervisning. Den første del blev udviklet i den indledende undervisning i klassisk mekanik, mens begge dele indgår i min nuværende undervisning i kurset “Termodynamik og Statistisk Fysik” i tredje blok på første studieår. Jeg vender tilbage til dette.

Klassisk fysik: Den harmoniske oscillator

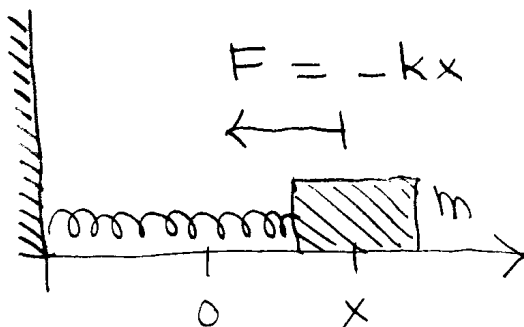
For at illustrere ideerne, er den klassiske fysik ideel, så jeg vil kort give et eksempel herfra: Et af de fundamentale systemer, som behandles indgående er den harmoniske oscillator, som i ideel form beskriver enhver form for svingning. Newtons 2. lov løses for dette system, der består af en fjeder og et lod.

Det fysiske problem er det første og simpleste eksempel på en differentialligning, de studerende møder. Fra løsningen af denne ligning fås en sammenhæng imellem svingningsfrekvens ω , loddets masse m og fjederens fjederkonstant k :

$$\omega = \sqrt{k/m}.$$

For at opnå fortrolighed med denne formel får de studerende udleveret en æske med fjedre, lodder, en vægt og en lineal. Opgaven lyder: “Læreren starter et stopur, bestem hvornår der er gået 2 minutter”. Denne opgave, som løses i grupper af 3-5 studerende og afrapporteres som en lille eksperimentalog på kursus-hjemmesiden, bør ikke tage meget mere end omkring 30 minutter.

I løsningen af denne opgave indgår en række overvejelser: (1) Fjederkonstanten måles ved at måle den statiske udtrækning i tyngdefeltet. (2)



Figur 1.1. Den skematiske fremstilling af den harmoniske oscillator i form af fjeder og lod forbundet til en væg og glidende på et gnidningsfrit underlag, hvor tyngdekraft og underlagets normalkraft ophæver hinanden. Dette er en idealisation, hvor svingningen i det konkrete forsøg foregår i lodret retning.

Tyngdekraften indgår ikke i bestemmelsen af svingningstiden. Hvorfor? (3) Hvad er sammenhængen imellem svingningstid og svingningsfrekvens. De dygtigste studerende vil kunne udfolde opgaven yderligere: (4) Hvad bestemmer nøjagtigheden i tidsmålingen? (5) Hvad er en optimal kombination af lod (let/tungt) og fjeder (blød/stiv) (6) Hvorledes indgår fjederens masse? (7) Hvorledes fungerer et mekanisk vækkeur? osv.

Det traditionelle læringssetup for dette eksperiment ville være en “køgebogs”-beskrivelse af et eksperiment, hvor enten forskellige fjedres fjederkonstanter var specificeret, eller hvor fjederkonstanten måles ved påhængning af lodder med forskellige masser, en lineær sammenhæng imellem fjederens udstrækning og massen etableres (tegnes på millimeterpapir), bedste rette linje indtegnes og hældningskoefficienten måles, eventuelt estimeres måleusikkerhederne på måling af k , som senere med ophobningsloven adderes med usikkerheden på måling af masser til sammenligning med måling af svingningstiden. Denne måles, frekvensen udregnes efter en formel og ω^2 plottes imod k og imod $1/m$ for forskellige værdier af k og m ,

således at den teoretiske fysiske sammenhæng eftervises. Dette afrapporteres i en fysikrapport. Denne opgave løses typisk på 3-4 timer inklusive rapportskrivningen.

Læringsindholdet i denne traditionelle eksperimentelle øvelse er helt relevant i forhold til at forstå den eksperimentelle metode til eftervisning af fysiske sammenhænge, god laboratorteknik, usikkerhedsberegninger og skriftlig rapportering. Hvilket iøvrigt i høj grad i indhold og niveau minder om den gymnasiale undervisning på mat-fys linjen før sidste gymnasiereform. Det u hensigtsmæssige i dette setup er dels at "laboratorietræningen" fylder uforholdsmæssig meget, hvilket kan skygge for forståelsen af den fysiske sammenhæng, som undersøges. Dels er dette eksperiment fra forskningsfronten på Galilei's tid! Moderne eksperimenter, relevant for nutidens forskning, som i højere grad motiverer studerende til eksperimentel "forskning", kræver længere tids arbejde og fordybelse. Dette egner sig langt bedre til længerevarende projektarbejde.

Fysik 3: Termodynamik og Statistisk Fysik

Dette kursus er det tredje grundkursus på fysikuddannelsen, som følges af over 100 studerende. Nye grundlæggende fysiske begreber som tryk, temperatur, indre energi, arbejde, varme, mikro- og makrotilstande, reversible og irreversible processer samt entropi introduceres og lovmæssigheder som idealgasligningen samt termodynamikkens første og anden hovedsætninger udledes. Disse begreber og lovmæssigheder og sammenhængene imellem dem er meget abstrakte for de studerende. Et af læringsmålene er således at få konkretiseret begreberne og at opnå "fysik forståelse" for implikationerne af de fysiske love.

Termodynamikken udvikledes som en del af den klassiske fysik op igennem det 19. århundrede, før teorien om atomer. Den tilhørende matematik er meget avanceret og det helt centrale begreb entropi blev fundet som en matematisk konsekvens af teorien, som var ganske vanskelig at fortolke. Med den moderne kvantefysik med atomer og diskrete kvantetilstande udvikledes også den statistiske fysik, der giver en langt mere fyldestgørende og forståelig fysisk forklaring på de termodynamiske love. En didaktisk overvejelse har derfor været at introducere den termiske fysik "ahistorisk", ved fra første færd at indføre den statistiske fysik også inden de studerende introduceres for kvantefysikken. Dette brud med det traditionelle historiske narrativ har været meget hensigtsmæssigt. Dog afhænger

successen altid af mulig lærebogsmateriale (med mindre læreren engagerer sig i det enorme arbejde, det er selv at forfatte et sådant). En glimrende lærebog Kittel and Kroemer (2000) blev anvendt et enkelt år. Denne lærebog har tidligere været anvendt på tredje studieår, men viste sig at være for avanceret til førsteårsundervisningen. Det er lykket at finde en glimrende lærebog på passende niveau med denne moderne tilgang (Schroeder, 2000).

Formålet med at indføre eksperimenter i dette kursus er at udbygge og understøtte forståelsen af de fysiske begreber og sammenhænge introduceret i forelæsningerne. For i bedst muligt omfang at opnå denne sammenhæng er undervisningen arrangeret i to ugentlige sessioner af fire timers varighed. Den første session består en times introducerende forelæsning efterfuldt af 2 timers eksperimenter og endelig en opsamlende times forelæsning. Den anden session består af tre timers traditionelle holdopdelte regneøvelser efterfulgt af en times forelæsning. Forelæsningerne forsøges hold med udpræget grad af interaktivitet, som beskrevet i (Mazur, 1997). Eksperimenterne foregår under mere eller mindre kaotiske forhold i grupper af 4-5 studerende i forelæsningsauditoriet og tilstødende gangarealer. De fysiske rammer er desværre for nuværende ikke gearede til meget andet end "røv-til-sæde" undervisning!

Eksperimenterne

Den direkte sammenhæng imellem forelæsninger og eksperimenter sætter snævre begrænsninger for hvornår eksperimenterne skal udføres. Disse foregår bedst parallelt for samtlige studerende. Dette står i modsætning til den almindelige praksis at studerende i grupper benytter laboratorier og udstyr på forskellige tidspunkter spredt ud over ugen. I dette tilfælde vil der ofte være nogle studerende, der udfører et givet eksperiment før mens andre efter ugens forelæsning og regneøvelser. Omvendt stiller undervisningen krav om at det eksperimentelle udstyr findes i tilstrækkeligt mange eksemplarer til at alle grupper kan arbejde parallelt. Eksperimenterne måtte derfor designes, så de kunne udføres relativt billigt. Dette er i god tråd med (1) ideen om at forsøgene er så simple ("køkkenbords-agtige") som muligt, hvilket kan inspirere de studerende til en mere "legende" tilgang. Samtidig skal eksperimenterne (2) designes, så de udføres med tilstrækkelig nøjagtighed at de viser de ønskede sammenhænge meningsfulds, typisk med en fejl- eller usikkerhedsmargin på under 5-10 %. Disse to modstridende fordringer stiller overraskende store krav til designet. Nogle specifikke problemer

i den termiske fysik er at opretholde tilstrækkelig god varmeisolation for den observerede substans. Dette kommer for eksempel til udtryk ved det faktum at varmekapaciteten for en gas er så meget mindre end for enhver beholder den indeholdes i, hvorved idealgassens temperaturudvikling i en given process kan domineres af varmeudveksling med omgivelserne frem for at vise den teoretisk bestemte sammenhæng. Et eksempel på et delvis mislykkedes eksperiment er gastermometeret, hvor en beholder med luft nedsænkes i henholdsvis isvand, vand ved stuetemperatur og en elkedel med kogende vand. Trykket i beholderen måles med et stempel fastholdt med lodder. Med de fejlkilder, som udstyret har (varmetab, udsivning af luft ved stemplet osv.) måles det absolutte temperaturnulpunkt til ca. -700°C ! Dette resultat gør naturligvis forsøget uegnet, fordi fokus bliver på fejlkilder fremfor det fysiske indhold i idealgasligningen.

Eksempel: Bestemmelse af Poissons konstant

Et eksempel på et vellykket forsøg er et klassisk forsøg til måling af Poissons konstant (forholdet imellem varmekapaciteten for en gas ved konstant volumen og varmekapaciteten for en gas ved konstant tryk). Forsøgsoplægget er gengivet i Appendiks nedenfor. I dette enkle forsøg, som udføres på ca 10 minutter foregår der en adiabatisk udvidelse (en udvidelse uden varmeudveksling med omgivelserne) af en mængde luft i en plastikdunk, som til at begynde med har et lille overtryk. Dette er efterfulgt af en opvarmning til ligevægt med omgivelserne. Dunken er forbundet med et vandfyldt U-rør, højdeforskellen mellem de to vandsøjler i U-røret måles før og efter de to processer er udført. Dette er indirekte trykmålinger, og de studerende stilles en række opgave hvor regner sig igennem sammenhængene, som ender med at en måling af antallet af frihedsgrader i gassen (di-atomig atmosfærisk luft) er bestemt (se Appendiks). Eksperimentet er således en kombineret forsøgs- og regneopgave. Den knytter direkte an til og konkretiserer det foreløste stof. Denne opgave er ikke så åben i sin formulering som andre af kursusforsøgene (se link nedenfor).

Eftertanke

De studerende har igennem de sædvanlige kursusevalueringer udtrykt stor tilfredshed med denne nye undervisningsform. Det er naturligvis positivt,

men i sig selv ikke nødvendigvis en nøjagtig indikator for den gode læring. Eksamensresultaterne har også været glimrende. Der er ikke sket ændringer i eksamensformen, som er traditionel fire timers skriftlig eksamen i "standardopgaver". Det er min opfattelse at den "hands-on" forståelse af fysikken, som forsøgene giver, konkretiserer de abstrakte begreber og derfor giver en dybere forståelse. Denne afspejler sig også i håndteringen af de traditionelle teoretiske opgaver. Dette har naturligvis ikke en valid basis for evaluering, medmindre der udføres flere tests i den angelsaksiste empiriske tradition. Den del af undervisningsevalueringen har ikke været prioriteret højt.

Den blanding af forelæsningsener, eksperimenter og regneopgaver som er beskrevet her kan på nogle punkter ses som en "back to basics" genopfindelse af den (gode) klasseundervisning som foregik på den traditionelle Mat-Fys linje i gymnasiet "da far var dreng". De væsentlige forskelle er de ydre begrænsninger holdstørrelser på 100+ studerende giver, men mere væsentligt at det faglige niveau, trods alt, er højere. Her er den væsentlige didaktiske udfordring at sikre at de studerende opnår en tilsigtede læring af og fordybelse i de fysiske forhold, som udspiller sig i "legen" med forsøgene.

Litteratur

- Kittel, C. and Kroemer, H. (2000). *Thermal Physics*, 2 udg., W. H. Freeman and Company, New York.
- Mazur, E. (1997). *Peer Instruction: A User's manual*, Prentice Hall,, Upper Saddle River, New Jersey.
- Schroeder, D. V. (2000). *An Introduction to Thermal Physics*, Addison Wesley Longman, New York.

Oplæg til eksperimenter:

Tak til lektor emeritus Malte Olsen for hjælp og inspiration til udarbejdelse af forsøgene.

http://www.gfy.ku.dk/~pditlev/undervisnings_eksperimenter

Film: "Fysik på 1. klasse":

http://www.nbi.ku.dk/scienceexplorer/laes_fysik/fysik_paa_foerste_klasse/video/

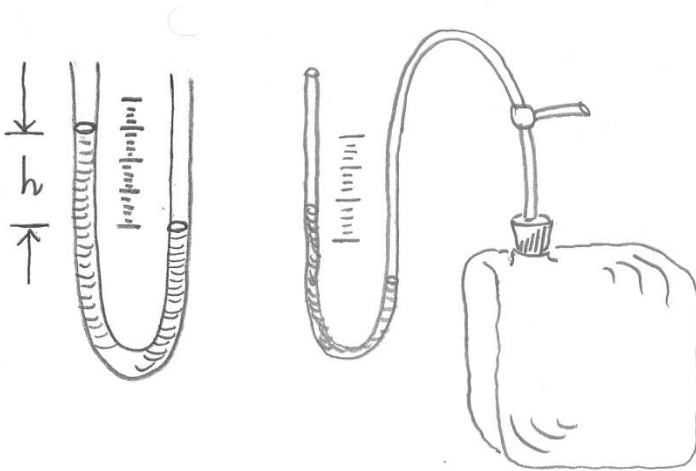
Appendix

Eksperimenter 2:

Adiabatisk process og antallet af frihedsgrader i en idealgas.

I dette eksperiment vil vi få førstehåndskendelse til adiabatisk processer. Vi vil udføre en (tilnærmelsesvis) adiabatisk proces efterfulgt af en varmeudveksling med omgivelserne. På denne måde vil vi også opnå en måling af antallet af frihedsgrader, f , i gassen som vi måler på.

Vi skal undersøge en gas (atmosfærisk luft) i en beholder (en 10 liters plastdunk). Trykket i beholderen måles ved hjælp af et U-rørsbøjlet stykke plastikslange og en målestok, som vist på figuren.



Eksperimentet består af 2 skridt:

Skridt 1 Først pustes der luft i dunken, således at der er et overtryk svarende til ca 25 cm vandsøjle. Vent så til temperaturen er udlignet og noter den nøjagtige placering af de to vandsøjler. Højdeforskellen kalder vi h_1 . Denne tilstand (1) for gassen er givet ved (p_1, V_1, T_1) . Rumtemperaturen benævnes T_0 og er altså den samme som T_1 .

1. (repetition fra sidste uge) Hvad er sammenhængen imellem trykforskellen $p_1 - p_0$ (hvor p_0 er det ydre atmosfæretryk) og højdeforskellen h_1 på de to vandoverflader i U-røret?

Vi vil nu benytte at der gælder

$$pV^\gamma = \text{konstant} \quad \text{hvor} \quad \gamma \equiv \frac{f+2}{2}$$

for en adiabatisk proces. (Som vi skal se på onsdag er $\gamma = C_p/C_V$.)

2. Udled heraf en sammenhæng imellem trykket p og temperaturen T af formen $p^x T^y = \text{konst}$ for en adiabatisk proces i en ideal gas.

Skridt 2 Nu løftes proppen af i ganske kort tid (ca 1 sekund) hvorefter proppen sættes i igen. Denne tilstand (2), lige efter at proppen er sat i er givet ved (p_2, V_2, T_2) . (Volumenet V_2 er vi ikke specielt glade for siden det inkluderer en ukendt mængde gas, som er lukket ud af beholderen).

3. Hvad er trykket, p_2 , umiddelbart efter vi har sat proppen i ?

4. Argumenter for at processen (1) \rightarrow (2) er tilnærmelsesvis adiabatisk.

5. Tror I at T_2 er større end, lig med, eller mindre end T_1 ?

6. Efter at proppen er sat i igen ændrer trykket sig, som det fremgår af de to vandsøjler, langsomt. Hvorfor?

Tilstanden (3) som opnås når vandsøjlerne ikke længere bevæger sig er givet ved (p_3, V_3, T_3) . Mål den nøjagtige placering af vandoverfladerne. Højdeforskellen kalder vi h_3 . Nu har vi målt h_1 og h_3 hvorved forsøget er fuldført!

7. Hvad er sammenhængen imellem p_2 , T_2 , p_3 og T_3 ?

8. Nu bliver det nok lidt svært. Vi vil gerne knytte målingen af h_1 og h_3 til f . Vis at

$$\left(1 + \frac{\rho g h_1}{p_0}\right)^{1-\gamma} = \left(1 + \frac{\rho g h_3}{p_0}\right)^{-\gamma}$$

Vink: Start med at bruge svaret fra pkt 2. ovenfor.

9. Det udtryk I lige har bevist skriger på at blive approximeret vha lidt matematiske tricks, for eksempel: $x^a = y \Leftrightarrow a \log(x) = \log(y)$, og endelig $\log(1+x) \approx x$ for $x \ll 1$. Læg mærke til at g og p_0 går ud i denne approximation! Undersøg i jeres aktuelle tilfælde hvor stor en fejl, der introduceres ved rækkeudviklingen af \log .

10. Hvad bliver måleresultatet for f ? Sammenlign med den teoretiske forudsigtelse og diskuter hvilke forhold og usikkerheder, der fører til eventuel forskel på målingen og den teoretiske værdi.

**Forskningslignende opgaver i biologiske og
kemiske fag**

