

SL serien

Ragnar Næss

LUFT OG STRØMNINGER



NTNU



Trondheim

Program for
lærerutdanning

Skolelaboratoriet
for matematikk, naturfag
og teknologi

NR. 6
April 2005

Tidligere utgitt i SLserien:

- Nr. 1, aug. 2003: Jan Ove Rein: **Hold og stell av vandrende pinner***
- Nr. 2, okt. 2003: Rossing, Stefansson, Bungum: **Elektronikk for skolen***
- Nr. 3, nov. 2003: Rossing, Kind: **Kreativitet og skaperglede***
- Nr. 4, aug. 2004: Rossing, Fagerli, Dinesen: **Teknologi i skolen, "Bygg et hus"***
- Nr. 5, okt. 2004: Karoliussen: **Fornybare energikilder***

LUFT OG STRØMNINGER

ISBN 82-7923-037-8

ISSN 1503-9242

Trondheim 2005

Layout og redigering: Nils Kr. Rossing

Redaktører for SLserien: Torlaug Løkensgard Hoel

Ove Haugaløkken

Sissel Mathiesen

Publikasjoner i skriftserien kan kjøpes
ved henvendelse til:

Program for lærerutdanning (PLU)

NTNU

Låven, Dragvoll Gård

7491 Trondheim

e-post: sissel.kjol.berg@plu.ntnu.no

Telefon: 73 59 19 90

Telefaks: 73 59 10 12

<http://www.plu.ntnu.no/>

Faglige spørsmål rettes til:

**Skolelaboratoriet for matematikk,
naturfag og teknologi (SL)**

NTNU

Realfagbygget, Høgskoleringen 5

7491 Trondheim

Telefon: 73 55 11 43

Telefaks: 73 55 11 40

<http://www.skolelab.ntnu.no>

Rev 2.0 - 22. april. 2005

Luft og strømninger
Et ressurs- og laboratoriehefte
Ragnar Næss

Skolelaboratoriet for matematikk, naturfag og teknologi, NTNU

Forord frå redaktørane

Læreplanane som gjeld i dag i naturfag, 2FY og 3FY, inneheld lite om aerodynamikk. Dette heftet vil gi hjelp og rettleiing til lærarar som ønskjer å gjere enkle demonstrasjonar og målingar på aerodynamikk i klasserommet. Dette kan bidra til å krydre undervisninga og til å gjere lærings situasjonen kvardagsnær og engasjerande. Tilnæringsmåttane i heftet legg vekt på at elevane skal gjere eksperimenta sjølve og er såleis ei eksemplifisering av ein induktiv framgangsmåte, i samsvar med teoriar om læring vi kjenner frå Dewey og Piaget. Den enkelte læraren må sjølv setje demonstrasjonane inn i ein fagleg samanheng.

Ove Kristian Haugaløkken Torlaug Løkensgard Hoel Sissel Wedervang Mathiesen

Forord

Innholdet i dette heftet tar utgangspunkt i det tysk lærmiddelet: “*Experimentierbox - Flug und Fliegen, Versuchsanleitung*”, levert av *Cornelsen experimenta*. Heftet er ment som et norsk ressurshefte i forbindelse med bruk av kofferten til laboratoriedemonstrasjoner. Heftet er også en hjelp til å gjennomføre elevverkstedsaktiviteter innen emnet aerodynamikk, luft og luftstrømning.

Jeg vil også benytte anledningen til å rette en takk til Førsteam. Per Morten Kind ved Inst. for Fysikk ved NTNU, som velvilligst har lånt ut vindgenerator og koffert under arbeidet med heftet.

De aller fleste bildene er tatt ved Skolelaboratoriet av forfatteren. Nils Kristian Rossing ved Skolelaboratoriet har laget alle tegningene og forsiden, og forøvrig stått for layout av heftet. Han har også lest korrektur og kommet med innspill til teksten.

Ragnar Næss
Juli 2002

Innhold

1 Innledning	11
2 Innhold i kofferten	13
3 Forsøk	17
3.1 Vindkrefter	17
3.1.1 Resultater av forsøket	17
3.2 Dynamisk oppdrift	18
3.3 Oppdrift på vingeprofil	19
3.4 Trykkforholdene i et rør med innsnevring (venurirør)	21
3.5 Registrering av trykkforskjeller	21
3.5.1 Statisk - og dynamisk trykk	21
3.5.2 Skråmanometeret	23
3.5.3 Pitotrør (pitotlogg / trykklogg , tysk: Staurohr)	24
3.6 Trukfordeling rundt vingeprofil	24
3.6.1 Obeservasjon av trykkforskjeller ved hjelp av et stykke papir	24
3.6.2 Måling av trykkfordeling ved hjelp av skråmanometer	26
3.7 Måling av oppdrift ved hjelp av komponentvekt	27
3.8 Strømningsforløp rundt vingeprofilet	29
3.9 Sammenligning av luftmotstand på forskjellige legemer	30
3.10 Måling av luftmotstand på vingeprofilet	31
3.11 Måling av strømningsmotstand	32
3.12 Strømningsforløp	33
3.13 Måling av sugekraft fra en roterende propell	35
4 Noen kommentarer til heftet	37
5 Litteraturliste	39

1 Innledning

Heftet beskriver ca. 15 ulike forsøk knyttet til aerodynamikk hentet fra det tyske læremiddelet *Experimentierbox - Flug und Fliegen, Versuchsanleitung*” levert av *Cornelsen Experimenta*. Det er gjort et utvalg som er tilpasset bruk i norsk skole.

Under forsøkene anvendes en vindgenerator og en koffert bestående av ca. 30 ulike deler. Læremiddelet er utviklet for observasjon og måling av luftmotstand og lufttrykk. Kofferten er levert av **KPT- Naturfag**.

Aerodynamikk og luftstrømning inngår ikke i pensum i hverken i 2 eller 3FY i videregående skole. Likevel kan en forsvere å vise demonstrasjoner innen emnet da forsøkene i dette heftet belyser fenomener som elevene møter til daglig. Det dreier seg om lufttrykk, luftmotstand, aerodynamisk formgivning og hva som gjør at fly kan holde seg i lufta. Emnet egner seg også godt til fordypning i forbindelse med prosjekt og gruppeoppgaver.

Flere av demonstrasjonene kan også med hell benyttes i ungdomsskolen og å gi naturfaget i Vg1 i den videregående skole et “løft”.

2 Innhold i kofferten

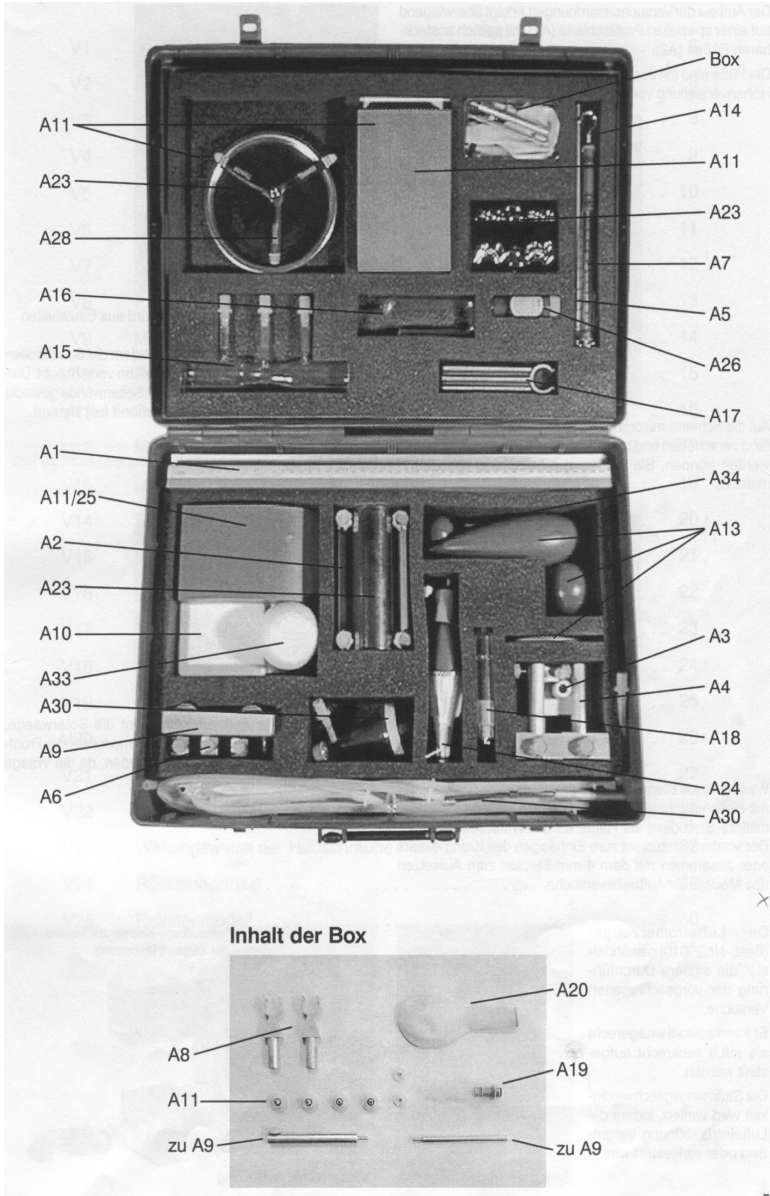
Indeksene refererer til Figur 1 på side 15.

- A1 - Profilskinne 500 mm
- A2 - Støttebein (med justerskruer) til skinna
- A3 - Stativfot 30 mm til montering på skinna (2 stk)
- A4 - Stativfot 75 mm til montering på skinna
- A5 - Stativstang 250 mm
- A6 - Dobbelmuffe (3 stk)
- A7 - Fjærvekt 22 mN
- A8 - Holdeklip 15 mm med stav (2 stk)
- A9 - Vogn med holdestaver
- A10 - Komponentvekt med solcelle
- A11 - "Oppdriftskammer" bestående av en bunnplate, 2 plast sideplater, skruer og et vingeprofil med plastmutter montert på siden
- A12 - Stativstang 100 mm
- A13 - Luftmotstand-sett med 2 skiver, en kule og et strømlinjeformet legeme
- A14 - Vimpel med stang
- A16 - Venturirør (glassrør innsnevret på midten)
- A17 - Holdeklips 25 mm med stav
- A18 - Pitotrør
- A19 - Ballongventil
- A20 - Ballong (2 stk)
- A21 - Solballong
- A22 - Varmluftsbullong
- A23 - Oppvarmingskilde
- A24 - Rakettmodell
- A25 - Vingeprofil til skråstilt styrestang
- A 26 - Fargemiddel, rødt
- A 28 - Luftpropell
- A29 - Holdestang til luftpropell
- A 30 - Byggesett for skrånometer.

A 31 - Kunststoffkule

A 32 - Isoporkule

A 33 - Silikonolje



Figur 1 Innhold av kofferten

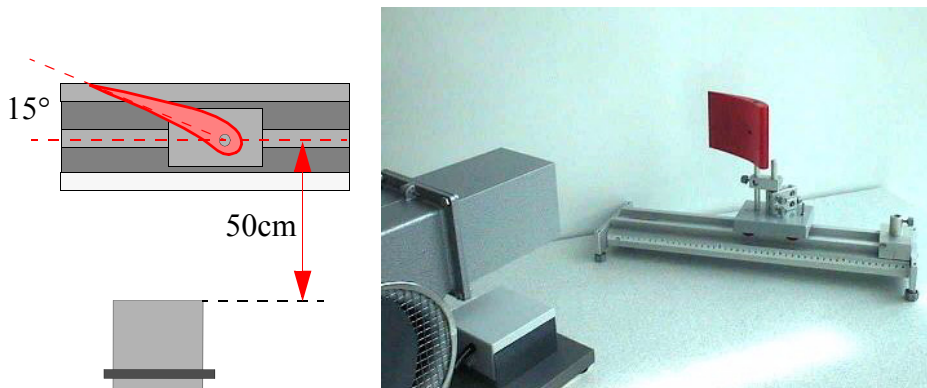


Figur 2 Vindgeneratoren..

3 Forsøk

3.1 Vindkrefter

Still vindgeneratoren slik at luftstrømmen danner en rett vinkel med skinna hvor vogna er plassert. La vingeprofilet danne en vinkel ca 15° med vogna. La vifta sende luftstrømmen omtrent vinkelrett inn mot skinna. Avstanden mellom vifta og skinna skal være ca. 50 cm. Øk luftstrømmen gradvis og observer hva som skjer. Legg litt ballast på vogna slik at den "ikke blåser av sporet".

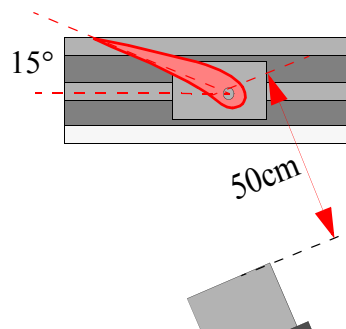


Figur 3 "Seilet" plassert på vogna (bruk ballast).

3.1.1 Resultater av forsøket

Luftstrømmen endrer retning når den treffer vingeprofilet, og dermed oppstår en kraftvirkning fra vingen ("seilet") på luftmolekylene. I følge Newtons 3. lov, vil det da virke en like stor kraft fra luftmolekylene på seilet. Det er dermed en komponent av denne krafta som er årsak til bevegelsen av vogna.

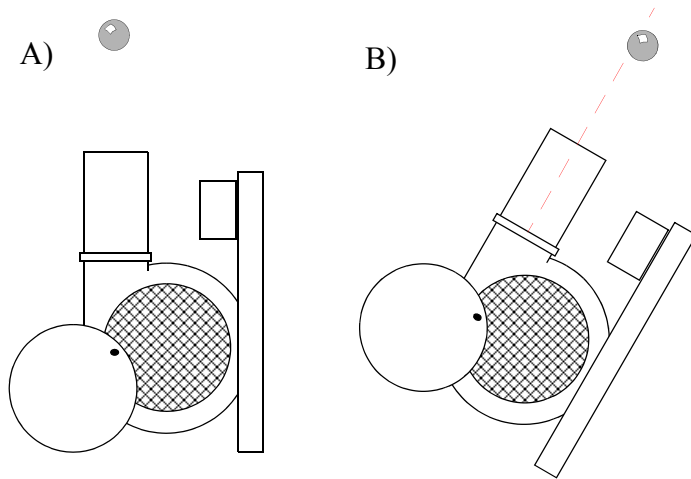
Still skinna litt på skrå i forhold til luftstrømmen, se figur 4. Oppgaven er nå å få vogna til å seile i motvind, men regn med en del prøving og feiling før du får det til. Forklaringen på fenomenet er den samme som nevnt ovenfor.



Figur 4 Oppstilling med skråstilt vogn.

3.2 Dynamisk oppdrift

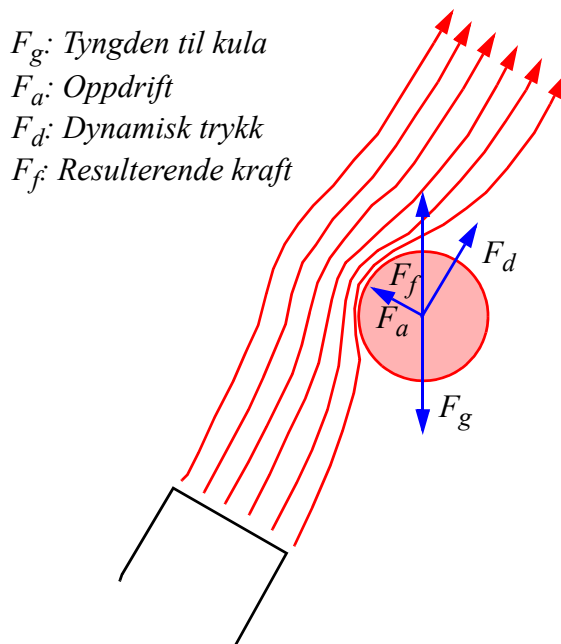
Sett vindgeneratoren loddrett, se Figur 5 A. Legg isoporkula midt på laminatorgitteret. Øk luftstrømmen langsomt til kula svever ca. 50 cm over gitteret.



Figur 5 Forsøk med dynamisk oppdrift.

Skråstill gradvis vindgeneratoren, og observer hva som skjer med isoporkula, se figur 5 B.

Kula forblir svevende selv om luftstrømmen skrånstilles. Dette forsøket demonstrerer dynamisk oppdrift. Luftstrømmen får større hastighet på den siden av isoporkula som ligger nærmest midtaksen av luftstrømmen. Trykket blir da mindre på denne sida, og vi får en kraftvirkning på tvers av luftstrømmen, noe som forklarer at kula holdes på plass og ikke faller ned (jfr. Bernullieffekten som omtales i avsnitt 3.5).

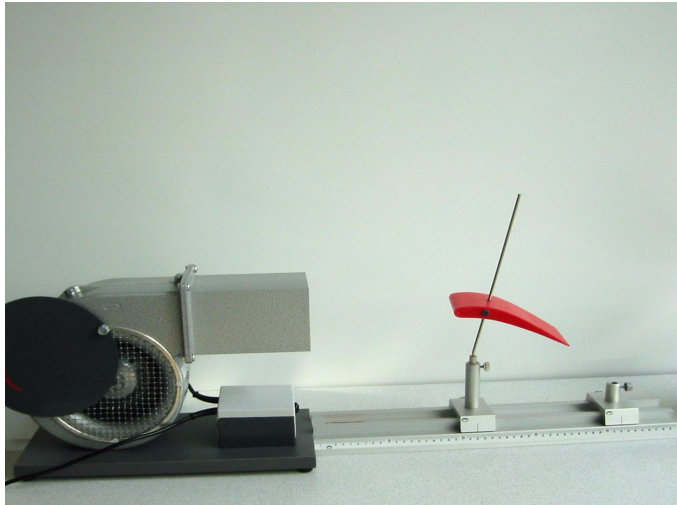


Figur 6 Bernullieffekten, kula får en dynamisk oppdrift.

3.3 Oppdrift på vingeprofil

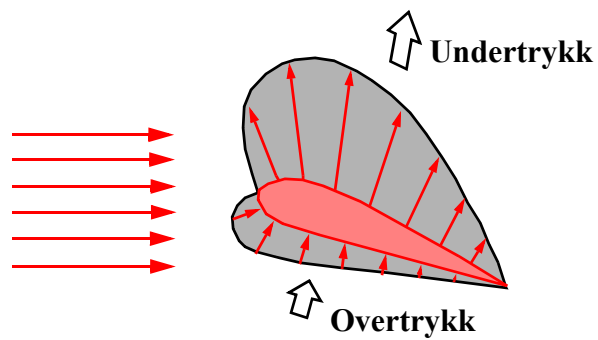
Plasser vingeprofilet i holderen som vist på figur 7. vingeprofilet skal ha en vinkel på ca. 30° i forhold til luftstrømmen. Avstanden fra profilet til gitteret på vindgeneratoren, skal være ca. 25 cm.

Smør silikon på stålpinnen slik at friksjonen mellom pinnen og profilet blir så liten som mulig. Observer det som skjer.



Figur 7 Vingeprofil plassert i luftstrømmen.

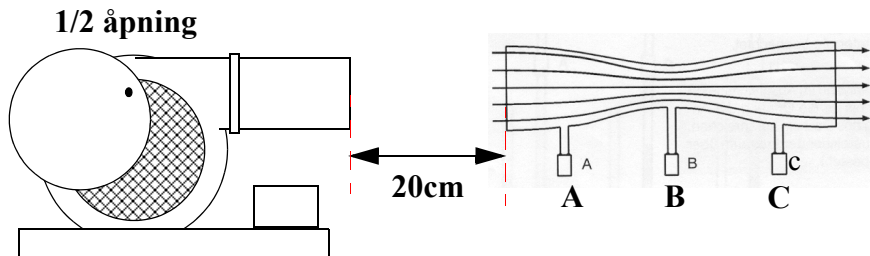
Legg altså merke til at det er *undertrykket over vingen* som er den viktigste årsak til kraftvirkningen oppover, se figur 8.



Figur 8 Trykkforholdene rundt vingeprofilet.

3.4 Trykkforholdene i et rør med innsnevring (venurirør)

Plasser glassrøret foran vindgeneratoren som vist på figur 9. La avstanden være ca 20 cm. Slå på vindgeneratoren, og mål lufttrykket i punktene A, B og C ved hjelp av vannmanometrene (3 stk U-formede glassrør). Gjør forsøket med 1/3-, 1/2 - og 1/1 (hel) åpning av luftinntaket på vindgeneratoren.



Figur 9 Venturirøret plassert foran vindgeneratoren.

Bedre registreringer kan gjøres ved hjelp av et skrå manometer som omtalt i avsnitt 3.5.2.

3.5 Registrering av trykkforskjeller

I dette avsnittet skal vi se på ulike metoder for måling av trykkforskjeller.

3.5.1 Statisk - og dynamisk trykk

Mikroskopisk kan lufttrykk forklares som summen av de impulsene som molekylene overfører ved sammenstøtet med en overflate. Det kan vises at lufttrykket er proporsjonalt med produktet av molekylenes middelhastighet og molekyltettheten.

Når både temperatur og trykk avhenger av molekylenes gjennomsnittlige hastighet, skulle vi kanskje tro at oppvarming av luft (økt molekylhastighet) alltid medfører økt trykk slik tilfellet er når lufta varmes opp i en lukket beholder. Hvis oppvarmingen derimot skjer i friluft, vil hastigheten til molekylene øke som før, og de vil støte oftere mot hverandre. Siden volumet ikke må være konstant i friluft, vil molekylene spres, noe som medfører at tettheten reduseres og trykket forblir uendret.

Ser vi på luft som passerer forbi en flyvinge, vil vi med ovenstående i tankene, kunne tolke molekylenes bevegelse på to måter:

1. På et **mikroskopisk** nivå beveger luftmolekylene seg fritt rundt. Noen ganger treffer de hverandre, andre ganger flykroppen.
2. På et **makroskopisk** nivå glir de forbi flykroppen.

Med dette som bakgrunn skal vi se nærmere på det som kalles **venturi-effekten**.

Massen av en gitt porsjon strømmende luft er konstant. Det kan altså ikke skapes eller fjernes luftmasse i en luftstrøm. Beveger en luftmasse seg gjennom et rør med varierende diameter, vil massen av luft som passerer i et tverrsnitt av røret være lik og uavhengig av om røret er vidt eller innsnevret. Skal dette være mulig må luften strømme raskere gjennom den innsnevrete delen av røret enn gjennom den vide delen.

Dette gjelder selvsagt ikke bare for luft, men for alle *fluider*. Hvis fluidets hastighet er v , kan vi matematisk sette opp *kontinuitetsligningen*:

$$A v \rho = \text{konstant} \quad (3.1)$$

hvor:

$A = \text{et vilkårlig tverrsnitt i røret,}$

$\rho = \text{lufttettheten}$

$v = \text{hastigheten}$

Under forutsetning av at ρ ikke endres kan ligning (3.1) skrives:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (3.2)$$

Dersom det strømmer luft gjennom et rør hvor rørets tverrsnittsareal er innsnevret til det halve, vil lufthastigheten fordobles gjennom innsnevringen. Dette gjelder også enhver gass eller væske.

En luftmengde i jevn bevegelse med hastighet v , har en *bevegelsesenergi*, E (kinetisk energi), som er proporsjonal med kvadratet av hastigheten v :

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.3)$$

hvor m er massen av luftmengden.

Den samme luftmassen har også potensiell energi. Størrelsen av denne er knyttet til lufttrykket. Under forutsetning av at temperaturen ikke forandrer seg, er summen av de to energitypene konstant for luftmassen.

Bevegelsesenergien i den strømmende luftmengden, er et direkte uttrykk for det *dynamiske trykket* (q), mens den potensielle energien er knyttet til det *statiske trykket* (p). Sammenhengen uttrykkes i Bernoullis ligning:

$$\text{dynamisk trykk} + \text{statisk trykk} = \text{konstant} \quad (3.4)$$

eller

$$q + p = \text{konstant} \quad (3.5)$$

I innsnevringen av røret, hvor luften beveger seg raskere, vil det dynamiske trykket være større enn i andre deler av røret. Det betyr at det statiske trykket er blitt tilsvarende mindre, da Bernoullis ligning sier at summen av de to trykkene skal være konstant i et hvert tverrsnitt av røret.

Slik vil det være når luft beveger seg gjennom røret. Situasjonen vil imidlertid være den samme dersom var røret som fløy gjennom luften, og ikke luften som strømmet mot et fastmontert rør.

Forutsetningene for ovennevnte sammenheng er at :

- lufta kan ikke komprimeres (denne forutsetningen holder for hastigheter under ca. 300 knop).
- luftstrømmen er jevn.
- temperaturen er konstant.

Figur 10 gir en mer inngående forklaring på hvordan Bernoullis ligning gjør det mulig å beregne farten, v_1 , på grunnlag av trykkforskjell Δp og kjennskap til tverrsnittene A_1 og A_2 til røret.

Venturirør

Bernoulliligningen for $y = \text{kont.}$:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

Kontinuitetsligningen:

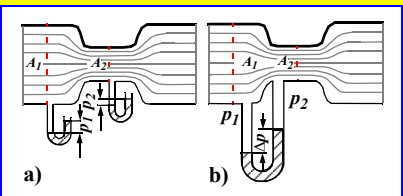
$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \Rightarrow v_2 = A_1 \cdot v_1 / A_2$$

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 \left(\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right)$$

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot \Delta p / \left(\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right) \cdot \rho}$$

Venturirør

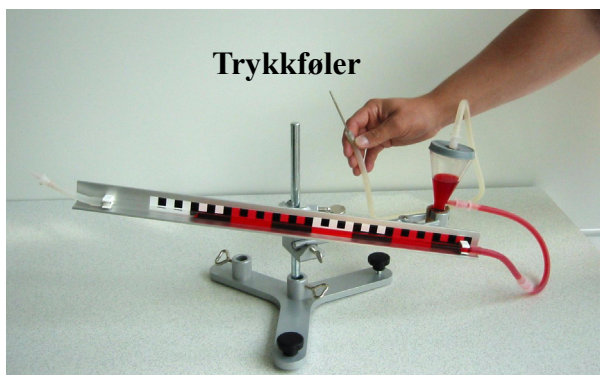
Måling av differansetrykket ved A_1 og A_2 gir oss muligheten til å beregne hastigheten v_1 til luftstrømmen



Figur 10 Bernoullis ligning og Venturirør.

3.5.2 Skråmanometeret

En enkel trykkmåling kan gjøres ved hjelp av et skråmanometer som monteres opp som vist på figur 11. Som trykkføler brukes metallrøret som er festet i enden av plastslangen.



Figur 11 Måling av trykkforskjeller med skråmanometer.

Trykkforskjellen registreres ved å observere hvordan den skråstilte vannsøylen flytter seg langs måleskalaen.

3.5.3 Pitotrør (pitotlogg / trykklogg , tysk: Staurohr)

Røret brukes til å måle trykk i strømmende væsker og gasser, men kan også brukes til å måle farten på skip og fly. Røret kalles da *pitotlogg* eller *trykklogg*. Røret ble oppfunnet av den franske fysiker Henri Pitot.

Røret festes på et stativ ca. 15 cm fra vindgeneratoren, slik som venturirøret. Pitotrøret skal stå med den avrundede enden (det røde røret) mot luftstrømmen.

Trykkregistreringen skal gjøres i punktene 1 og 2 som vist på Figur 12. Sammenlign det statiske trykket (trykket når lufta er i ro), og vindtrykket.

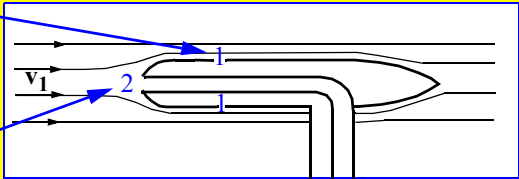
Praktisk trykklogg

Måling av trykkdifferansen mellom vindtrykk og statisk trykk

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2$$
$$v_1 = \sqrt{2 \cdot \Delta p / \rho}$$

$p_1 =$ statisk trykk

$p_2 =$ vindtrykk



Figur 12 Pitotrør for måling av trykk i strømmende væsker og gasser.

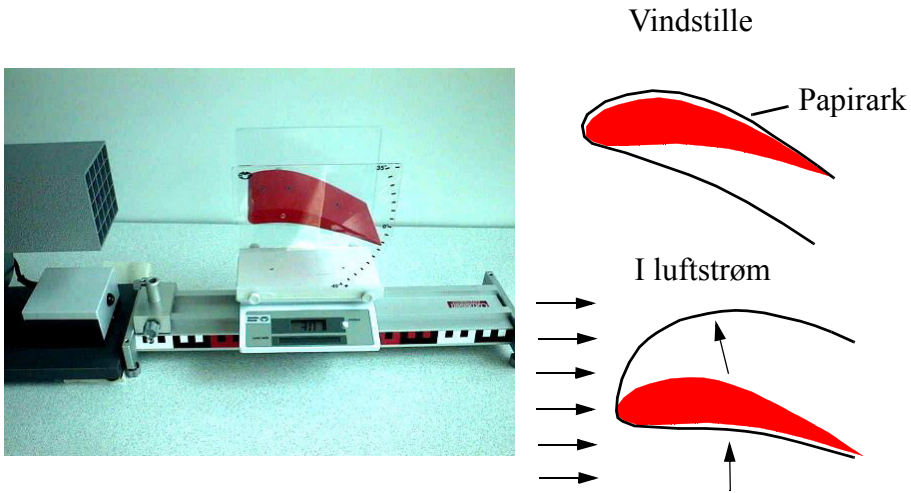
3.6 Truikkfordeling rundt vingeprofil

I dette avsnittet skal vi studere trykkfordelingen rundt et vingeprofil.

3.6.1 Obeservasjon av trykkforskjeller ved hjelp av et stykke papir

Sett sammen ”boksen” med bunnplate og de to plastsideveggene og monter vingeprofilet med en vinkel på ca. 20°. Plasser profilet i boksen og la det være en avstand på ca. 30 cm til vindgeneratoren. Klipp til et stykke papir og legg over profilet slik som vist på figur 13. Beskriv hva du observerer når luftstrømmen settes på.

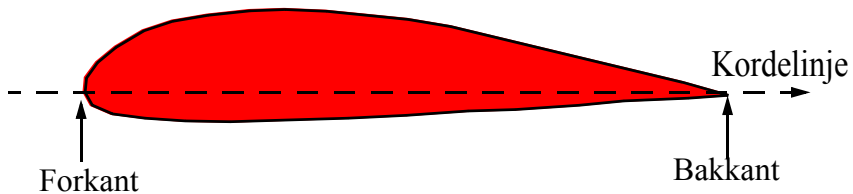
Papiret løftes altså på oversiden av vingen når luftstrømmen settes på.



Figur 13 Et papirark viser hvordan trykket over og under vingen endrer seg i en luftstrøm.

Vi ønsker at kraften på en flyvinge eller et vingeprofil skal være rettet oppover. En slik kraft oppnår vi når det oppstår en trykkforskjell mellom over- og undersiden av profilet. Luften som beveger seg omkring vingeprofilet vil nær overflaten av vingen få lengre vei enn luft som passerer i stor avstand. Når lufthastigheten økes, faller det statiske trykket (se avsnitt 3.5). Hvis luftstrømmen omkring vingeprofilet tvinges til å strøme raskere over profilet enn under, så vil det statiske trykket falle mest på oversiden. Trykkforskjellen mellom vingeprofilets underside og overside gir derfor en oppadrettet kraft (oppløft).

Et klassisk vingeprofil kan se ut som vist på figuren nedenfor. Den rette linjen gjennom profilets forkant og bakkant kalles for kordelinjen. Avstanden fra profilets forkant til bakkant er korden. Forkanten (engelsk: leading edge) er det punktet foran på profilet hvor krummingen er minst.

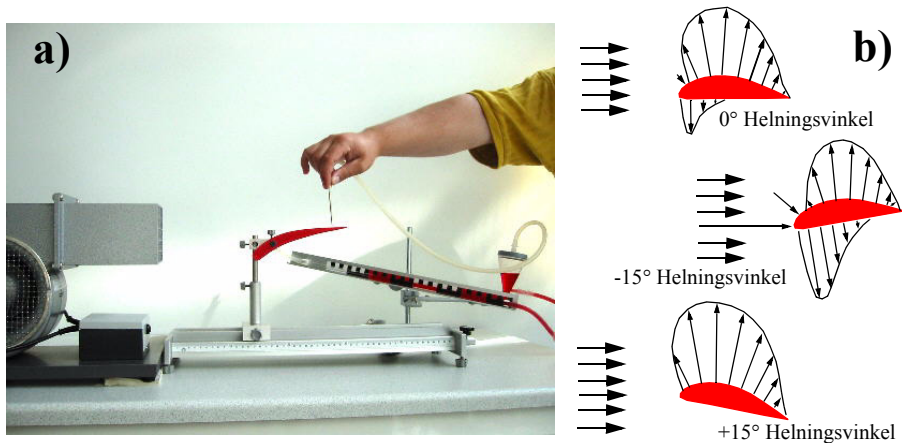


Selv med en vinkel på 0° (mellom kordelinje og bevegelsesretningen) vil det statiske trykket være mindre over vingen enn under vingen.

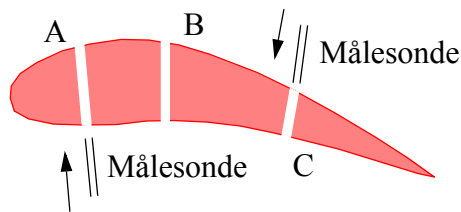
3.6.2 Måling av trykkfordeling ved hjelp av skråmanometer

Skrue en bolt inn i siden på vingeprofilet. Plasser vingeprofilet ved hjelp av et stativ som monteres på skinna. Bruk dobbelmuffe slik at det er lett å regulere vinkelen mellom vingeprofilet og luftstrømmen. La avstanden til vindgeneratoren være ca. 15 cm og kjør maskinen med full åpning i luftinntaket. Bruk skråmanometeret til trykkavlesninger over og under vingen i målepunktene *A*, *B* og *C* (se figur 15). Vi merker oss at målesonden registrerer trykket på **oversiden av vingen når vi stikker den inn fra undersiden**, og motsatt når målesonden stikkes inn fra undersiden.

Ta målinger ved 3 forskjellige vinkler mellom profil og luftstrøm. Samlet oppdrift på vingeprofilet er direkte knyttet til trykkforskjellene over og under profilet (jfr. $\Delta F = \Delta p \cdot A$). Som det framgår av figur 14, så er kraftvirkningen svært avhengig av hellningsvinkelen til vingeprofilet.



Figur 14 Måleoppstilling a) og trykkfordeling over og under vingen, som funksjon av hellningsvinkelen b).



Figur 15 Hull i vingeprofilet gjør det lettere å måle trykkforskjeller over og under vingen på samme sted.

Gjennomfør målingene og før resultatene inn i tabellen under.

Tabell 1: Trykk som funksjon av hellingsvinkel på vingeprofil.

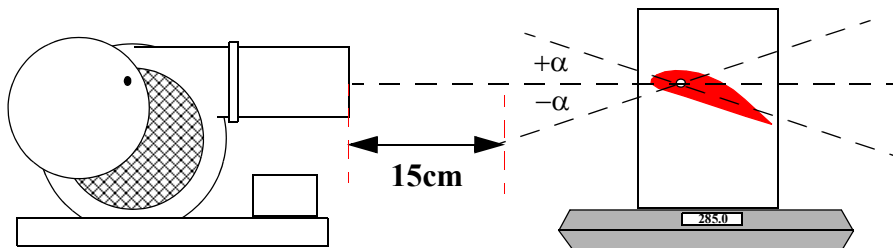
Målepunkter		Oppstillingsvinkel		
		-15°	0°	+15°
Trykk på oversiden - måles fra profilets underside - Figur 15	A			
	B			
	C			
Trykk på undersiden måles fra profilets underside - Figur 15	A			
	B			
	C			

Hva er konklusjonen på målingene?

3.7 Måling av oppdrift ved hjelp av komponentvekt

Plasser vingeprofilet (montert i "boksen") på den medfølgende vekta. Vekta må ha belysning da den er drevet av solceller. Avstanden mellom profil og vindgenerator kan være ca. 15 cm. Luftinntaket skal i første forsøk være halvåpent.

G_1 er tyngden i stillestående luft, mens G_2 er tyngden vi måler når vinden settes på.



Figur 16 Måling av oppdrift.

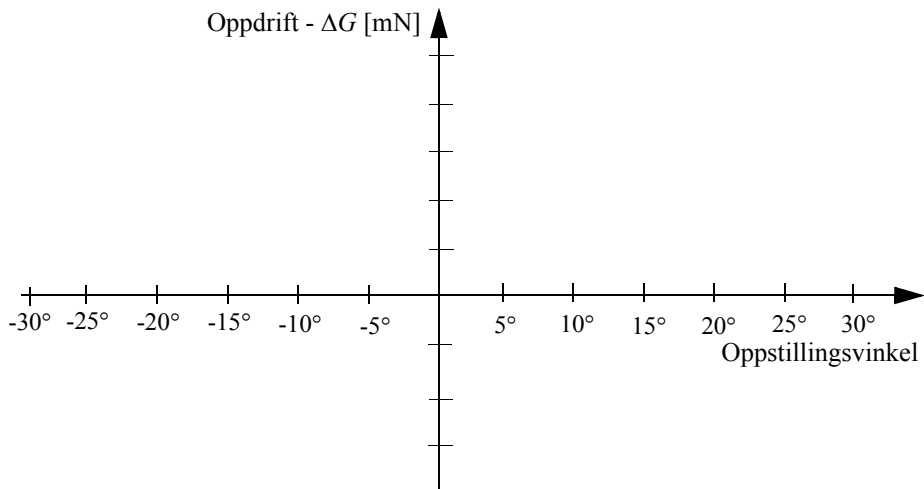
Gjennomfør målingene med full og halv åpning. Skriv resultatene inn i tabellene under.

Tabell 2: Måling av tyngden med halv åpning av luftinntaket.

$\alpha (^{\circ})$	-30	-25	-20	-15	-10	0	+10	+15	+20	+25	+30
G_1											
G_2											
$\Delta G = G_2 - G_1$											

Tabell 3: Måling av tyngden med full åpning av luftinntaket.

$\alpha (^{\circ})$	-30	-25	-20	-15	-10	0	+10	+15	+20	+25	+30
G_1											
G_2											
$\Delta G = G_2 - G_1$											

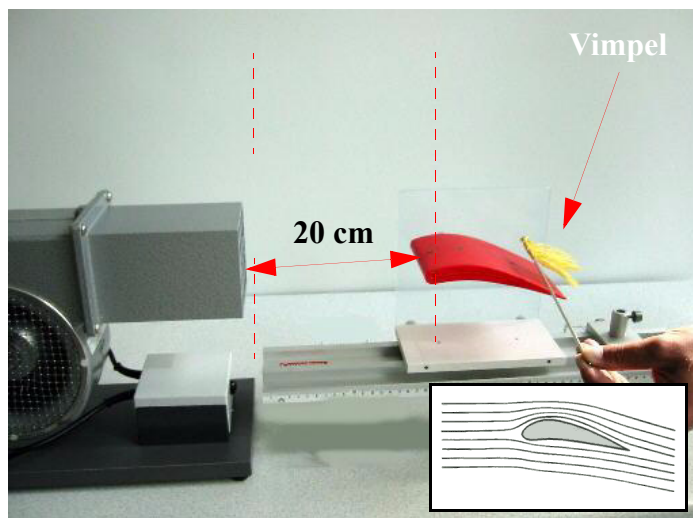


Figur 17 Oppdrift som funksjon av oppstillingsvinkel.

Lag et koordinatsystem med oppstillingsvinkel langs 1.-akse og ΔG langs 2.-akse som vist figur 17. Bruk gjerne mm-papir. Plasser målpunktene inn i koordinatsystemet og trekk opp grafene. Lag en tolkning på grunnlag av grafen.

3.8 Strømningsforløp rundt vingeprofilet

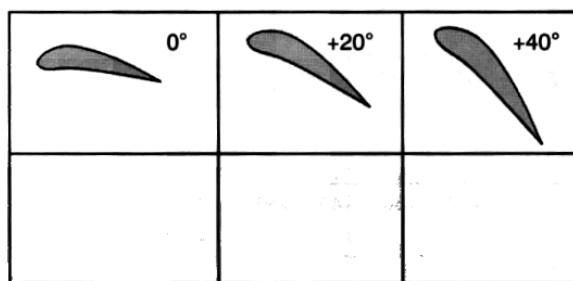
Plasser profilet i boksen, men skru av den ene av veggene slik at dere lettere kommer til med *trådvimpelen*. La profilet få ulike vinkler i forhold til luftstrømmen (vist på den innfelte tegningen i figur 18).



Figur 18 Måling av strømningsforløp rundt et vingeprofil.

Bruk en avstand på ca. 20 cm til vindgeneratoren. Observer hvordan vimpelen beveger seg i de ulike posisjonene, se figur 18, og legg merke til når det oppstår turbulens i trådvimpelen.

Skisser ”fasong” for trådvimpelen ved de ulike vinklene.



Figur 19 Fasongen på trådvimpelen.

3.9 Sammenligning av luftmotstand på forskjellige legemer

Skru støtteføttene fast til profilskinna og fest stativføtter i begge endene på skinna (se figur 20).

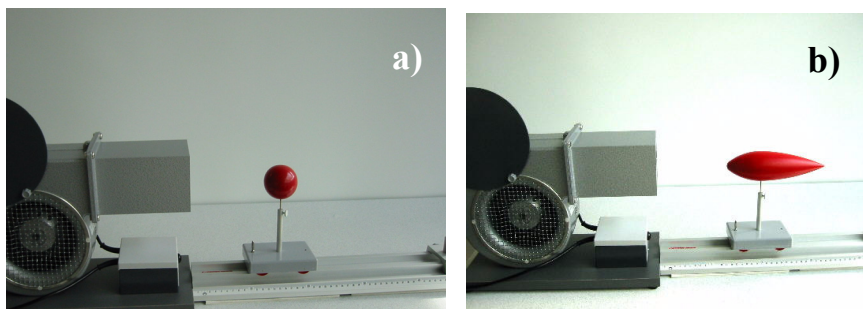
Skru fast holdestaven midt på vogna ved hjelp av klemmeskruen. Fest kula til staven. La vindgeneratoren stå helt inn til profilskinna. Plasser vogna tett opp til vindgeneratoren og hold den fast når luftstrømmen settes på. Slipp deretter vogna og observer hvordan den beveger seg bortover skinna.

Deretter byttes kula ut med det strømlinjeformede legemet slik at det står i sentrum av luftstrømmen. Slå på vindgeneratoren og observer hva som skjer når vogna slippes.

Hvilket legeme får størst fartsøkning?

Hva betyr dette?

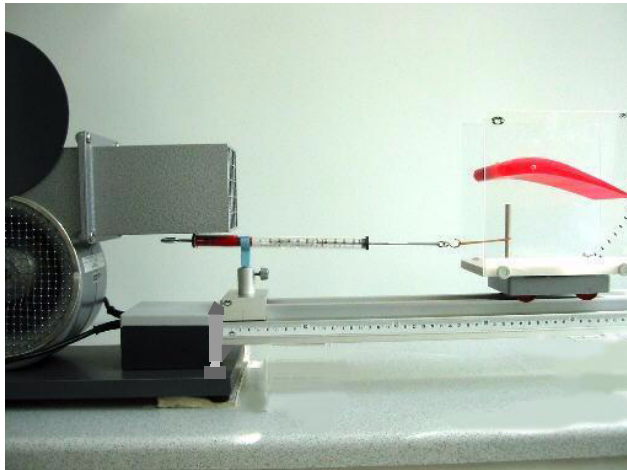
Merk deg at tverrsnittet er akkurat det samme for de to legemene.



Figur 20 Kvalitativ observasjon av vindmotstand, a) kule, b) dråpeformet..

3.10 Måling av luftmotstand på vingeprofilet

Fortsatt samme oppstilling med bruk av fjærvekta, men plasser vingeprofilet med en sidevegg på vogna i stedet for luftmotstandssettet (se fig).



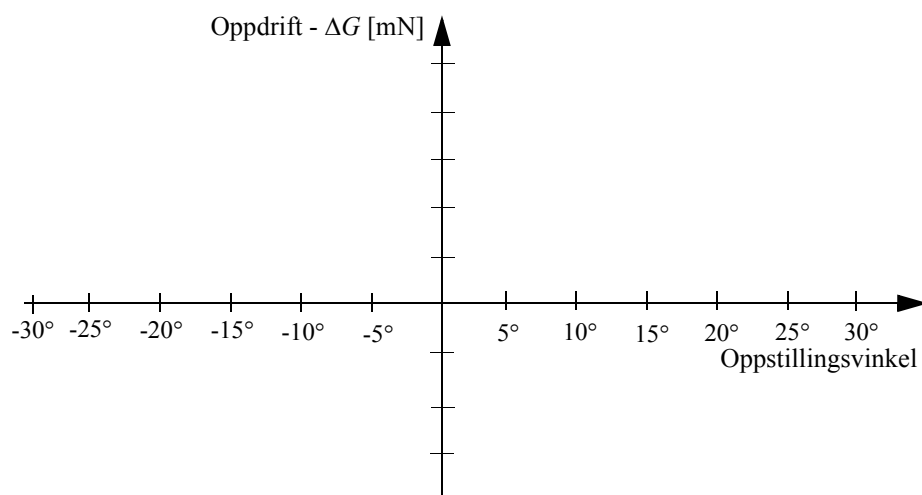
Figur 21 Måling av luftmotstand, kvantitativ måling.

Vingeprofilet skal så dreies i ulike vinkler i samsvar med tabellen nedenfor hvor du altså skal skrive inn kraftvirkningen på fjærvekta. Klaffen i vindgeneratoren skal først være halvåpen. Dette vil gi en luftstrøm på ca. 8 m/s. Deretter foretar du de samme målinger med 2/3 åpning som gir ca. 11 m/s på luftstrømmen.

Tabell 4: Måling av luftmotstand, kvantitativ måling.

α ($^{\circ}$)	-30	-25	-20	-15	-10	0	+10	+15	+20	+25	+30
8 m/s											
11 m/s											

Plott resultatet av begge målingene inn i diagrammet under



Figur 22 Måling av luftmotstand som funksjon av helningsvinkel.

3.11 Måling av strømningsmotstand

Bruk vogn og fjærvekt som i forsøk 12 sammen med utstyret i forsøk 11. Fest fjærvekta til den ene støttefoten (nærmest vindgeneratoren) ved hjelp av en holdeklip (A 8). Fest kroken på fjærvekta til vogna ved hjelp av en liten tråd. Vogna bør stå ca. 15 cm fra åpningen på vindgeneratoren. La klaffen på vindgeneratoren være 2/3 av full åpning (lufthastigheten vil da være ca 11 m/s).

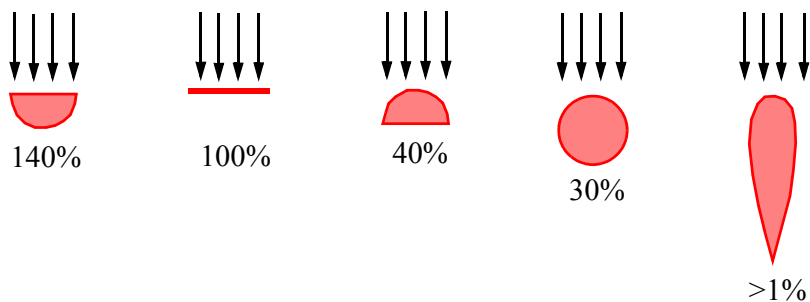
Monter de ulike profilene i luftstrømmen og les av kraften på fjærvekta:

1. Flat rund skive.
2. Kule.
3. Strømlinjeformet legeme.
4. Halvkule.

Tabell 5: Måling av vindmotstand med ulike profiler.

α ($^\circ$)	Flat rund skive	Kule	Halvkule	Strømlinjeformet
8 m/s				
11 m/s				
Full åpning				

Til slutt kan du bruke full åpning og gjøre tilsvarende sammenligninger
Regn ut og sammenlign med tallene som er angitt i figur 23.

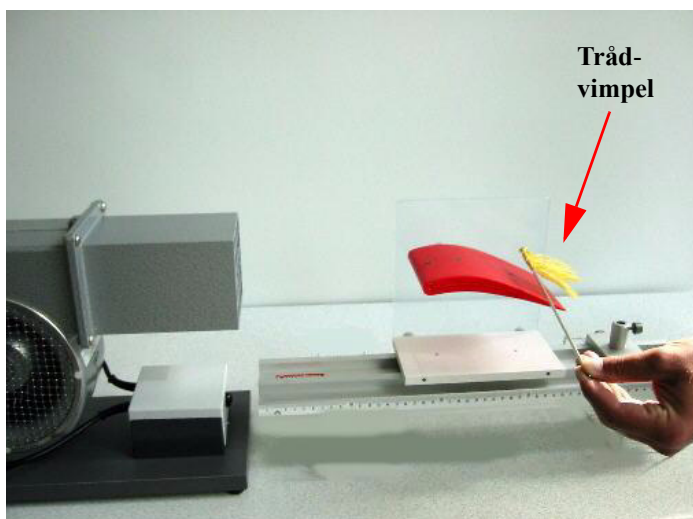


Figur 23 Relativ vindmotstand for ulike profiler.

3.12 Strømningsforløp

Du skal nå ved hjelp av trådvimpelen gjøre observasjoner av hvordan lufta beveger seg *foran*, *over* og *bak* :

- a) sirkelformet plate (den med størst diameter),
- b) kula og
- c) strømlinjeformet legemet.

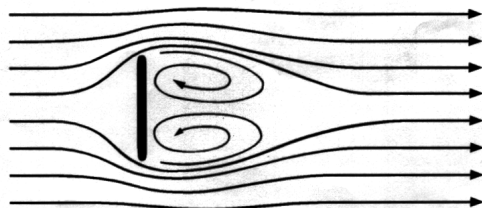


Figur 24 Registrering av strømningsforløp.

Plasser de nevnte legemene i et stativ på profilskinna. La avstanden være ca 20 cm fra gitteret på vindgeneratoren. Gi full åpning på luftinntaket.

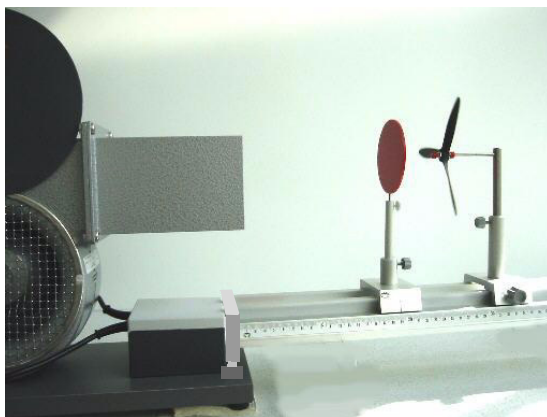
Lag skisser som viser hvordan vimpelen stiller seg i de ulike posisjonene.

I Figur 25 ser du et skjematisk bilde av hvordan det danner seg en virvel på baksida av sirkelflata. Denne kan påvises best når du bruker den største sirkelflata og altså holder vimpelen på baksiden av plata.



Figur 25 Luftstrøm bak den runde flate skiva.

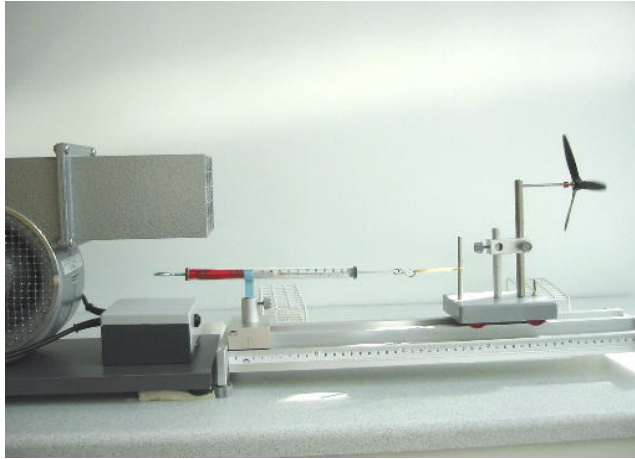
En annen måte å påvise virvelen er ved bruk av luftpropellen. Denne må festes i eget stativ på skinna. Prøv ut hvordan propellen beveger seg i luftstrømmen. Når sirkelflata plasseres foran propellen vil du kunne se at den dreier i motsatt retning. Prøv deg fram.



Figur 26 Registrering av luftstrømmen bak sirkelformet skive ved hjelp av propellen.

3.13 Måling av sugekraft fra en roterende propell

Propellen monteres på vogna. Fjærvekta festes til vogna som vist på Figur 27. Den kinetiske energien i lufta fører til en rotasjon i propellen. Rotasjonsenergien i propellen medfører at det oppstår en sugekraft som vi altså måler ved hjelp av fjærvekta. Dersom du stopper propellen vil kraften opphøre.



Figur 27 Måling av sugekraft fra roterende propell.

4 Noen kommentarer til heftet

Heftet er ment som veiledning til den som ønsker å bruke kofferten til å gjøre enkle demonstrasjoner og målinger på aerodynamikk i klasserommet. Den enkelte lærer må selv sette demonstrasjonene inn i en faglig sammenheng.

Pr. i dag inneholder læreplanene i naturfag , 2FY og 3FY lite eller ingenting om aerodynamikk. De nevnte demonstrasjonene vil derfor komme som litt ekstra krydder for den interesserte elev. Det anbefales derfor å trekke fram eksempler knyttet til hverdagsfenomener, som elevene har erfaringer med.

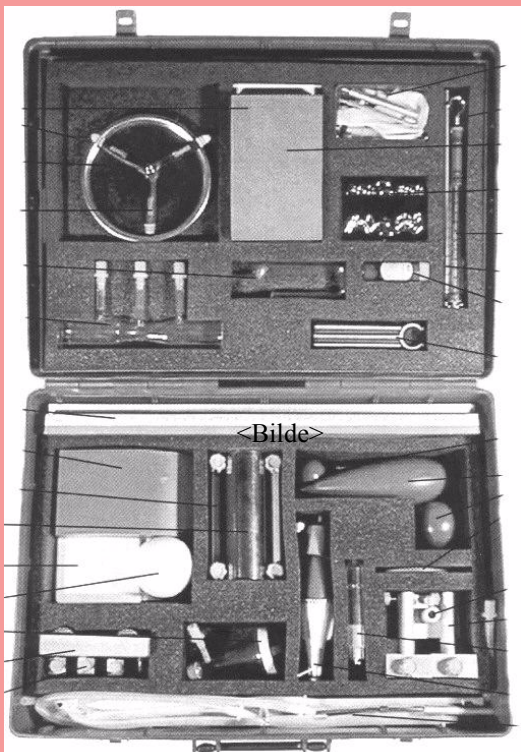
Noen av forsøkene har tydelig vist at luftmotstand er svært avhengig av formen på legemet. Dette bør kunne settes inn i en sammenheng med energiforbruk til ulike legemer som skal bevege seg gjennom luft, som f.eks. alpinløpere, motorsykler, biler, tog, fly osv.

I referanse [2] finnes en lang rekke problemstillinger samt en mengde referanser til litteraturen: I lista under henvises til noen relevante problemstillinger knyttet til aerodynamikk. Tallene i parentes henviser til avsnittet hvor fenomenet omtales.

- *Bomerang (2.55).*
- *Bernoulli effekten (3.31).*
- *Hvordan sitte som skihopper, utforkjører for å oppnå minst mulig luftmotstand (4.95).*
- *Hvordan virker drager, deltavinger, kassedrager (4.99).*

5 Litteraturliste

- [1] Cornelsen Experimenta,
“Experimentierbox - Flug und Fliegen - Versuchsanleitung”
- [2] Jearl Walker, “The Flying Circus of Physics”, Science 1977, ISBN 0-471-02984-x



Hftet beskriver ca. 15 ulike forsøk knyttet til aerodynamikk. Under forsøkene anvendes en vindgenerator og en koffert bestående av ca. 30 ulike deler. Utstyret er tilrettelagt for observasjon og måling av luftmotstand og lufttrykk. Kofferten er levert av KPT-Naturfag.

Forsøkene er i første rekke beregnet for demonstrasjoner i 2FY og 3FY i videregående skole, men kan med hell benyttes også i ungdomsskolen og i naturfag grunnkurs i videregående skole for å gi undervisningen et løft.

Innholdet i dette heftet tar utgangspunkt i et tysk hefte som følger kofferten: "*Cornelsen experimenta*". De aller fleste bildene er tatt ved Skolelaboratoriet av forfatteren.

Lektor Ragnar Næss
Skolelaboratoriet, NTNU
Ole Vig Videregående skole, Stjørdal

Skolelaboratoriet har som oppgave å drive forsknings- og utviklingsarbeid rettet mot undervisning i realfag og teknologi i skolen. Gjennom SLserien vil PLU og Skolelaboratoriet publisere resultatene av dette arbeidet.

NTNU



Trondheim

Program for lærerutdanning

Skolelaboriet
for matematikk, naturfag
og teknologi

Tlf. 73 55 11 42

Faks 73 55 11 40

<http://www.skolelab.ntnu.no>