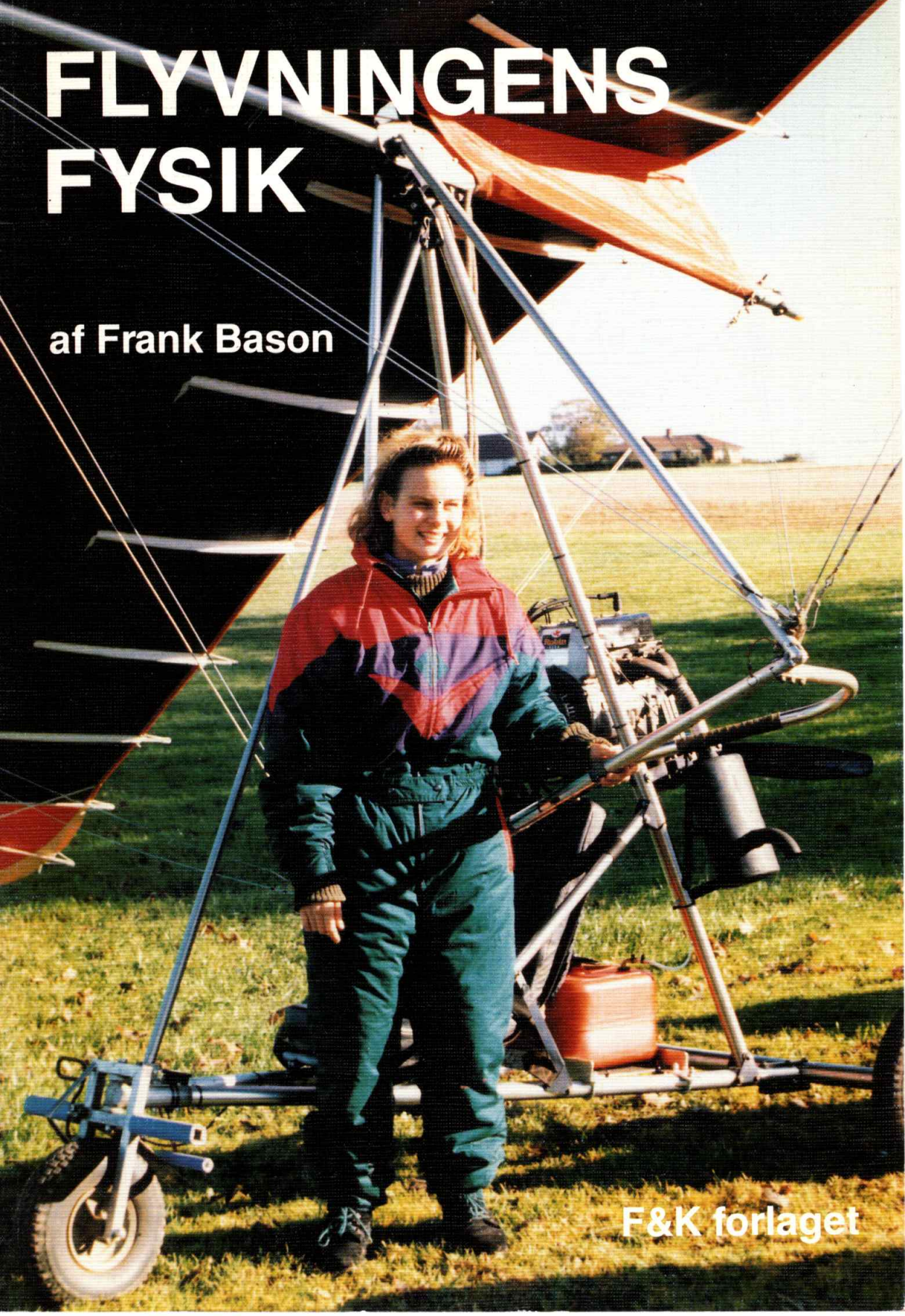


FLYVNINGENS FYSIK

af Frank Bason



F&K forlaget

Flyvningens fysik

Frank Bason

F&K forlaget

FLYVNINGENS FYSIK

af Frank Bason

© F&K Forlaget
Slotsgade 2³
2200 København N

Omslag og sats: Silkeborg SolData
Tegninger: Gunnar Pedersen
Tilrettelæggelse: Kai Gregersen
Trykt hos Budolfi Tryk, Aalborg

Mekanisk, fotografisk eller anden gengivelse
af denne bog eller dens enkelte dele er
ikke tilladt uden lovlig hjemmel.

ISBN 87-87229-52-8

1. udgave 1990

Omslag: *På forsidebilledet ses naturfagselev Betina Rachlitz Madsen, Søhøjlandets UltraLight Club, Silkeborg, med et motoriseret dragefly, som hun har lært at flyve.*

Indledning

Formålet

Formålet med dette temahæfte er at præsentere dig for nogle vigtige begreber fra fysikken ved at fortælle lidt om flyvning. På denne måde kan vi opfylde bekendtgørelsens krav til en hel del af den mekaniske fysik i kernestoffet. Heri indgår bl.a. følgende begreber fra bevægelseslære:

- *lineær bevægelse*
- *jævn hastighed*
- *konstant acceleration*
- *kraft og masse*
- *Newtons love*

Når du har arbejdet temahæftet igennem, bør du beherske disse begreber så godt, at du er i stand til at regne mange eksamensopgaver, og – endnu vigtigere – at bruge dem til at løse praktiske opgaver. Desuden kræver forståelse af, hvordan et fly flyver, at vi arbejder lidt med begreberne *kraftmoment* og *jævn cirkelbevægelse*, emner som du først vil få lejlighed til at fordybe dig i, hvis du læser fysik på højt niveau. Temahæftet er nok lettest at arbejde med, når du har haft matematik i mindst et halvt år på gymnasiet. Du skal bruge din viden om elementær geometri og ligninger.

Flyvning er et fænomen fra *den nære omverden*, som kan forklares på fysisk grundlag. Desuden vil du lære om flyvning som et eksempel på en konkret anvendelse af fysikkens resultater og metoder inden for *teknik*. Her er også et eksempel på en teknologi, som har haft enorm betydning for samfundsudviklingen – både for udviklingen inden for enkelte lande og for verdenssamfundet.

Charles Lindbergh, som i 1929 var den første pilot, der fløj alene over Atlanter-

havet fra New York til Paris, havde en drøm om, at den kommercielle luftfart kunne bringe en forbedret mellemfolkelig forståelse. Billig kommunikation og transport har givetvis medvirket til at gøre verden mindre, og dette er ikke mindst luftfartens fortjeneste.

Naturligvis bliver man ikke færdiguddannet pilot ved at studere dette temahæfte. Der er en hel del andre ting, som man også skal sætte sig ind i, bl.a. meteorologi og luftfartslovgivningen, før man må flyve selv. Til den interesserede elev, der gerne vil gå videre med flyvning enten som erhvervspilot eller privatpilot henvises til Appendix B bagest i temahæftet.

Andre aktiviteter

Det gælder for flyvning, som med så mange andre ting, at det er noget som ikke læres ved kun at *studere* emnet. Flyvning er noget, der også skal *prøves*. Der er flere muligheder for den, som gerne vil supplere læsning af temahæftet med nogle oplevelser:

- Næste gang du rejser med fly – måske sammen med klassen på en studietur til udlandet – hold øjne og ører åbne, og læg mærke til de mange ting, der sker under turen: taxi, start, stigning, ligeudflyvning, nedstigning og landing. I temahæftet findes der flere øvelser, der peger på nogle muligheder, som du kan benytte dig af på næste flyvetur.
- Hvis man skal på ekskursionrejse med klassen her i landet, kan et besøg på en flyveplads eller lufthavn måske indgå i turen. Der kan man efter aftale måske få lov til at

se nogle af flyene på nært hold og lære noget om de funktioner, som lufthavnspersonalet udfører. Desuden holder mange lufthavne – både de civile og de militære – jævnligt åbent-hus arrangementer, hvor man også kan lære meget om flyvning.

- Der findes efterhånden flere udmærkede flysimulator-programmer til personlige computere, der kan give en fornemmelse af, hvordan det er at flyve en flyvemaskine. Se Appendix A for en kort beskrivelse af ét af disse programmer. Der kan du også finde en vejledning til en kort flyvetur, som du selv kan foretage, hvis du har adgang til datamat og program.
- Der findes mange lokale flyveklubber, hvor man kan komme til at flyve med svævefly, motorfly eller dragefly på en demonstrationstur. Angående adresserne på nogle af disse, se Appendix B. Man kan – hvis der er råd og interesse herfor – leje et mindre fly med pilot i en halv eller en hel time for at få demonstreret nogle af de principper, som du møder ved læsning af dette temahæfte.

FLYVNINGENS HISTORIE:

Korte beskrivelser af flyvehistoriske begivenheder og personligheder.

Amelia Earhart	15
Costes & Bellonte	16
Wolfgang von Gronau	18
Charles Lindbergh	24
Jeana Yeager og Dick Rutan	36
Richard Byrd & Floyd Bennett	36
Via en isflade til Antarktis	38

INDHOLDSFORTEGNELSE:

Kapitel 1: Lad os komme i gang	5
Lidt terminologi	5
En flyvetur	6

Kapitel 2: Bevægelseslære: Hastighed og acceleration	11
Jævn bevægelse	11
Accelereret bevægelse	13
Repetition	17

Kapitel 3: Newtons love: Kræfterne på en flyvemaskine	19
Kraft og masse	19
Kræfters sammensætning	21
Kræfterne på et fly	23
Flyet i ligevægt	25
Kræfter i drej	28

Kapitel 4: Aktiviteter: Øvelser og projektforslag	31
Styring af flyet	31
Flyveinstrumenterne	31
Måling af opdriftskraften	34
Måling af startløb	38
Flyets stigningsevne	39
Vindens indvirkning på flyet	40
Den jævne cirkelbevægelse	41
Konklusion	42

Appendix A: Flysimulation på computer (Flight Simulator)	43
Nødvendigt udstyr og program	43
En prøveflyvning med flight simulator	43

Appendix B: Litteratur og adresse-liste	46
Litteratur om flyvning	46
Adresseliste	46

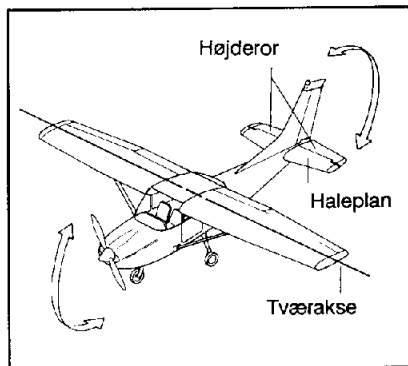
Stikordsregister	47
-------------------------	----

Formelsamling, Omregningsfaktorer	49
--	----

Kapitel 1 - Lad os komme i gang

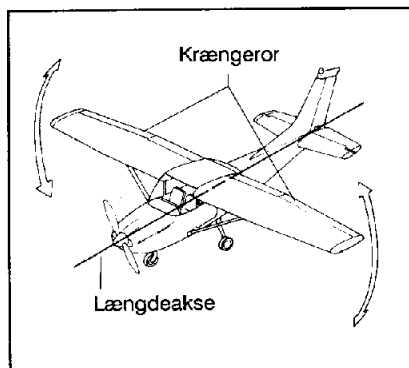
Lidt flyterminologi

Som alle områder af teknikken har området flyvning også sit eget specielle ordforråd, som man skal vænne sig til. Inden vi begiver os ud på en kort flyvetur – med dig som pilot – må vi hellere lige definere et par vigtige ord.



Figur 1.1: Højderorene bruges til at ændre flyets indfaldsvinkel i forhold til luftstrømmen.

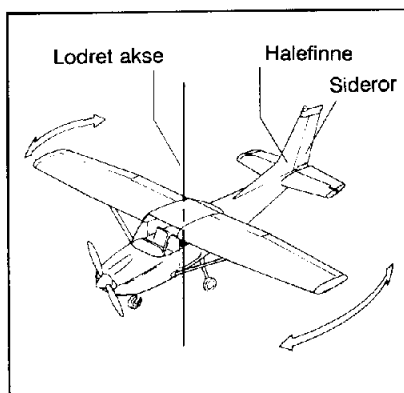
Styrepinden: I gamle dage var – og i nogle flytyper i dag er – styrepinden en stang i gulvet mellem pilotens ben. Skubber man frem og tilbage, påvirkes højderorene på haleplanet (se Figur 1.1).



Figur 1.2: Krængerorene bruges til at dreje flyet omkring sin længdeakse for at indlede og afslutte drej.

Skubber man styrepinden til siden, påvirkes *krængerorene* (se Figur 1.2). I moderne fly ses oftest et rat, der ligner rattet på en bil. At skubbe rattet frem og tilbage hhv. til siden, har samme virkninger som den gamle styrepind. Rattet eller pinden kaldes også for *styregrejet*.

Pedalerne styrer flyets *sideror* (se Figur 1.3). I modsætning til, hvad man måske vil tro, er det ikke sideroret men krængerorene, som hovedsagelig skal i brug for at få flyet til at dreje. Mere herom senere! Presser du med tåspidserne på pedalerne mens flyet er på jorden, så aktiverer du *bremserne* på henholdsvis venstre eller højre hovedhjul.



Figur 1.3: Flyets sideror bruges til at dreje flyet omkring sin lodrette akse (højaksen). Det bruges bl.a. til koordinering af drej.

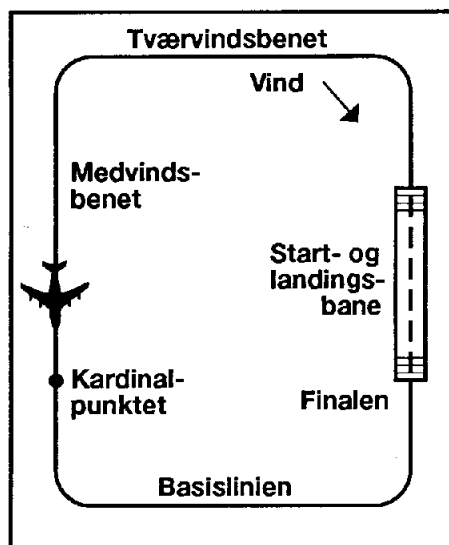
Flaps: Hvis du nogensinde har iagttaget et fly, der lander (eller for den sags skyld en fugl), har du sikker lagt mærke til, at vingebladen ændrer sin facon i de sidste faser af landingen. Det gælder om at kunne flyve langsomt for at tage jorden med så meget kontrol over luftfartøjet som muligt. Man udfælder flaps for at nedsætte minimumsflyvefarten. Flaps gør

luftmodstanden større og forøger vingernes opdrift. I Figur 1.3 kan du se flapsene på undersiden af hver vinge.

Gashåndtaget: Når flyets fart skal øges, flyet drejes, eller flyet bringes til at stige, skal motoren yde større effekt. I små fly svarer dette normalt til, at motorens omdrejningstal skal sættes op. Dette kan gøres ved hjælp af gashåndtaget, som betjenes med højre hånd, mens venstre hånd holder fast på styregrejet.

Trafikrunden: For at sørge for ordnede forhold i luften i nærheden af en flyveplads, har man aftalt et standardmønster, omtrent som en rektangel, som alle fly følger. Trafikmønstret kaldes for *trafikrunden* eller *landingsrunden*. Efter start mod vinden drejer man normalt 90° til venstre på *tværvindsbenet*, idet flyet stiger til en standardhøjde på 1000 fod (ca. 300 meter) over jorden. Endnu et venstredrej bringer flyet på en side af rektanglen, der er parallel med landingsbanen: *medvindsbenet*. Et stykke forbi enden af banen, ved *kardinalpunktet*, drejes flyet til venstre igen, så det er på *basislinien*. Endelig drejes flyet en sidste gang 90°, så det er på en linie, der er i forlængelse af landingsbanen. Denne del af landingsrunden kaldes *finalen*.

Stall: Hvis indfaldsvinklen mellem en kordlinie fra forkanten til bagkanten af flyets vinge og flyets bane gennem luften bliver for stor, kan vingen *stalle*. Den leverer ikke længere en stor opdriftskraft. Flyver man for langsomt og trækker man samtidig næsen for langt opad (som man f.eks. skal under landing) kan dette medføre, at flyets næse pludselig falder. Retter man ikke op i tide, kan man styrte ned. Piloter bruger mange timer til at træne i, hvordan man staller og retter op fra stall. Retter man forkert op, kan flyet gå i spind. Er flyet forkert lastet, kan det være så haletungt, at det



Figur 1.4: Landingsrunden følges af alle fly for at sikre en ordnet afvikling af trafikken nær flyvepladsen.

er umuligt at rette op fra en stall. Dette lyder ikke rart, men kendskab til de kræfter, der virker på et fly, dvs. kendskab til flyvningens fysik, kan hjælpe med til, at man ikke kommer ud for stall eller spind. Dette emne vil vi behandle mere dybtgående i Kapitel 3.

En flyvetur

Lad os begynde dette temahæfte om flyvning med en beskrivelse af en øvelsesflyvning. Afgang, stigning, drej, nedstigning og landing er så vigtige, at enhver pilotaspirant må øve sig mange gange i trafikrunden, før han eller hun får lov til at flyve alene. Vi går ud fra, at du netop har afsluttet din grundskole, og efter ca. 15 timers flyvning med instruktøren om bord har du opnået retten til at flyve selv for første gang (at flyve *solo*).

Du har netop været ved at øve landinger



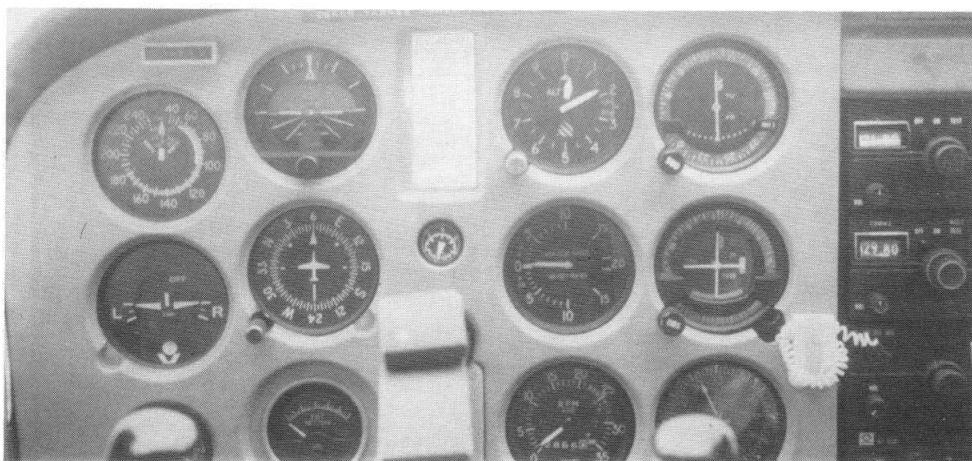
Figur 1.5: Cessna 172 er et meget almindeligt sportsfly i Danmark.

med din flyveinstruktør ved den lokale lufthavn. Din instruktør har besluttet, at nu er det på tide, at du prøver selv. Han betragter dig i den åbne dør, mens han spænder sikkerhedsselen på det tomme sæde. (Selen skal nødigt komme i vejen for styregrejerne på din første solo-flyvning.) Han siger til dig, at nu kan du helt sikkert selv flyve rundt i trafikrunden på lufthavnen uden ham. Du skal bare huske på, at der er en svag tværvind over banen fra nordøst, og at du ikke må lade farten komme under 60 knob på finalen. Han smækker døren, og du låser den med blandede følelser. Dels er du glad, fordi du endelig kan få lov til at prøve selv, uden at blive kritiseret for hver eneste forkert bevægelse, og dels er der en smule bekymring, fordi der er ingen til at hjælpe dig, hvis noget går galt. Du skal klare dig selv.

Du kikker dig godt for, giver gas, og flyet – et Cessna 172 træningsfly – kører villigt frem på rullevejen hen til startbanen. Du bemærker vindsoklen, der viser en svag vind fra nordøst. Du skal starte mod øst. Du træder på venstre bremse, så flyet holder lidt på skrå, så du kan se mod vest efter anden trafik i

landingsrunden, mens du løber checklisten igennem. Du holder på bremserne og sætter motoromdrejningerne op til 1700 omdrejninger i minuttet, mens du kontrollerer tændingssystemet, benzinmålerne, karburatorforvarmeren og olietrykket. Du afpasser gyroskopkompasset med det magnetiske kompas med omdrejningstallet nede på 1300. Du tager gassen ned til tomgang – 1000 omdrejninger – mens du gør checklisten færdig. Du checker, at døre og vinduer er låste.

Du drejer rattet helt til højre – venstre vingeklap går nedad – højre vingeklap går opad. Du drejer rattet helt til venstre. Krængerorene reagerer, som de skal. Du skubber styregrejet helt frem og kikker bagud. Højderoret på haleplanet går ned. Du trækker helt tilbage, og ser højderoret gå helt op. Du presser halerorspedalen til højre og ser haleroret give udslag til samme side. Du presser på venstre halerorspedal. Styregrejerne er OK. Højdemåleren checkes: den viser 170 fod – den passer med lufthavnens kendte højde over havet. Du kikker dig omkring en sidste gang mens du sætter flaps til 10 grader. Ingen trafik.



Figur 1.6: Her er en del af instrumentpanelet på et Cessna 172 sportsfly.

Vinden er stadigvæk svag til jævn fra nordøst. Du slipper bremserne og giver lidt gas for at rulle ud på startbanen. Du skal starte på bane 09 – mod øst. Du ruller ud til midterstregen og drejer til højre ved at holde på højre bremse. Nu kan du se 1000 meter klar bane forude. Uden at tøve giver du nu fuld gas. Det giver et lille sug i maven lige i dette øjeblik, men pludselig bliver der en helt masse andet at tænke på.

Rattet holdes centreret, dog drejet noget mod venstre for at kompensere for tværvindskomponenten. Dine fødder er i bevægelse. Frem og tilbage med små bevægelser for at holde flyet på centerlinien samtidig med, at du kompenserer for vinden fra venstre og for propelluftstrømmens ekstra tryk på haleroret under start. Du kaster et hurtigt blik på fartmåleren – 20 – 30 – 40 knob.

Ved 50 knob er du klar til at lette. Du trækker en anelse tilbage på styregrejet og mærker, at flyet letter. Straks skal du justere krængningen mod venstre og arbejde med sideroret, så flyet stadigvæk følger centerlinien. Næsen presses lidt nedad de første par sekunder, mens

flyet vinder fart. Ved 60 knob kan du trække rattet tilbage til en stilling, som du erfaringsmæssigt ved, vil give dig den korrekte stigningshastighed på 70 knob. Denne handling kaldes sommetider "at rotere". Du justerer hurtigt højderors-trimmet, så du ikke skal trække så hårdt i rattet. Flyet stiger hurtigt! Der er ikke så megen vægt om bord uden instruktøren!

Om nogle sekunder passerer du 600 fods højde. Flaps kan trækkes ind. Når den ekstra opdrift på grund af flapsene er borte, falder næsen lidt, og du skal trække lidt mere tilbage i rattet for at kompensere. Du justerer trim. Vingernes indfaldsvinkel skal øges lidt. Du trimmer. Du kikker dig godt for – især under venstre vinge – efter andre fly, og du begynder et venstredrej mod nord. Du drejer rattet til venstre, samtidig med at du trækker endnu en smule mere tilbage på styregrejet, så næsen ikke falder, og du bruger lidt sideror for at koordinere drejet. Under drejet er krængerorene centreret igen. De bruges kun, mens du ruller ind i et drej eller ruller ud igen. Du holder et halvt øje på retningsgyroen og højdemåleren, holder udkik efter andre fly i trafikrunden og retter op, så flyet

vender mod nord på trafikrundens tværvindsben. Højden er 1100 fod. Nu sænker du næsen lidt, så farten tager til, og stigningen aftager. I 1200 fods højde flyver du ligeud. Du trækker gassen tilbage til 2400 omdrejninger og trimmer flyet for ligeudflyvning ved 100 knob. Du drejer til venstre igen på medvindsbenet. Flyet skal pege lidt nord af vest (270°) på grund af vinden. Du vælger 275° og ser, at du flyver parallelt med banen, stadigvæk i 1200 fods højde.

Der bliver nu lidt tid til, at du kan kikke dig omkring. Klar blå himmel, nogle få spredte skyer. Du kan se 30-40 kilometer i hver retning: mørkegrønne kornmarker, lysegrønne græsmarker, spredte gårde, byer her og der med røde tage, kirker, veje og biler langt nede under dig. Der bliver ikke megen tid til at nyde landskabet, for du skal til at lande nu! Det bliver første gang uden instruktøren ved siden af. Lige ud for enden af landingsbanen – i kardinalpunktet – trækkes gassen tilbage til ca. 1700 omdrejninger, og karburatorforvarmeren trækkes ud for at forhindre isdannelse i karburatoren under din nedstigning. Du trækker lidt tilbage i rattet og trimmer. Farten aftager: 90 – 85 – 80 knob. Du kan bruge flaps – 10 grader – du skal sænke næsen lidt. Farten falder endnu mere, og når banen er ca. 45° bagud, begynder du at dreje mod venstre.

Du holder øje med enden af banen og kikker en ekstra gang ud mod højre efter eventuel anden lufttrafik på finalen. Du bemærker flyets nedstigningstempo, udfælder lidt mere flaps og sænker farten lidt mere, mens du svinger fra basislinien på finalen. Du giver nu fulde flaps – 40 grader – og mærker modstandskræfterne i flyet. Næsen skal hæves, og du giver lidt gas for at holde farten over den kritiske stallhastighed på ca. 50 knob. Du er nede på 60 knob ca.

200 meter fra enden af banen. Du kræn-ger en smule mod venstre på grund af vinden og arbejder frem og tilbage med sideroret for at holde flyet i flugt med banens centerlinje.

I det øjeblik flyet passerer banetærsklen, trækker du gassen helt tilbage til tomgang og trækker forsigtigt tilbage på styregrejet for at flade ud. Flyet sænker sig stille og roligt ned mod banen, mens farten aftager. Du trækker endnu mere tilbage. Næsen er meget høj nu, og hjulene er ca. 30 cm over banen. Ved ca. 50 knob staller vingerne – de mister deres opdriftskraft – og i samme øjeblik rører hjulene jorden. Rattet er helt tilbage nu, næsen er hævet og flyet ruller på banen. Du sænker næsen ved at skubbe styregrejet fremad, du tager flapsene op for at få mere vægt på hjulene, og du styrer med pedalerne. Når farten er nede på 10-20 knob, bremser du forsigtigt og bringer flyet til standsning.

Du drejer fra ved en rullevej for at komme af vejen for eventuelt andre landende fly og styrer ved hjælp af gashåndtaget og pedalerne hen til lufthavnsbygningen. Først nu mærker du sveden på panden og ned ad ryggen. Ved parkeringsområdet slukker du for radioer, navigationslys, mm. og trækker gashåndtaget og mixture-håndtaget helt tilbage, så motoren går i stå. Du slukker for tændingen, trækker i bremsehåndtaget og sætter ratlåsen på. Du åbner døren og ser din instruktør komme hen til dig – tydeligt lettet over at det er gået godt. Han smiler og siger, "Til lykke, nu kan du flyve solo!"

Der var sikkert mange ting i denne beskrivelse, som du ikke helt forstod. Forhåbentlig vil du kunne genlæse dette afsnit senere og få meget mere ud af at læse om din første flyvetur!

Her er nogle flytyper, som ofte ses i det danske luftrum:



Figur 1.7: En MacDonal Douglas DC-10 maskine fra SAS benyttes på mange internationale ruter mellem Danmark og den øvrige verden. (Tak til SAS for brugen af billedet.)

DC-10 maskinen er fabrikeret på MacDonal Douglas fabrikkerne i USA. Flyet har en maksimal startvægt på over 250.000 kg, hvoraf over 45.000 kg er nyttelast. Det flyver normalt i 10 kilometers højde og har en rækkevidde på ca. 10.000 kilometer. Flyet kan rumme 137 kubikmeter brændstof og forbruger 10 kubikmeter i timen. Under start yder flyets tre motorer en samlet kraftpåvirkning på 682.000 newton. Nedenfor ses ét af det danske forsvars F-16 kampfly, der overvåger dansk territorium og farvand.

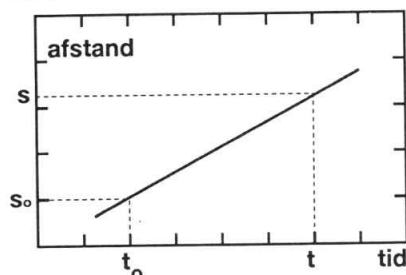


Figur 1.8: F-16 flyet fra General Dynamics Corporation i USA anvendes af det danske forsvar og af luftvåbenet i flere vestlige lande. (Billedet er venligst stillet til rådighed af Flyvestationen Karup.)

Kapitel 2 - Bevægelseslære: Hastighed og acceleration

JÆVN BEVÆGELSE

I dagligdagen er vi omgivet af ting i bevægelse. Cykler, biler, tog og fly. I dette kapitel vil vi repetere nogle elementære begreber, som vil gøre det lettere for dig at forstå nogle simple bevægelser og at regne dig frem til nyttige resultater.



Figur 2.1: Ved den jævne bevægelse tilbagelægges lige store afstande i lige store tidsrum.

Når et legeme tilbagelægger lige store afstande i lige store tidsrum og bevæger sig i samme retning hele tiden, taler vi om en *jævn bevægelse*.

Lad os gå ud fra, at legemets position målt fra en startposition langs dets bevægelseslinje er lig med s_0 , når klokken viser t_0 , og s , når klokken viser t . Legemets fart v kan vi for den jævne bevægelse definere som:

$$(2.1) \quad v = \frac{\text{afstandsændring}}{\text{tidsændring}} = \frac{(s-s_0)}{(t-t_0)}$$

Hvis man specielt vedtager, at klokken t_0 er lig med 0, når legemet passerer stedet s_0 , som også sættes lig med 0, får vi en simpel formel for legemets fart:

$$(2.2) \quad v = s / t$$

Det er meget vigtigt at huske på, at formlen kun gælder for den jævne bevægelse (uændret fart) og navnlig når vi vedtager, at klokken er nul i startpositionen.

Eksempel 2.1:

Et fly skal køre ud til startpositionen på en bane, der er 3000 meter fra holdepladsen. En pilot holder en konstant fart, mens han ruller gennem denne afstand på fem minutter. Beregn flyets fart i meter per sekund (m/s) og kilometer i timen (km/h).

Løsning til Eksempel 2.1:

Flyet tilbagelægger 3000 meter på 5 minutter = 300 sekunder. Derfor er farten $v = s/t = 3000 \text{ m}/300 \text{ s} = 10 \text{ m/s} = 36 \text{ km/h}$.

Tabel 2.1: Nogle omsætningsfaktorer for hastighed:

	km/h	m/s	miles/h	knob
1 km/h =	1	0,2278	0,6214	0,5399
1 m/s =	3,600	1	2,2371	1,9438
1 mi/h =	1,609	0,4470	1	0,8689
1 knob =	1,8521	0,5145	1,1509	1

I mange praktiske situationer er man nødt til at tage højde for, at de givne oplysninger ikke er så ligetil. Der er et eksempel herpå (2.2) på næste side.

FART OG HASTIGHED:

Vi har indtil nu talt om *farten* af et legeme. Det er imidlertid vigtigt at gøre sig klart, at et legemes positionsændring er en *vektor størrelse*. Hvis man ændrer sin position med 10 meter, er det ikke ligegyldigt, i hvilken retning man flytter sig.

Størrelsen af positionsændringen per tidsenhed er det, vi har betegnet som *farten*, mens ændringen i positionsvektoren per tidsenhed er legemets *hastighed*.

Når retningen er underforstået, vil vi i det følgende tale om et legemes *hastighed*, selv om man mere formelt hele tiden bør hen-vise til *hastighedens størrelse* eller *fart*.

bevægelsen ikke starter i nulpunktet klokken nul. Fra ligning (2.1) får vi hjælpeformlen:

$$(2.3) \quad s = s_0 + v(t - t_0)$$

Løsning til Eksempel 2.2:

Først skal farten findes. Flyet tilbage-lægger 51,5 km på 3 minutter og 20 sekunder. Farten er:

$$v = \text{afstand/tid} = 51500 \text{ m}/200 \text{ s} \\ = 257,5 \text{ m/s}$$

Da 1 meter per sekund svarer til 3,6 km/h er flyets fart lig med $3,6 \cdot 257,5 \text{ km/h} = 927 \text{ km/h}$. Tilbage er der 121 km fra Sjællands kyst til Silkeborg. Med en fart på 927 km/h, tager turen 0,1305 timer, altså 7,8317 minutter. Dette svarer til 7 minutter og 49,9 sekunder. Regner vi med, at turen tager 7:50, er ankomsttidspunktet over Silkeborg kl. 10:26:40.

Eksempel 2.2:

Lad os forestille os, at du er på en rejse med et DC-9 fly til Karup (K, se Figur 2.2). Flyet starter fra København, og du bemærker, at flyet passerer Roskilde lufthavn (R) præcis klokken 10:15:30. Flyet bevæger sig med konstant fart og holder en konstant kurs på 293° , mens du flyver fra Roskilde mod Karup. I denne opgave kan vi regne med, at det er vindstille. Flyet passerer Sjællands kyst ved Nekselø (N), som ligger 51,5 km fra Roskilde, klokken 10:18:50.

- Hvad er flyets fart?
- Hvornår passerer flyet Silkeborg (S), som ligger 172,5 km fra Roskilde i luftlinie via Sjællands kyst ved Nekselø (N)?

NB: Ved løsning af denne opgave er man nødt til at tage hensyn til, at



Figur 2.2: Ruten fra Eksempel 2.2 og Øvelserne 2.1 og 2.2 drejer sig om en tur til Karup (K) via Roskilde (R).

Øvelse 2.1:

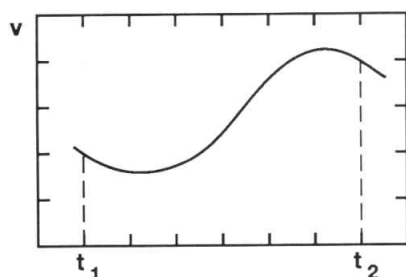
Nu starter du fra København i stedet for i en Cessna 172. Igen passerer du Roskilde lufthavn kl. 10:50:30, men du passerer ikke kysten ved Neksø før kl. 11:11:30. Hvad er flyets fart, og hvornår passerer flyet Silkeborg, hvis vi igen regner med, at det er vindstille?

Øvelse 2.2:

Igen skal du flyve med din Cessna 172 fra København til Karup via Roskilde og Silkeborg. Men denne gang får du fra vejrtjenesten oplyst, at der er en *modvind* på 10 knob på din rute. Regn igen med, at du passerer Roskilde by kl. 10:50:30. Hvornår passer du kysten, og hvornår passerer Silkeborg? Løs samme opgave med en *medvind* på 10 knob.

ACCELERERET BEVÆGELSE

Når man betragter virkelige bevægelser, er det undtagelsen, at et legemes hastighed holdes konstant. Et legemes hastighedsændring per tidsenhed kaldes for legemets *acceleration*. Et eksempel herpå er et legeme, der falder nær jordens overflade. Tyngdeaccelerationen $g \approx 9,82 \text{ m/s}^2$ i Danmark.



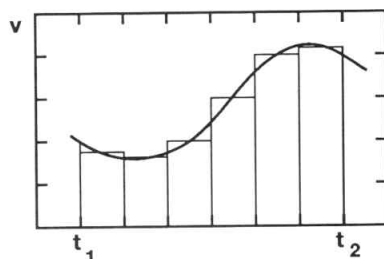
Figur 2.3: Grafen viser farten v af et legeme som funktion af tiden t .

Øvelse 2.3:

Vi har hidtil talt om bevægelser med konstant hastighed. Hvad er accelerationen, når hastigheden er konstant?

Figur 2.3 viser en tilfældig bevægelse, hvor farten (dvs. hastighedens størrelse) *ikke* er konstant.

Vi interesserer os for arealet under kurven fra bevægelsens start klokken t_1 til bevægelsens slutning klokken t_2 . Til dette formål tegner vi et antal rektangler, som vist i Figur 2.4. Bredden af hvert rektangel er lig med Δt , og højden er lig med middelhastigheden i tilsvarende tidsintervaller.



Figur 2.4: Der indtegnes rektangler med henblik på bestemmelse af arealet under kurven.

Betragt rektanglen, der ligger helt mod venstre i figuren. Bredden er Δt , og højden er lig med gennemsnitshastigheden v_1 i dette interval. Legemet tilbagelægger en afstand

$$(2.4) \quad \Delta s_1 = v_1 \cdot \Delta t$$

Samme tankegang gælder for næste rektangel, osv. Dermed bliver den samlede afstand s , som legemet tilbagelægger, lig med det samlede areal af samtlige rektangler: $\sum_i v_i \cdot \Delta t$. Bemærk, at tegnet $\sum_i$ læses "summen af" det efterfølgende, hvor i gennemløber samtlige rektangler i figuren.

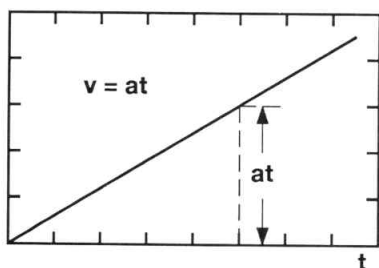
Nu kan man godt sige, at sådan som vi har tegnet rektanglerne, er det samlede areal af rektanglerne kun et skøn. Dette skøn kan naturligvis forbedres ved at gøre rektanglerne mindre og mindre. Når

dette gøres bliver rektanglerens samlede areal meget tæt på at være lig med arealet under kurven. Hermed når vi frem til følgende vigtige sætning:

Arealsætningen for (t,v)-grafer:

Arealet under en (t,v)-graf mellem to tidspunkter t_1 og t_2 er lig med den tilbagelagte vejstrækning i tidsrummet fra t_1 til t_2 .

Ved hjælp af arealsætningen for (t,v)-grafer er det nu meget let at udlede nogle vigtige formler, der kan hjælpe os til at løse opgaver vedrørende legemer, der udfører en *jævn accelereret bevægelse*.



Figur 2.5: Hastigheden stiger jævnt som funktion af tiden ved den jævnt accelererede bevægelse.

Betragt for eksempel bevægelsen, der beskrives ved hjælp af Figur 2.5. Et legeme, f.eks. et fly på startbanen, starter fra hvile klokken $t=0$, og farten stiger jævnt, som vist på kurven. Grafens hældningskoefficient a er hastighedsændringen per tidsenhed og svarer således til legemets acceleration.

Hvilken afstand s er tilbagelagt, når der er gået en tid t ?

Vi kan få svar på dette spørgsmål ved

blot at gøre brug af arealsætningen for (t,v)-grafer:

$$\begin{aligned} (2.5) \quad s &= \text{arealet under (t,v)-grafen} \\ &= \text{trekantens areal} = \frac{1}{2} (t)(at) \\ &= \frac{1}{2} a t^2. \end{aligned}$$

Eksempel 2.3:

Et fly står klar til start ved enden af startbanen, du er med, og du trykker start på dit stopur i det øjeblik, flyet begynder at rulle. Flyet accelererer jævnt, og du passerer 2000 meter-mærket, når der er gået 25 sekunder. Beregn flyets acceleration a . Hvad er flyets hastighed i dette øjeblik?

Løsning til Eksempel 2.3:

Da flyet starter fra hvile og accelererer jævnt, kan vi anvende formlen,

$$s = \frac{1}{2} a t^2 \quad \Leftrightarrow \quad a = 2s/t^2$$

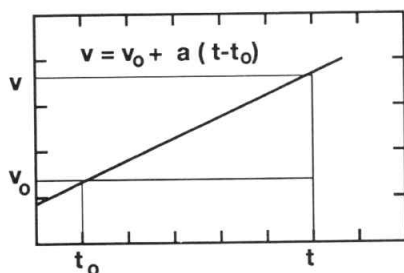
Ved indsættelse af $s = 2000$ m og $t = 25$ s fås: $a = 6,4$ m/s². Da $v = at$, er $v = 160$ m/s ved start.

Øvelse 2.4:

Du sidder i en DC-10, der starter fra Københavns lufthavn på vej til New York. Du bemærker, at der går 45 sekunder fra flyet begynder at rulle til det er i luften. Det letter ved 3000 meter-mærket. Beregn flyets starthastighed.

Øvelse 2.5:

En startbane har en længde på 3000 meter, og et bestemt fly med en given last har en starthastighed på 150 knob. Hvilken jævn acceleration skal flyet mindst kunne præstere for at opnå start-hastigheden med en sikkerhedsmargen på 500 meter?



Figur 2.6: Et legeme bevæger sig med en jævn acceleration a fra start-hastigheden v_0 .

Det kan naturligvis ske, at vi får brug for at regne på tilfælde, hvor et legeme er i bevægelse med en given hastighed v_0 til starttidspunktet t_0 , og hvor vi gerne vil undersøge den jævnt accelererede bevægelse. Figur 2.6 viser (t, v) -grafer for en sådan bevægelse. I disse tilfælde kan arealsætningen også anvendes. Fra figuren ser vi, at:

$$(2.6) \quad v(t) = v_0 + a(t - t_0)$$

$$(2.7) \quad s(t) = v_0(t - t_0) + \frac{1}{2} a(t - t_0)^2$$

Øvelse 2.6:

Betrakt liniens ligning og benyt arealsætningen for (t, v) -grafer til at gøre rede for, at ligningerne (2.6) og (2.7) er rigtige.

Ligningerne (2.6) og (2.7), der beskriver såvel legemets fart som position til et vilkårligt tidspunkt t , kaldes ofte for legemets *bevægelsesligninger*.

Øvelse 2.7:

Vis, ved at eliminere $(t - t_0)$ mellem ligningerne (2.6) og (2.7), at:

$$(2.8) \quad v^2 = v_0^2 + 2 a s$$

Eksempel 2.4:

Et fly lander på et hangarskib og rører dækket med en fart på 80 m/s . Piloten indser straks, at der kun er 250 meter

FLYVNINGENS HISTORIE: Amelia Earhart (1897–1937)

I 1922 satte amerikaneren Amelia Earhart kvindernes højderekord ved at flyve til 14.000 fods højde kort tid efter sin første soloflyvning. Året efter Charles Lindberghs soloflyvning fra New York til Paris, var hun i 1928 den første kvinde til at flyve over Atlanterhavet, og i 1932 fløj hun solo over Atlanten.

På et tidligt tidspunkt i hendes liv satte Amelia spørgsmålstegn ved traditionelle kvinderoller. Hun arbejdede for Røde Kors under 1. verdenskrig, tog kurser som bilmekaniker og læste en overgang medicin, inden hun for alvor blev interesseret i luftfart. Hendes far sørgede for, at hun fik en kort flyvetur, så hun kunne komme over sine skøre ideer – men hun blev så glad for flyvning, at hun tog flyvecertifikat i stedet for.

I februar 1937 var hun på vej omkring jorden fra øst til vest sammen med sin navigatør, Fred Noonan. 80% af flyvningen var overstået, da hun over Stillehavet måtte melde over radioen, at Howland Øen ikke var i sigte, og at de kun havde lidt benzin tilbage. Trods en stor eftersøgning blev hverken fly eller besætning fundet.

bane tilbage, og giver fuld gas, så flyets acceleration $a = 20 \text{ m/s}^2$. Flyet kan kun lette, hvis farten er på mindst 200 knob . Kan flyet nå at lette, inden banen slipper op?

Løsning til Eksempel 2.4:

Vi kan i dette tilfælde godt sætte klokkeslettet $t_0 = 0$, og da $a = 20$ og $v_0 = 80$ (alle i SI enheder), er bevægelsesligningerne for flyet givet ved:

$$\begin{aligned}v(t) &= 80 + 20 t \\s(t) &= 80 t + 10 t^2\end{aligned}$$

Spørgsmålet er, hvad er flyets fart, når $s(t) = 250$? Hvis vi sætter 250 ind på $s(t)$'s plads og løser for t , får vi andengradsligningen:

$$\begin{aligned}10 t^2 + 80 t - 250 &= 0 \\<=> t^2 + 8 t - 25 &= 0\end{aligned}$$

Ligningen har løsningerne: $t = 2,403$ s og $t = -10,403$, hvor kun den positive rod, 2,403 s, har interesse her. Den kritiske hastighed for start er 200 knob, som er lig med 102,9 m/s. Ved hjælp af bevægelsesligningen for hastigheden, finder vi, at $v(2,403) = 128,06$ m/s.

Altså kan piloten godt nå at redde situationen, hvis han/hun reagerer straks.

Øvelse 2.8:

Piloten i ovenstående opgave tøver i 0,5 sek., inden der gives fuld gas. I dette tidsrum ruller flyet med den konstante fart på 80 m/s. Kan flyet nå at lette?

Øvelse 2.9:

Fuldt læsset har en Cessna 172 brug for at rulle ca. 260 meter (i vindstille) for at komme i luften. Flyet accelererer jævnt og letter ved 50 knob.

- a) Beregn flyets acceleration under start.

FLYVNINGENS HISTORIE: Costes & Bellonte

Franskmændene Dieudonne Costes og Maurice Bellonte var de første til at gennemføre den vanskelige flyvning fra Paris til New York. Selv i dag tager flyveturen med rutefly ca. en time længere end New York-Paris på grund af den normalt kraftige vestlige modvind. Costes og Bellonte tog af sted den 1. september 1930 i en énmotors Breguet 19 maskine med næsten 5000 liter brændstof om bord.

De første 20 timer foregik uden vanskeligheder, og de støttede sig til radiopejlinger til de mange skibe, som de passerede. Da de nærmede sig farvandet ud for Newfoundlands kyst blev vejret dog meget dårligt med tæt tåge, regnvejr og kraftig modvind. De blev gennemblødte i deres åbne cockpit og meget udmattede af den konstante støj fra 650 HK motoren.

Til sidst lykkedes det dem at få øje på Nova Scotia og følge kystlinien sydover til New York, hvor de med kun lidt benzin tilbage landede efter 37 timer i luften. Der blev de modtaget af begejstrede menneskemængder inklusiv Charles Lindbergh, som roste deres bedrift.

Flyet skal accelerere jævnt i vandret flyvning i 5 sekunder indtil en fart på 70 knob opnås, før stigningen kan startes.

- b) Hvilken afstand tilbagelægger flyet under denne del af flyvningen?

Når stigningen er påbegyndt, stiger flyet

3,5 meter i sekundet, og hastigheden gennem luften er 70 knob.

- c) *Begregn stigningstiden til en højde på 300 meter over startbanen. Med hvilken stigevinkel stiger flyet? (Vink: tegn en lille trekant til hjælp, hvor siderne svarer til den lodrette fart og farten gennem luften.)*

Du skal starte på en bane, der er 1000 meter lang.

- d) *Hvor højt vil flyet være, når du passerer enden af banen, 1000 meter fra startpositionen?*

Øvelse 2.10:

På et hangarskib er der ikke megen plads til startbanen. For at give flyene en passende stor acceleration, benyttes en dampdreven katapult, der sammen med motorkraften giver en stor acceleration. Det oplyses, at en F-14 accelererer igennem en afstand på 100 meter fra hvile til starthastigheden i løbet af 2,7 sekunder.

- a) *Beregn flyets acceleration.*
b) *Hvad er flyets hastighed, når det forlader dækket?*
c) *Hvor mange gange jordens tyngdeacceleration ($9,82 \text{ m/s}^2$), det vil sige, hvor mange "G", udsættes besætningen for under flyets start?*

REPETITION:

I Kapitel 2 har vi beskæftiget os med bevægelseslære. Her er en kort formelsamling:

fart = afstandsændring/tidsenhed

Et legemes hastighed er en vektor. Hastighedens størrelse er farten, og hastighedens retning er den øjeblikkelige bevægelsesretning.

Ved jævne bevægelser med konstant fart v gælder der, at positionen s klokken t er givet ved:

$$s = s_0 + v(t - t_0)$$

hvor legemet er i startpositionen s_0 i startøjeblikket t_0 . Accelerationen er hastighedsændringen per tidsenhed. For den jævnt accelererede bevægelse fra hvile gælder, at:

$$v = a t$$

hvor v er farten, a er accelerationen og t er tiden fra start. Den tilbagelagte afstand s er i dette tilfælde givet ved:

$$s = \frac{1}{2} a t^2$$

Starter den accelererede bevægelse klokken t_0 med hastigheden v_0 , gælder der, at:

$$\begin{aligned} v(t) &= v_0 + a(t - t_0) \\ s(t) &= v_0(t - t_0) + \frac{1}{2} a(t - t_0)^2 \end{aligned}$$

som er legemets bevægelsesligninger.

FLYVNINGENS HISTORIE: Wolfgang von Gronau

Gronau var pilot under 1. Verdenskrig og blev senere direktør for Verkehrs Fliegerschule i Tyskland. Som flere nordeuropæiske piloter, var han overbevist om, at flyvninger over de arktiske områder ville få stor kommerciel betydning. Uopfordret og uden tilfældelse fløj han i 1929 fra øen Sylt til Island og tilbage igen. Dermed lykkedes det ham at skaffe støtte fra det tyske transportministerium og luftfartsselskabet Luft Hansa til at udforske nye arktiske luftruter.

Gronau ville flyve fra Tyskland til New York via Færøerne, Island, Grønlands sydspids og Labrador. Han ville flyve en *storcirkelrute*, den korteste afstand mellem to punkter på jordens overflade. Han var en grundig pilot, som overlod kun lidt til tilfældigheder. Til turen valgte han en Dornier flyvebåd med 500 HK BMW motorer. Han medbragte solkompasser og nye instrumenter beregnet til blind-flyvning: en kunstig horisont, præcisionshøjdemåler og gyrokompass. Ekstra brændstof blev lagret bl.a. på Færøerne, Island, Grønland. Andenpilot, navigatør og mekaniker var alle udlært på Gronaus flyveskole. Uden offentlig opmærksomhed tog han afsted fra Sylt den 18. august 1930. Han fløj til Reykjavik, nogle dage senere videre i dårligt vejr i meget lav højde over Danmarksstrædet og landede ved Ivigut på Grønlands Vestkyst.

Næste etape tog Gronau og hans kollegaer fra Grønland til Labrador, igen i dårligt vejr med lav sigtbarhed. Dog lykkedes det besætningen at nå frem til havnen ved Cartwright. Efter nogle korte flyvninger langs den canadiske kyst, igen hæmmet af tåge, fløj de direkte fra Halifax, Nova Scotia, til New York. De kredsede omkring Frihedsgudinden og landede nær ved Manhattans sydspids. Hele turen havde været otte dage, hvoraf 47 timer var i luften.

Gronau indrømmede at de kommercielle muligheder for passagertrafik langs direkte storcirkelruter måtte afvente fly med større hastighed, større nyttelastevne og med mulighed for at flyve meget højt oppe over vejproblemerne.

I sommeren 1931 prøvede Gronau igen at flyve på en storcirkelrute, denne gang fra Tyskland til Chicago via Grønland, denne gang over indlandsisen. Denne tur viste sig at være en stor udfordring, selv om han denne gang benyttede et Dornier fly med kraftigere motorer. Det krævede 10 timer for besætningen at nå over de 3000 meter høje bjerge til Vestkysten.

Ved ankomsten til Chicago den 1. september var han ikke optimistisk med hensyn til de kommercielle muligheder på grund af de vestlige vinde, det dårlige vejr og de store øde egne, der skulle overflyves. Det var først i 1950'erne at SAS optog regelmæssige storcirkelflyvninger over Arktiske områder.

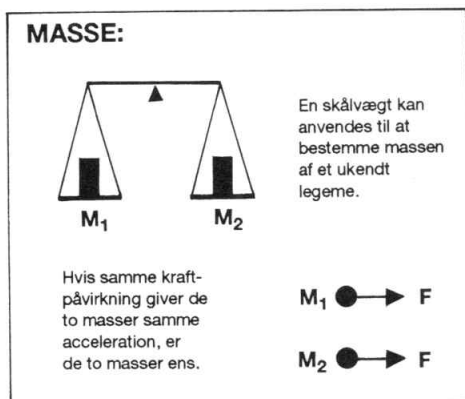
Kapitel 3 - Newtons love:

Kræfterne på en flyvemaskine

KRAFT OG MASSE

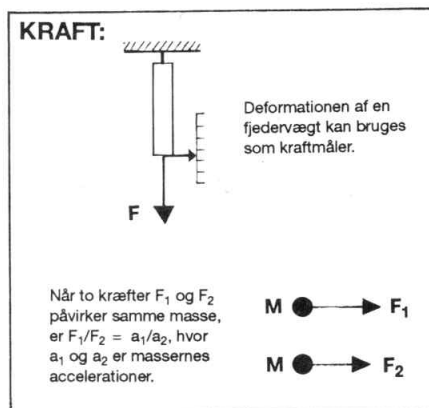
I Kapitel 2 har vi set på begreberne position, hastighed og acceleration og benyttet eksempler fra flyvning til at illustrere dem. I dette kapitel kommer vi til at arbejde med begreberne *kraft* og *masse*. Ændres et legemes form, eller ændres legemets bevægelsestilstand, forklarer man det ved at sige, at en kraft har virket på legemet.

Hvad *masse* angår, oplever vi masse på to måder: den *tunge* masse og den *træge* masse. Jorden udøver et træk på ethvert legeme på overfladen: jo større masse, jo større er dette træk. Trækkets størrelse kan bl.a. måles ved at sammenligne et ukendt legeme med legemer med kendte masser på en skålvægt. Her taler man om den *tunge* masse.



Man kan også afgøre massen af et legeme ude i rummet langt væk fra jordens tiltrækningskraft (den *træge* masse). Giver man et ukendt legeme et skub, sættes det i bevægelse. Hvis dets acceleration er præcist den samme som ac-

celerationen af et standardlegeme med en kendt masse, kan man slutte, at de to masser er ens. Det kan vises, at de to definitioner er ækvivalente.



En *kraftpåvirkning* er årsagen til, at et legemes bevægelsestilstand ændrer sig. Er der ingen kræfter, der virker på et legeme – eller er der flere kræfter, der modvirker hinanden, så den samlede virkning er lig med nul – vil legemets hastighed forblive uændret. Omvendt siger man også, at hvis hastigheden er uændret, er det fordi den samlede kraftpåvirkning er lig med nul.

Den, der først formulerede denne idé, var italieneren Galileo Galilei (1564–1642). Den blev senere præciseret af Isaac Newton (England, 1642–1727). I dag går ideen under betegnelsen *inertiens lov*, også kaldet *Newtons 1. bevægelseslov*. Den er den første af tre love, som tilsammen giver en meget tilfredsstillende beskrivelse af legemers bevægelser.

Newton's 1. lov (Inertiens lov):

Når den samlede kraftpåvirkning på et legeme er lig med nul, er det ensbetydende med, at legemets hastighed forbliver konstant.

Er den samlede kraftpåvirkning *ikke* lig med nul, vil legemets hastighed som følge af den første lov ikke være konstant. Som vi har set i Kapitel 2, svarer dette til, at legemet får en acceleration. Mange erfaringer og forsøg har vist, at denne acceleration er proportional med kraftpåvirkningen og omvendt proportional med legemets masse m . Newton har formuleret denne sammenhæng, og den kan udtrykkes i følgende form:

Newton's 2. lov:

$$\mathbf{a} = \mathbf{F}/m \iff \mathbf{F} = m \mathbf{a}$$

Accelerationens SI enheder er m/s^2 , og kraften måles i Newton (N). Masse måles i kilogram (kg).
Altså er $1\text{ N} = 1\text{ kg m/s}^2$.

Bemærk, at de fede bogstaver $\mathbf{a}$ og $\mathbf{F}$ er udtryk for, at både accelerationen $\mathbf{a}$ og kraften $\mathbf{F}$ er *vektorer*: de har størrelse, retning og enheder. Der gælder, at ikke alene er kraften og accelerationen proportionale, men de har samme *retning*.

Eksempel 3.1:

En jagermaskine står på en startbane med en startvægt på 10.000 kg. Under start yder motoren en kraft på 75.000 N. Find flyets acceleration. Hvor mange G udsættes piloten for på grund af denne acceleration? Hvor mange sekunder er flyet om at opnå dens starthastigheden på 150 knob?

Løsning til eksempel 3.1:

Da $\mathbf{a} = \mathbf{F}/m$, bliver accelerationen:

$$a = 75.000\text{ N}/10.000\text{ kg} = 7,5\text{ m/s}^2$$

svarende til ca. 0,76 gange tyngdeaccelerationen, altså 0,76 G. Da 150 knob svarer til 77,18 m/s, og da der for jævnt accelereret bevægelse gælder, at $v = at$, bliver starttiden $t = 11,25$ sekunder.

Øvelse 3.1:

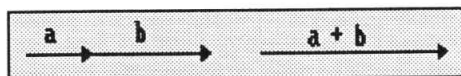
En Cessna 172 står på startbanen næsten fuldt læsset med en samlet masse på 1000 kg. Den resulterende kraft på flyet under start er på 1300 N. Antag, at det er vindstille.

- Beregn flyets acceleration under startløbet.
- Hvis accelerationen er konstant, hvor mange sekunder går der, før flyet kan lette (dvs. at hastigheden er oppe på 50 knob)?
- Hvilken afstand tilbagelægger flyet, inden det kan lette?

Newton's 3. lov fortæller om kraftpåvirkninger på to *forskellige* legemer, der påvirker hinanden. Hvis et legeme påvirker *et andet* med en kraft, så påvirker det andet legeme det første med en lig så stor og modsatrettet kraft. Løfter du en genstand, flytter den sig, fordi du påvirker den med en kraft. Ligeledes mærker du, at genstanden påvirker din hånd med en lig så stor og modsatrettet kraft.

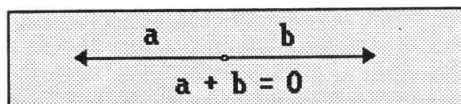
Tilsammen udgør Newtons tre love et sæt værktøj, der gør det muligt at beskrive en meget stor delmængde af de processer, som forekommer i naturen.

KRÆFTERS SAMMENSÆTNING



Figur 3.1: Summen af a og b findes ved at sætte dem efter hinanden.

Som nævnt er kræfter vektorer, da de har både størrelse og retning. I praksis vil der ofte virke flere kræfter på et legeme, og vi skal derfor vide, hvordan vektorer og dermed kræfter, forskydninger, hastigheder og andre vektorstørrelser kan lægges sammen. Vektorer kan vises i tegninger som pile, hvor pilens længde viser vektorens størrelse, og pilens retning svarer til vektorens retning. Har man flere vektorer, der har samme retning, kan deres samlede virkning findes ved at sætte disse pile i forlængelse af hinanden (jfr. Fig. 3.1). Bemærk, at sumvektoren godt kan være lig med nul, f.eks. når to modsatte vektorer er lige store:

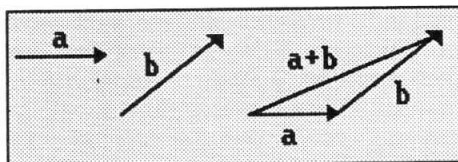


Figur 3.2: To vektorer, der er modsatte og lige store, ophæver hinanden og giver nulvektoren 0.

For eksempel virker tyngdekraften på dig, og hvis du sidder på en stol lige nu, udøver stolen en opadrettet reaktionskraft ifølge Newtons 3. lov. Du bliver siddende, fordi summen af de to kræfter er lig med nul, og så må accelerationen (iflg. Newtons 2. lov) være lig med nul.

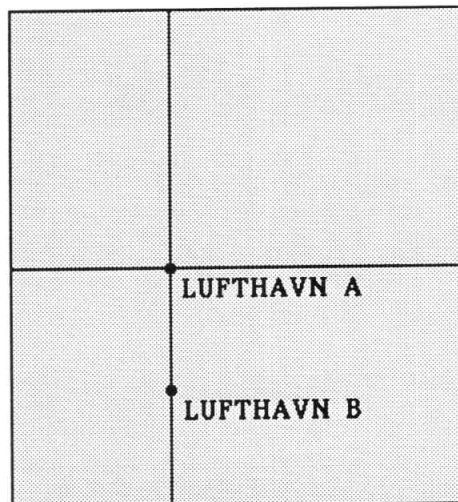
Er vektorerne *ikke* parallelle, kan ovenstående metode også anvendes, idet man blot skal anbringe halen af den anden vektor i berøring med spidsen af den første. Summen er da pilen, der går fra halen af den første til spidsen af den

sidste, som vist i følgende figur:



Figur 3.3: Summen af to vektorer a og b kan findes ved "hale-spids metoden".

Hale-spids metoden er ofte bekvem, når man vil sammensætte forskydningsvektorer, som f.eks. når forskellige dele af en samlet flyverute skal adderes.



Figur 3.4: Benyt millimeterpapir, lineal og vinkelmåler til at løse Øvelse 3.2.

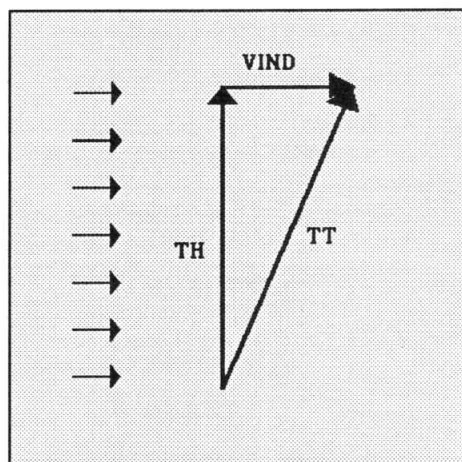
Øvelse 3.2:

Benyt et stykke millimeterpapir. Markér midten, og kald stedet "Lufthavn A". Lad 1 centimeter svare til 1 kilometer, og lad nord være opad på papiret.

- Ruten er 8 km mod nord og derpå 8 km mod øst. Hvor befinder du dig i forhold til Lufthavn A?
- Lufthavn B er 10 km syd for Lufthavn A. Hvilken kurs skal du nu flyve for at komme fra din position efter (a) hen til Lufthavn B?

Et andet tilfælde, hvor sammensætning af vektorer skal benyttes, er når en pilot skal tage højde for vindens indflydelse på flyvningen. I denne forbindelse skal man huske på, at flyets bevægelse igennem luften er fuldstændig uafhængig af, om hele luftmassen flytter sig i forhold til jordens overflade.

Kan flyet præstere en hastighed på 100 knob gennem luften, ændres denne ikke ved, at der er en modvind på 20 knob. Men i forhold til jordens overflade, som piloten normalt er temmelig interesseret i, betyder det naturligvis noget!



Figur 3.5: Vindens virkning på et fly svarer til, at flyets hastighedsvektor og vindens hastighedsvektor lægges sammen.

For eksempel, hvis flyets egenhastighed gennem luften er 100 knob mod nord, kan hastigheden repræsenteres af en vektor, der peger opad med en længde på 10 cm på et stykke millimeterpapir. Er vindhastigheden 10 knob fra vest, vil den samlede virkning på flyet kunne findes ved at lægge flyets hastighed og vindens hastighed sammen vektorielt.

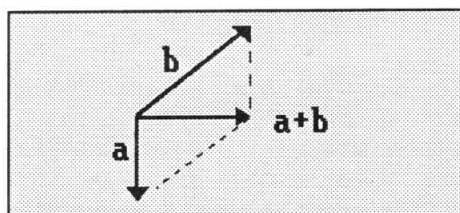
Flyets egenhastighed gennem luften

bliver sommetider betegnet *TAS* (*true air speed*) og flyets retning for *TH* (*true heading*). Flyets hastighed over jorden kaldes *GS* (*ground speed*) og flyets retning set i forhold til jorden for *TT* (*true track*). De fleste piloter benytter en regneskive (*flight computer*) til at beregne vindkorrektioner. Den er meget lettere at anvende, når man forstår, at regneskiven blot er en metode til sammensætning af vektorer.

Øvelse 3.3:

En pilot flyver mod nord (*TH*) med en egenfart på 100 knob (*TAS*). Han korrigerer ikke for vinden, som er 20 knob fra vest. I hvilken retning (*TT*) flyver han i forhold til jordens overflade og med hvilken hastighed? Angiv retningen som en vinkel i forhold til nord, og angiv flyets *GS* i knob. I hvilken retning skal flyet flyve (*TH*) for at flyve direkte mod nord? (**Vink:** Tegn vektorer, der viser flyets hastighed, vindhastigheden og den resulterende hastighed mod nord.)

Bemærk, at når flere kræfter eller hastigheder skal sammensættes, kan det være bekvemt at lade dem angribe i samme punkt, og benytte et parallellogram til at finde deres sum. Dette er vist i Figur 3.6:

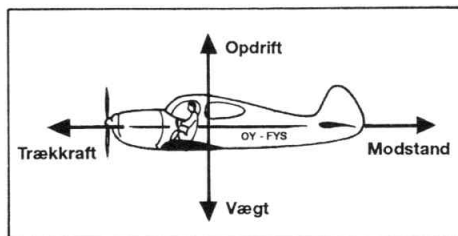


Figur 3.6: Kræfternes parallellogram kan anvendes til addition af *a* og *b*.

Bemærk ved betragtning af parallellogrammets sider, at vektoraddition ved hjælp af parallellogrammetoden er ækvivalent med hale-spids metoden.

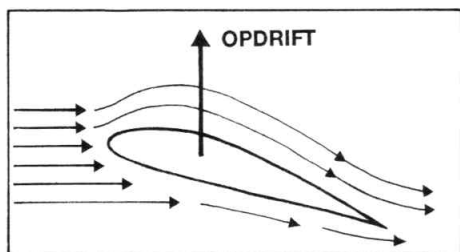
KRÆFTERNE PÅ ET FLY

Når et fly flyver ligeud med konstant hastighed i konstant højde, må den *resulterende* kraft på flyet være lig med nul.



Figur 3.7: Under ligeudflyvning er den resulterende kraft lig med nul.

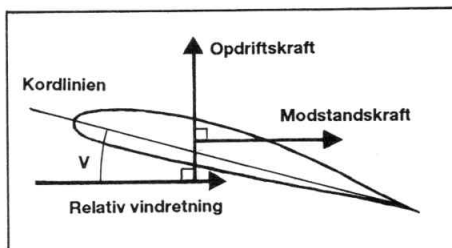
Opdriftskraften, der skyldes kræfterne på vingerne, ophæver netop tyngdekraften på flyet. Trækkraften, som stammer fra motoren via propellen, ophæver netop modstandskræfterne, som stammer fra flyets passage gennem luften. Fig. 3.7 viser disse fire kræfter virkende på et fly.



Figur 3.8: Opdriftskraften på en vinge-profil skyldes den forbigående lufts påvirkninger på vingens overside og underside.

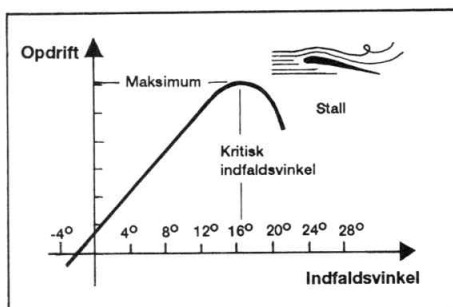
Opdriftskraften er jo helt afgørende for, at en flyvemaskine kan lette fra jorden og holde sig i luften. Den opstår, når luften passerer forbi flyets vinger. Opdriften opstår dels på grund af et undertryk på vingens overside (*Bernoulli-effekten*), og dels på grund af luftens pres (impulsændring) mod undersiden.

Helt afgørende for opdriftskraftens størrelse er *indfaldsvinklen*. Den er vinklen mellem vingens kordlinie – en linie fra vingens forkant til bagkanten, som vist i Figur 3.9 – og luftens bevægelsesretning i forhold til vingen.



Figur 3.9: Indfaldsvinklen er vinklen mellem vindens retning i forhold til vingen og vingens kordlinie.

Op til en vis grænse – den *kritiske vinkel* – stiger opdriftskraften. Over denne kritiske grænse falder opdriftskraften hurtigt af. Man siger, at vingen *staller*. Figur 3.10 viser opdriftskraften som funktion af indfaldsvinklen.



Figur 3.10: Når vingens indfaldsvinkel overstiger den kritiske indfaldsvinkel, staller vingen, dvs. opdriftskraften bliver pludseligt meget mindre.

For at undgå, at flyet pludseligt staller, når en vinge når den kritiske vinkel, monteres vingerne normalt således, at den kritiske vinkel først nås ved *vingeroden*, mens vingespidsene stadigvæk

har god opdrift. På denne måde bliver flyet nemmere at styre, når det skal rettes op fra en stall.

Charles Lindbergh (1902-1976)

Amerikaneren Charles Lindbergh fløj som passager for første gang, da han var 19 år, og det var kærlighed ved første blik. Han arbejdede som "barnstormer" – først som assistent under flyopvisninger. Han gik på vingerne og sprang ud med faldskærm for at tjene penge til eget fly. Senere var han postflyver, og han fløj mange timer om natten og i dårligt vejr. I 1927 havde han skaffet penge og støtte til at få lavet eget fly hos Ryan Airlines i Californien. Han ville flyve over Atlanterhavet fra New York til Paris og vinde Orteig prisen på \$25.000.

Efter en vellykket prøvetur på 2400 miles fra San Diego i Californien til Long Island i New York var han klar til Atlanterhavsflyvningen. Han satsede på at have et minimum af udstyr med (f.eks. intet redningsudstyr). Af mad og drikke medbragte han kun fem skinke-madder og to dunke med vand. Han mente, at det var bedst ikke at spise for meget, når man skulle holde sig vågen i de mange timer, som turen ville tage. Den 20. maj 1927 kl. 07:54 kom han med nød og næppe af sted fuldt læsset med brændstof. Han havde ikke sovet natten før afrejsen.

I 33,5 timer fløj han alene uden mulighed for hvile. Flyets små

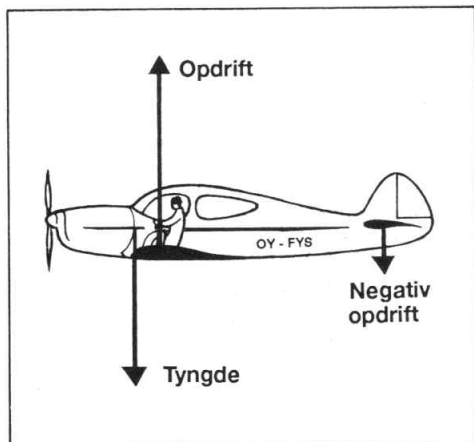
styreflader gjorde det nødvendigt hele tiden at benytte styregrejet for ikke at komme ud af kurs. Flere gange over Atlanten blev han rusket vågen, fordi styregrejet skulle passes hele tiden.

Næste morgen var han endnu langt fra land og næsten ikke i stand til at holde sig vågen. Han måtte bruge alle kneb for ikke at falde i søvn og styrte i havet. Det lykkedes, og ni timer senere så han Europas kyst: han passerede Valentia Øen i Irland kun få kilometer fra sin planlagte kurs. Han fløj videre over Englands sydspids og Cherbourg mod Paris. For at finde Le Bourget lufthavn var han nødt til at kredse omkring Eiffeltårnet og flyve mod nordøst. Endelig fandt han lufthavnen og landede kort før midnat. Bedriften blev fejret over hele verden.

I 1933 fløj Lindbergh med sin hustru Anne Morrow Lindbergh i et Lockheed "Sirius"-monoplan fra USA over Grønland og Færøerne til København. Han havde stor tiltro til luftfartens kommercielle potentiale, og han gjorde turen til Danmark for at undersøge mulighederne for at oprette en regelmæssig passagertrafik. Under anden verdenskrig fløj han 50 kampflyvninger. Han blev senere en velkendt forfatter og arbejdede som leder i luftfartsindustrien. Han døde i 1976 og nåede således at se sine drømme om den verdensomspændende luftfart gå i opfyldelse. Han ligger begravet på Hawaii.

FLYET I LIGEVÆGT

Lad os kikke lidt nærmere på flyets haleparti og den rolle, som det spiller for at sikre flyets *ligevægt*. Et lidt mere detaljeret billede af kræfterne ses i Figur 3.11:



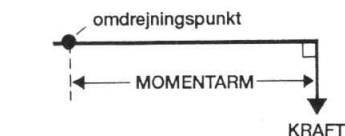
Figur 3.11: Ser man nærmere på opdriftskraften og vægten, skal der tages højde for kraftpåvirkningen på haleplanet.

Bemærk, at i modsætning til, hvad man muligvis vil tro, holder haleplanet *ikke* bagenden af flyet oppe. Haleplanet er indrettet, så luften, der passerer planet virker *nedad*! Årsagen hertil er, at man ønsker, at flyet skal være stabilt omkring sin tværakse under ligeudflyvning.

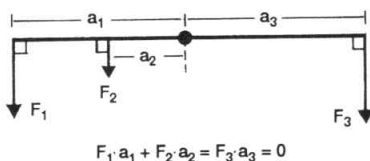
Forestil dig, at du sidder ved rattet og flyver ligeud i konstant højde. Hvis en mindre forstyrrelse skubber næsen nedad, vil det være meget uheldigt, hvis denne uligevægtstilstand blev forstærket, så flyet gik i et dyk. Det samme gælder, hvis næsen får et puf opad. Det kunne være katastrofalt, hvis næsen havde tendens til at gå mere opad. I praksis er det sådan, at hvis du slipper rattet i rimeligt jævn luft, vil flyet pænt holde sin højde trods små forstyrrelser fra ligevægt. For at forstå årsagen hertil, skal man forstå begrebet *kraftmoment*.

Hvis du nogensinde har leget på en vippe, kender du sikkert allerede dette begreb. Når du sætter dig på en vippe, afhænger den drejende virkning af, hvor langt du sidder fra omdrejningsaksen – jo længere fra omdrejningsaksen, jo større bliver den drejende virkning. En kraft ganget med kraftens momentarm, dvs. den vinkelrette afstand fra omdrejningsaksen, kaldes for kraftens *moment* eller blot *kraftmomentet*. Du har sikkert oplevet, at på en vippe kan en lille kraft (lillesøster) langt fra omdrejningsaksen opveje en stor kraft (storebror) tæt på. Dette er et eksempel på momentsætningen. Begrebet kraftmoment og momentsætningen illustreres i Figur 3.12.

Kraftmoment: KRAFT x MOMENTARM



Momentsætningen:



Figur 3.12: Kraftmomentet er produktet af kraftens størrelse og den vinkelrette afstand fra kraftens virkeretning til omdrejningspunktet. Enheden er newtonmeter (Nm).

Lad os nu vende tilbage til årsagen til flyets ligevægt omkring tværaksen. (Et lille modelfly vil være en god hjælp her.) Hvis næsen går *opad*, reduceres haleplanets indfaldsvinkel. Den nedadgående kraft på haleplanet mindskes, og tyngden virkende på flyets masse midtpunkt

tvinger flyets næse *nedad*. Omvendt, hvis næsen går lidt *nedad*, øges haleplanets indfaldsvinkel, og den nedadrettede kraft på haleplanet bliver større, så næsen tvinges *opad* igen. I ligeudflyvningen opvejer alle momenterne hinanden, så det samlede kraftmoment omkring flyet tværsakse er lig med nul. Kommer flyet i uligevægt omkring tværsaksen, sørger haleplanet for, at der frembringes et kraftmoment, der bringer flyet tilbage mod ligevægstillingen. Det er desuden vigtigt, at denne bevægelse er *dæmpet*, således at flyets næse hurtigt vender tilbage til ligeudflyvning og ikke bliver ved med at svinge op og ned omkring tværsaksen. Der skal mao. helst være *stabil ligevægt* omkring tværsaksen.

Læg mærke til, at halepartiets opdriftskraft er *negativ* og derfor bidrager til at skubbe flyet *nedad*! Når man vil presse større ydeevne fra et fly, som f.eks. fra et jagerfly, kan større opdrift opnås være at lade haleplanet bidrage med en *positiv* opdriftskraft, men så bliver flyet ikke naturligt stabilt. Hvis halevingen skal *løfte* for at afbalancere flyet, så må tyngdepunktet ligge *bag* ved opdriftskraftens virkelinie. Som følge heraf bliver et sådant fly ustabilt. Det svenske JAS 39 Gripen fly er designet med kunstig stabilitet. Flyets samlede bæreevne og manøvreedygtighed forøges, men for at flyet kan styres uden overmenneskelige anstrengelser fra pilotens side, overvåger en computer gennem følere flyets opførsel og holder det på rette kurs ved hjælp af små bevægelser af rofladerne.

Momentbegrebet er meget vigtigt inden for flyvningen, og enhver pilot skal være i stand til at beregne eller i det mindste at efterkontrollere lastepanen for sit fly. At dette kan være livsvigtigt fremgår af følgende avisreportage om et uheld ved Oskarshamn i Sverige. Forkert lastning af et fly kan bringe tyngdepunktet for

langt tilbage, således at haleplanet ikke er i stand til at kompensere med det nødvendige kraftmoment for at opnå stabilitet i alle flyvestillinger.

FORULYKKET FLY VAR FOR BAGTUNGT

Oskarshamn: Den alvorlige flyulykke ved Oskarshamn i det sydøstlige Sverige mandag, hvor 16 personer omkom, skyldtes sandsynligvis, at flyet var for bagtungt.

Denne konklusion kom den svenske havarikommission til i sin foreløbige rapport, men den udelukker ikke, at andre faktorer kan have medvirket til ulykken.

Flyet, en to-motors Beechcraft 99, kan maksimalt medføre 15 passagerer. Det havde 14 plus to piloter om bord på ulykkesflyvningen mandag.

Alle 16 - heriblandt flere politikere - blev dræbt, da flyet styrtede ned på en mark 150 meter før landingsbanen i Oskarshamn.

Grunden til, at tyngdepunktet lå meget langt bagude, var, at de ombordværende passagerer vejede meget mere end gennemsnittet.

Vi ved, at de pågældende passagerers vægt lå langt over 75 kilo, håndbagagen iberegnet, sagde havarikommissionens chef, Niels Benker.

Ved hver flyvning skal kaptajnen ved hjælp af en tabel sørge for, at vægten ombord fordeles således, at flyet under flyvningen er i rigtig balance.

(fra *Midtjyllands Avis*, 13/5 89)

I det følgende vil vi illustrere en lasteplan for en Cessna 172. To tal er knyttet til hver post: *massen* og *momentet*. For at en sikker flyvning kan gennemføres, skal følgende krav være opfyldt:

- Den samlede masse skal ligge *under* den maksimalt tilladte startvægt på 1045 kg.
- Det samlede moment skal ligge *inden for* det skraverede område på flyets lastekurve.

For at finde momentet for de forskellige poster kan man benytte grafer, der normalt findes i flyets håndbog, hvorved man kan aflæse momenterne, når man kender masserne. En anden mulighed er, at man kan anvende nedenstående formler, hvor M er momentet i newtonmeter (Nm), og L er postens samlede masse i kilo:

Piloten og forsædepassager:

$$M = 8,8955 L$$

Bagsædepassagerer:

$$M = 17,435 L$$

Bagage:

$$M = 22,832 L$$

Bemærk, at bagagens moment bliver forholdsvis stort, da der er langt fra massemidt punktet til bagagerummet.

For benzin og olies vedkommende, måles mængden normalt i liter. Følgende formler giver deres masser og momenter til brug i flyets lasteplan, hvor W svarer til massen i kilogram, V er volumen i liter, og M er momentet i Nm:

Benzin:

$$W = 0,71 V$$

$$M = 8,675 V$$

Olie:

$$W = 0,88 V$$

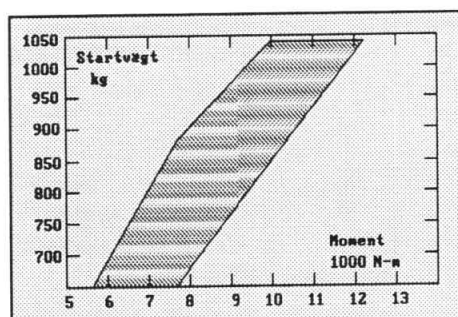
$$M = -4,47 V$$

Eksempel 3.2:

I dette eksempel går vi ud fra, at flyet skal medbringe piloten (75 kg) en forsædepassager (75 kg) og to bagsædepassagerer (tilsammen 155 kg). Desuden skal man tage højde for 7,6 liter olie, 147 liter benzin og 25,9 kg bagage. Læg mærke til, at dette fly vil blive for tungt til at starte, hvis det lastes med fire personer og lidt bagage samtidig med, at flyets benzintanke fyldes op. Dette skal man huske, hvis man vil flyve med gæster om bord!

LASTEPLAN - CESSNA 172		
POST	VÆGT (kg)	MOMENT (Nm)
Tomvægt	600	5717,4
Olie(7,6 l)	6,8	-34,0
Pilot + forsædepassager	150	1334,3
Benzin(147 l)	104,4	1275,2
Bagsædepassagerer	155	2702,4
Bagage	25,9	591,3
TOTAL	1042,1	11586,6

Figur 3.13: Piloten skal lave en lasteplan og sikre, at totalvægten og momentet er inden for de tilladte grænser. Se Figur 3.14.



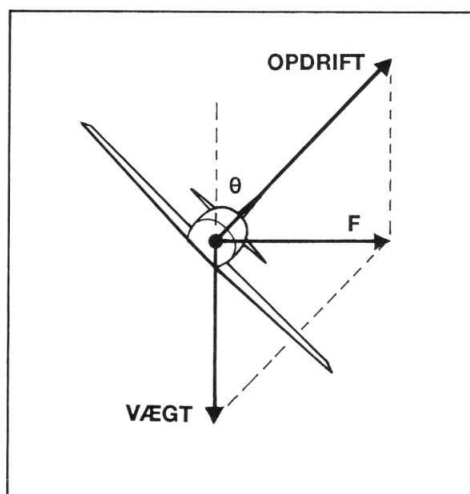
Figur 3.14: Når man har bestemt flyets startvægt og moment, skal talparret ligge inden for det skraverede område.

Øvelse 3.4:

Du er medarbejder på et projekt, der skal levere nødhjælp i et afrikansk land. Der skal transporteres 100 kg medicin samt en læge (80 kg) og to sygeplejersker (hver 70 kg) til en afsidesliggende by 150 km borte. Du er piloten. Flyet skal lastes, så turen kan klares under den maksimale vægtgrænse og med tyngdepunktet inden for de tilladte grænser. Lav en tabel, der ligner Fig. 3.13, til at holde styr på dine beregninger.

Projektforslag:

Lav et EDB program, der benytter formlerne få forrige side til at lave en automatisk beregning af vægt og moment. Et raffineret program vil også vise en grafisk afbildning af Figur 3.14 og vise flyets aktuelle tilstand på diagrammet.



Figur 3.15: Under et drej bliver vektorsummen af opdriftskraften og tyngdekraften lig med en kraft F mod centrum af en cirkel med radius r .

KRÆFTER I DREJ

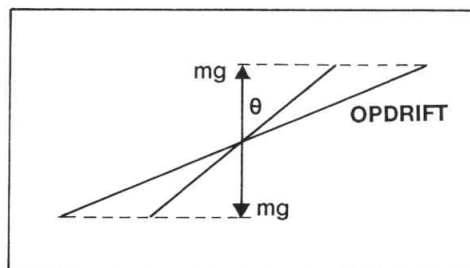
Som nævnt i forbindelse med vores flyvetur i Kapitel 1, skal du begynde et drej ved at bruge krængorerene. De skal blot anvendes, indtil flyet opnår den

ønskede krængning, hvorefter de stilles i midterstillingen igen.

Desuden skal opdriften øges, hvis flyets skal forblive i samme højde eller fortsætte med samme stigning. I et drej, hvor flyet forbliver i samme højde, skal opdriftskraften og vægten mg se ud, som vist i Figur 3.15.

Flyets samlede masse betegnes m , og g er tyngdeaccelerationen ($9,82 \text{ m/s}^2$ i Danmark). Krængningsvinklen θ er vinklen mellem lodret og flyets højakse under drejet. Vinklen kan aflæses på flyets instrumenter. For en given krængningsvinkel θ , kan man fra trekanterne i Figur 3.15 se, at den centrumsøgende kraft F er lig med $mg \tan \theta$.

Bemærk, at opdriftskraftens størrelse skal stige, når krængningsvinklen θ stiger, for at den lodrette komponent kan blive ved med at være lig med tyngdekraften:

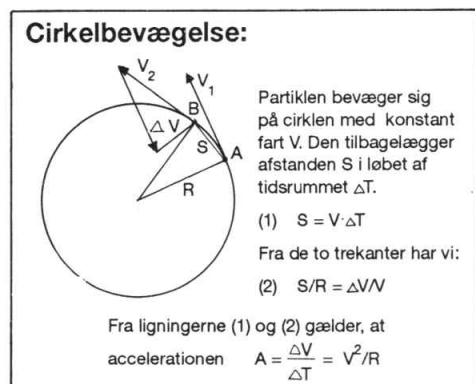


Figur 3.16: For at opretholde samme lodrette komponent af opdriftskraften, når flyet krænger, skal vingerne levere en større og større opdrift.

For at vingens opdriftskraft kan øges, skal piloten trække tilbage på sit styregrej under drej – evt. også trimme. Under stejle drej kan det blive nødvendigt at øge indfaldsvinklen så meget, at vingen staller (jfr. Figur 3.10). Dette fænomen hedder "high speed stall" og opleves således: under et stejlt drej

nærmer den indre vinge sig en stall først, da den relative vinds hastighed er mindst for denne. Hvis man mærker denne udvikling og pludselige forsøger at rette op ved hjælp af krængerorene, kan indervingen stalle fuldstændigt, miste opdrift, og flyet går i spind. I stedet bør man *først* sænke næsen og *derpå* rette op ved hjælp af krængeror.

For at en jævn cirkelbevægelse kan udføres, skal hastighedsændringen af et legeme – og dermed legemets acceleration a – være rettet mod cirkelns centrum. Kraften på legemet $F = m a$ skal derfor også være rettet mod centrum. Man tale om en *centripetalkraft* – dvs. en "centrum søgende" kraft.



Figur 3.17: For at et legeme kan udføre en jævn cirkelbevægelse, skal der være en kraft rettet mod centrum, som frembringer en centripetalacceleration på v^2/r .

Figur 3.17 viser, at centripetalaccelerationen for den jævne cirkelbevægelse med farten v i en cirkel med radius r er lig med v^2/r . Centripetalkraftens størrelse F er derfor lig med mv^2/r .

Husker vi nu på, at den centrumrettede kraft for det krængende fly i Figur 3.15 var lig med $mg \tan \theta$, har vi, at følgende

betingelse skal være opfyldt, for at et fly kan udføre en jævn cirkelbevægelse i konstant højde:

$$mv^2/r = mg \tan \theta$$

$$\Leftrightarrow \tan \theta = v^2/(rg)$$

Øvelse 3.5:

Et sportsfly har en marchhastighed på 100 knob, svarende til 51,45 m/s. Piloten krænger 30° og udfører en cirkelbevægelse i konstant højde. Find cirkelbanens radius. Hvor lang tid går der, før flyet har drejet 360° ?

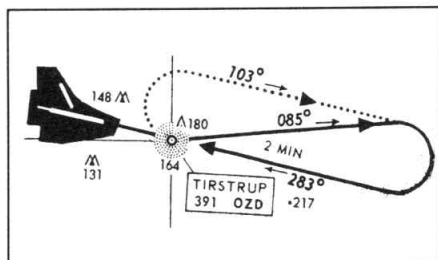
Øvelse 3.6:

Et jagerfly har en fart på 400 knob og krænger 30° . Find cirkelbanens radius og tiden for at dreje 360° .

Øvelse 3.7:

Under instrumentflyvning skal en pilot være i stand til at udføre et *standarddrej*. Dette betyder, at flyets krængning skal vælges, så det tager nøjagtigt 2,0 minutter at dreje 360° . Hvilken krængning skal bruges på en DC-9 under et standarddrej, hvis farten er 250 knob?

Når et fly venter på landingstilladelse, f.eks. på grund af trafik på banen, skal det kredse rundt i en bane (kaldet et "holding pattern"), indtil det er muligt at lande. Denne manøvre udføres ved at flyet flyver i to minutter, evt. direkte mod et radiofy. Derpå udfører piloten et standarddrej i nøjagtigt ét minut, svarende til et drej på 180° . Der flyves igen i to minutter, og et nyt 180° standarddrej gennemføres. En holding pattern for Tirstrup Lufthavn er vist i Figure 3.18:



Figur 3.18: Holding pattern for Tirstrup Lufthavn. Hovedbanen ses nederst t.v. Kassen markerer et radiofy "OZD", som piloten bruger til at orientere sig. Ved anflyvning følges kursen 85°, hvorefter piloten følger det viste holding pattern, indtil han må lande. Evt. kan flere fly befinde sig i samme holding pattern i forskellige højder.

Øvelse 3.8:

En Boeing 747 flyver 250 knob i et holding pattern. Hvilken krængningsvinkel skal anvendes? Hvad bliver banens størrelse (længde og bredde)? Besvar samme spørgsmål for tilfældet af et sportsfly, der kun flyver 100 knob.

Øvelse 3.9:

Under opretning fra et lodret dyk flyver en bestemt maskine med en hastighed på 300 knob. Under opretning følger flyet en del af en cirkelbue, indtil flyet flyver lodret opad. Hvad bliver den mindste radius, som cirkelbuen må have, hvis flyets vinger maksimalt kan tåle at yde en opdrift på 4G?

Øvelse 3.10:

Hvor stejlt kan et fly, der er godkendt til en kraftpåvirkning på maksimalt 4G, dreje?

FLYVESIKKERHED:

Mange traditioner og procedurer omkring flyvning er med til at gøre flyvning mere sikker:

- Enhver flyvemaskine skal gennemgå *periodiske eftersyn*, f.eks. efter hver 100 timer i luften. Piloter skal også checkes regelmæssigt både mht. helbred og kompetence.
- Inden et fly tages i brug, laver piloten en *preflight check* – flyet kigges efter udvendigt. Derefter gennemgås en *check-liste* før start, så ingen vigtige procedurer overspringes.
- Under flyvning er der en række luftfartstjenester til rådighed for piloten. De kan give vejledning om vejret, navigation og anden lufttrafik. Visse flyvninger (instrumentflyvninger) overvåges på radar og dirigeres af myndighederne.
- Enhver rapporteret *hændelse* i luften, f.eks. tæt passage af to luftfartøjer, undersøges for at undgå lignende episoder.
- Hvis et uheld sker – og de sker heldigvis kun meget sjældent – bliver ulykken grundigt undersøgt af en havarikommission, som i en rapport påpeger, hvordan uheldet skete, og hvordan flyvesikkerheden kan forbedres.

Der er mange gode råd om flyvesikkerhed, men her ét af de mere kontante, som måske bør huskes:

Tag aldrig noget for givet!

Kapitel 4 - Aktiviteter:

Øvelser og projektforslag

STYRING AF FLYET

Når man flyver, skal man udnytte sin viden om kræfterne, der virker på flyet, og sin erfaring for at opnå de ønskede manøvrer med flyet. Via styregrejet og motoren skal piloten afpasse samspillet mellem de fire vigtige kræfter: opdrift, trækraft, modstand og tyngdekraft for at flyet indtager stabile flyvestillinger. Desuden skal piloten være i stand til at bringe flyet sikkert fra den ene flyvestilling til den anden.

Efterhånden som din flyvetræning skrider fremad, skal du også være i stand til at udføre alle disse manøvrer alene ved hjælp af instrumenterne, altså uden at kunne se jorden. Udførelse af det praktiske arbejde ved at flyve skal efterhånden være underbevidst, således at du samtidig kan betjene radioer, sørge for navigation, berolige passagerer, holde udkig efter andre fly, osv.

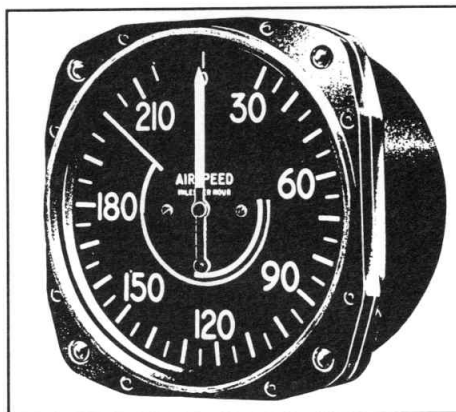
FLYVEINSTRUMENTERNE

Af hensyn til følgende øvelser, opgaver og andre aktiviteter, nævnes her ganske kort lidt om de vigtigste grundinstrumenter, som findes i et fly. For at se deres indbyrdes placering, se Figur 1.6, som viser instrumentpanelet på et Cessna 172 sportsfly.

Fartmåler

Fartmåleren måler flyets egenfart i forhold til luften, som det passerer igennem. Instrumentet måler trykforskellen mellem overtrykket i pitotrøret (et spidst rør med hul i spidsen monteret under vingen eller på siden af flyet) og det statiske atmosfæriske tryk (målt via et lille hul på flyets krop nær cockpittet). Er

der ét instrument, som piloten helst vil have til sin rådighed, er det nok fartmåleren. Især under afgang, stigning, glidning og landing er det vigtigt at holde flyets egenfart korrekt.



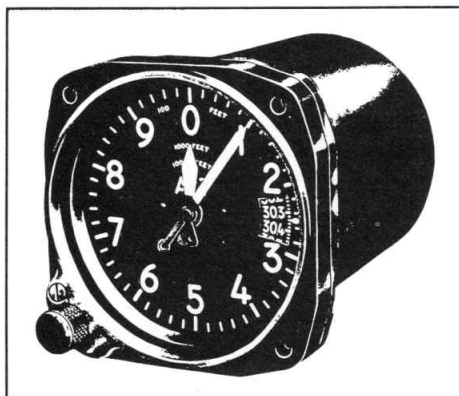
Figur 4.1: *Fartmåleren.*

Uden fartmåleren er der kun vindsusets lyd og trykket på styregrejerne, som kan give piloten en fornemmelse af flyets fart. Når man flyver, er det vigtigt ikke at "jage" fartmåleren. Når flyets fart skal ændres, korrigeres flyets stilling, og flyvestillingen holdes fikseret, indtil fartmåleren viser sin nye indstilling.

Højdemåler

Højdemåleren virker også på grundlag af trykmålinger, i dette tilfælde af det atmosfæriske tryk. Da det atmosfæriske tryk varierer fra sted til sted og fra time til time, skal højdemåleren justeres før og evt. også under flyvningen, hvis den skal give en korrekt visning. Man skal kende det aktuelle tryk ved havoverfladen (sommestider kaldet "QNH") og indstille dette tal i *Kollsman-vinduet* på

instrumentet. En anden mulighed – og den letteste – er at indstille højdemåleren, så den viser den korrekte elevation (højde over havet) ved lufthavnen, hvorfra man starter. Inden ankomst til en anden lufthavn kan man evt. spørge på QNH for at få en korrekt højdevisning under indflyvningen.

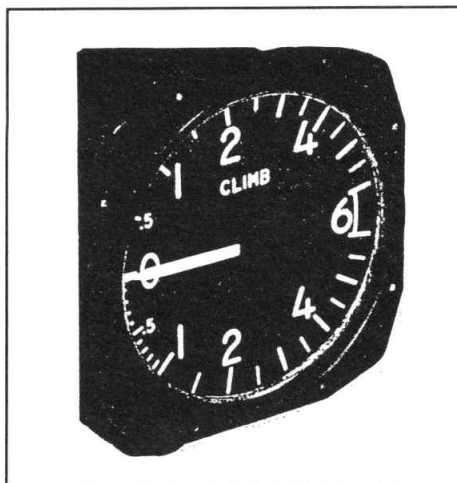


Figur 4.2: Højdemåleren.

Højdemåleren tager lidt tid om at indstille sig, når flyets højde ændres, og denne "træghed" skal piloten lære at tage hensyn til. F.eks. hvis du er ved at stige til 2000 fods højde, må du allerede ved 1950 begynde at gå over til ligeudflyvning. Tilsvarende må du flade ud lidt før, når du går ned til en lavere højde, så højdemålervisningen kan indhente flyets faktiske højde.

Variometer

Dette instrument viser flyets lodrette hastighed under stigninger, nedgange og vandret flyvning. Også dette instrument er tilsluttet flyets trykssystem. Variometret viser en udpræget træghed. For eksempel når man begynder at stige, kan der godt gå nogle sekunder, før dette registreres. Er instrumentet korrekt kalibreret, kan det være en god hjælp til piloten under ligeudflyvning, hvor det helst skal vise nul.

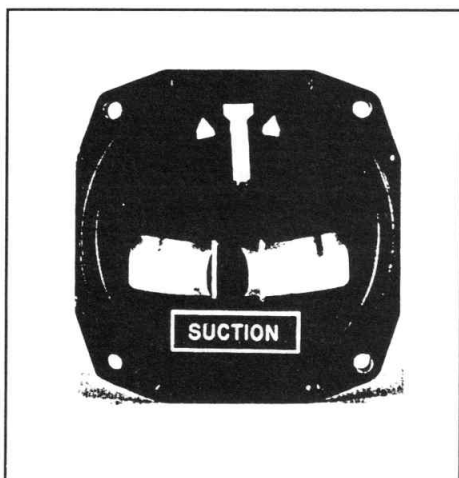


Figur 4.3: Variometret.

I praksis, f.eks. på en solrig dag, hvor der sker en betydelig opvarmning af atmosfæren, kan det i lav højde være meget svært at holde en konstant højde på grund af kraftige op- og nedadgående luftstrømninger. (Svæveflypiloter udnytter luftens opstigning til at vinde højde.) Dog finder man roligere luft over et par tusinde fod, og under natflyvninger kan luften være meget jævn.

Drejnings- og krævningsvisere

Disse to visere er normalt sammenbygget i et instrument. Drejningsviseren giver piloten meget vigtige informationer om flyets bevægelse omkring højaksen (dvs. når næsen vippes fra side til side). Den består af en lille kugle i et glasrør med to streger. Under et korrekt udført drej, hvor piloten koordinerer brugen af krængeror og sideror, forbliver kuglen på sin plads mellem de to streger. Er den ikke på plads, skal man give lidt mere sideror til den side kuglen har trillet fra midten. "Træd på kuglen." er en huskeregel til at minde herom.

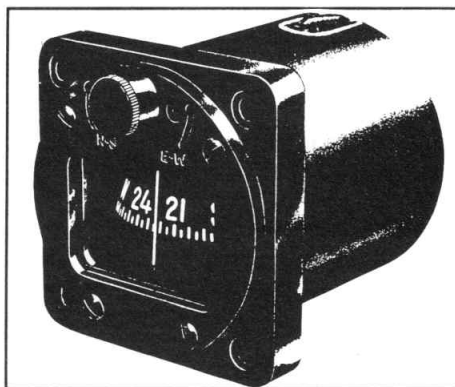


Figur 4.4: Drejnings- og krævningsviser.

Krævningsviseren er en bred, hvid nål lige ovenover kuglen – eller den kan være udformet som en vandret "vinge", som viser flyets krævnings i forhold til horisonten. Der er angivet mærker på viseren f.eks. for 0°, 15°, 30°, 45° og 60° krævnings. Under visse manøvrer, f.eks. et standarddrej, er det vigtigt at piloten holder den korrekte krævningsvinkel.

Drejnings- og krævningsviseren er et meget vigtigt instrument, når man flyver blindflyvning (instrumentflyvning), da man ellers ikke har en horisont at orientere sig efter. Uden horisont (eller uden straks at gå over til instrumentflyvning) vil de fleste piloter ende deres dage i et spiraldyk nogle få minutter efter, de har mistet deres udsyn til horisonten. Hvis ikke der er andre muligheder for at orientere sig, bliver det indre øre (balanceorganet) hurtigt forvirret på grund af de uregelmæssige accelerationer, som det udsættes for i et fly. Denne situation kan føre til svimmelhed, disorientering

og panik. Man skal med andre ord kende sine instrumenter godt og føle sig tryk ved at stole på dem. Flere alvorlige flyuheld her i landet i den senere tid tilskrives manglende rutine i instrumentflyvning.



Figur 4.5: Det magnetiske kompas skal anvendes sammen med kursgyroskopen.

Kursgyro og magnetkompas

Kursgyroen og det magnetiske kompas anvendes til at bestemme flyets retning i forhold til magnetisk nord. Fordi kompasset bliver kraftigt påvirket af flyets bevægelser under drej og højdeændringer, og på grund af den almindelige uro i luften, er det ofte svært at aflæse, og det viser sommetider forkert. Det er kun rimelig pålideligt under ligeudflyvning, og selv her skal man korrigere for et antal fejlkilder. Derfor har man et kursgyroskop.

Gyroskopet holder sin rumlige orientering meget stabilt under drej, stigninger og nedgange. Proceduren er derfor den, at man inden afgang skal indstille kursgyroen, så den stemmer overens med kompasset, normalt i forbindelse med checklisten lige inden start. Desuden skal man ca. hvert kvarter kontrollere under ligeudflyvning, at kompasset og kursgyroen stemmer overens.

Øvelse 4.1:

Eksperimentér lidt med et legetøjs-gyroskop eller et gyroskop fra fysiksamlingen. Sæt det i omdrejninger i det vandrette plan. Forsøg så at tvinge det i en anden stilling, og læg mærke til de kræfter, som modvirker disse ændringer.

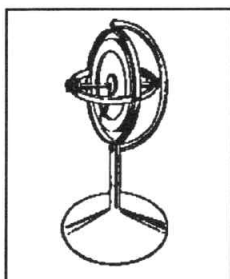


Fig. 4.6: Gyroskop.

Den kunstige horizont

Som nævnt er det uhyre vigtigt at kunne orientere sig visuelt i forhold til horisonten eller i mangel af denne mulighed at kunne støtte sig til sine instrumenter. Den *kunstige horizont* (også kaldet *gyrohorisonten*) er meget vigtig i denne forbindelse. Den er også meget brugt under VFR flyvning, altså flyvninger under visuelle flyveregler, dvs. når sigtbarheden er god. Instrumentet giver en direkte visning af flyets øjeblikkelige flyvestilling, både omkring længdeaksen (krængningen) og omkring tværaksen (næse op/ned).

Et flysilhouette, som er vandret og centreret i forhold til horisonten under ligeud flyvning, ses midt på instrumentet. Horisontlinien, som styres af gyroskopet, ses bag ved flysilhuetten, og den holder sin stilling i forhold til jordens virkelige horisont. Der er styrestreger, så 0°, 30° og 60° krængning (og normalt også 10° og 20°) kan aflæses. Korrekt indstilling af dette instrument hører med på checklisten, inden man letter.

Projektforslag 1: MÅLING AF OPDRIFTSKRAFTEN

Der er mange aktiviteter, som man kan få lyst til at udføre i forbindelse med studiet af flyvningens fysik, men det vil måske være mest naturligt at starte med at gennemføre nogle grundlæggende målinger. Har man en vindtunnel til disposition, kan det anbefales, at man benytter den til at måle opdriftskraften som funktion af såvel indfaldsvinklen som lufthastigheden. Et simpelt analytisk udtryk for opdriftskraften (som gælder for en bestemt vingeprofil) er f.eks. givet ved formelen:

$$(4.1) \quad F = c_L (0,4 + 5 A) v^2, \quad A < 0,28$$

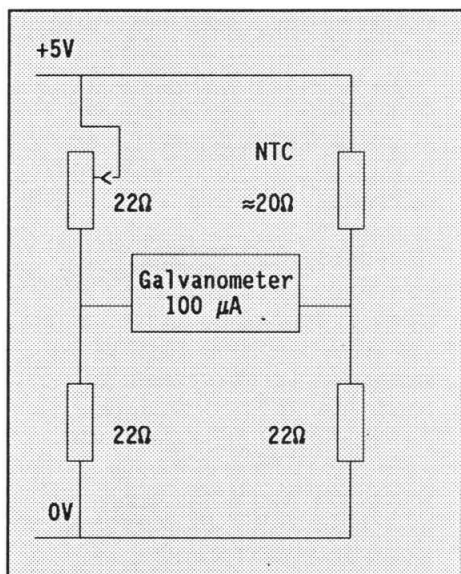
hvor c_L er opdriftskoefficienten, A er indfaldsvinklen i radianer og v er luftens hastighed i forhold til vingeprofilen. Bemærk begrænsningen, at A skal være mindre end 0,28 radianer (ca. 16°). Når vinklen bliver større, falder kraften hurtigt af (vingen staller).

Figur 4.8 viser et billede af en vindtunnel, som er lavet som elevprojekt i 1.G. Vingeprofilen til forsøg kan tages fra et modelfly, f.eks. et modelfly lavet af balsatræ, hvor vingen afsluttes med rispapir og lak. Vingeprofilen skæres til, så den passer til vindtunnelens bredde – i dette tilfælde var bredden ca. 12 cm. Plexiglas er benyttet som forplade, og forpladen er forsynet med et skydelåg, så man kan komme til at ændre indfaldsvinklen under målingerne.

Som blæser er der i denne opstilling benyttet en støvsuger, den samme som benyttes til en luftpudebænk. Til måling af lufthastigheden er der brugt en sort affaldspose med et rumindhold på ca. 100 liter. En sådan pose kan fyldes med luft i vores opstilling på 7 eller 8 sekunder. Valg af forskellige luftstrømnings-

hastigheder gøres ved regulering af støvsugermotoren.

Luftstrømningshastigheder er lettere at måle, hvis man konstruerer et instrument til formålet. Det kan laves ved hjælp af en NTC resistor, som indgår i den ene gren af en Wheatstones bro. Vi har brugt en NTC med en nominel resistans på ca. 20Ω , et 22 ohms potentiometer og to 22 ohms resistorer, som vist i følgende opstilling:

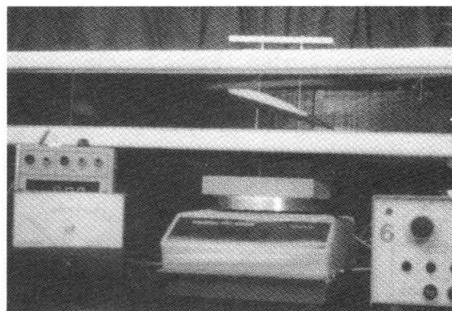


Figur 4.7: En Wheatstones bro med en NTC resistor i den ene gren kan bruges til at måle vindhastigheder.

Spændingen på 5 V er valgt således, at der går strøm nok gennem NTC resistoren til at varme den lidt op. Luftens passage køler den lidt af, forårsager en resistansændring og bringer broen ud af balance, så der går en strøm igennem galvanometret. Ved en vindhastighed på ca. 2 m/s er det observeret, at galvanometret gav fuldt udslag.

Kraftmålingen kan udføres som vist i

figuren, altså ved hjælp af en digitalvægt. Til en støttefod, der hviler på vægten, monteres to kraftige ståltråde (3 mm $\varnothing$), f.eks. fra en tøjbøjle. Disse bøjes omkring vindtunnelen, så de slutter lige ovenover vingeprofilen. Gennem nogle huller i toppen af vindtunnelen ophænges vingeprofilen, f.eks. ved hjælp af to 3 mm strikkepinde.



Figur 4.8: Vindtunnelen blev fremstillet i samarbejde med 1.G elever i forbindelse med deres projektarbejde.

Digitalvægten nulstilles, og når vingeprofilen påvirkes af luftstrømmen, bliver der en visning på nogle gram. Det viste sig i praksis, at opdriftskraften kunne måles med under én procents relative usikkerhed. Vinklen kan måles ved hjælp af en almindelig vinkelmåler, som holdes parallel med profilens kordlinie. Ved at gennemføre omhyggelige målinger, bør man være i stand til at eftervise opdriftsgrafen fra Figur 3.10.

FLYVNINGENS HISTORIE

Jeana Yeager og Dick Rutan

At flyve jorden rundt non-stop og uden brandstoftopfyldning undervejs var én af de sidste store flybedrifter, som i mange år ikke blev udført. Det blev gjort i december 1986 af en mand og en kvinde, som var ni dage om turen rundt om jorden. Jeana havde været husmor, teknisk tegner, landmåler, pilot og flysælger før hun endte som medarbejder hos Rutan Aircraft i Californien. Dick Rutan var pilot i det amerikanske luftvåben, inden han begyndte at arbejde for sin bror, flydesigneren Burt Rutan. Jeana, Dick og Burt var hovedpersonerne, som i 1982 traf beslutningen om at bygge en flyvemaskine, der kunne flyve 45.000 km.

Rutan Aircraft havde i en årrække fremstillet gør-det-selv samlesæt for piloter, der gerne vil bygge egen flyvemaskine. Firmaet havde mange erfaringer med glasfiberkonstruktioner og de nye, stærke, kulstofsfiberbaserede materialer, som skulle bruges til at lave et fly med så stor en rækkevidde. Gruppen regnede med, da de startede, at projektet ville tage ca. halvandet år at gennemføre. Der skulle gå fire år, før Jeana og Dick landede i Mohave-økenen i den sydlige Californien efter ni døgn i luften via Stillehavet, syd om Indien, det Indiske Ocean, Afrika, Atlanterhavet og Centralamerika. Læs bogen **Voyager** af Jeana Yeager for at få mere at vide om dette spændende projekt.

FLYVNINGENS HISTORIE:

Richard Byrd & Floyd Bennett

Ideen om at udforske polaregnene ad luftvejen var ikke ny, og ballonfærd til Nordpolen blev overvejet allerede i 1700-tallet. En svensk ingeniør, Salomon Andrée, havde forsøgt på at flyve i en ballon over Nordpolen med udgangspunkt på den norske ø Spitsbergen i 1897, dog uden held. Polarforsker Robert E. Peary, som selv nåede frem til Nordpolen via pakisen i 1909, bemærkede i 1920, at flyvemaskiner i løbet af få uger kunne kortlægge områder, som et hold på jorden ville være år om at udforske.

Som dreng havde Richard Byrd, nu officer i den amerikanske flåde, skrevet i sin dagbog, at han gerne ville være den første mand på Nordpolen. Da Peary allerede nåede frem til fods i 1909, bestemte Byrd, at han i stedet ville være den første til at flyve til Nordpolen. Han skaffede sig økonomisk støtte, såvel fra store erhvervsledere i USA (bl.a. fra Edsel Ford og John D. Rockefeller Jr.) som fra flåden. Efter nogle erfaringer med flyvninger over Grønland i 1925, iværksatte Byrd sine planer. Ekspeditionen skulle starte fra Kongebugten på Spitsbergen. Byrd anskaffede et Fokker Trimotor fly (opkaldt efter *Josephine Ford*, Edsels datter) med skilandingsstel til sin polarflyvning. Flyets rækkevidde var beregnet til ca. 2400 kilometer, netop den nødvendige for at nå frem til Nordpolen og tilbage igen.

Skibet *Chantier* samt forsyninger og skibets besætning af frivillige blev stillet til rådighed af den amerikanske flåde. På Spitsbergen var der også en norsk ekspedition ledet af nordmanden Roald Amundsen og Lincoln Ellsworth fra USA. Målet var at flyve til Nordpolen i et luftskib. Trods konkurrencemomentet var der et godt samarbejde mellem de to hold.

Floyd Bennett var den dygtige pilot og mekaniker, som skulle ledsage Admiral Byrd. Han testfløj *Josephine Ford* grundigt inden afrejsen, mens de ventede på gunstige vejrforhold. Den 7. maj 1925 blev flyet klargjort til turen med ca. 2500 liter benzin og flere hundrede kilo nødforsyninger (mad til to mand i 10 uger, en slæde, gummibåd, telt, økse, knive, primus, førstehjælpskasse, røgbomber samt geværer og patroner). Det lykkedes dem dog ikke at komme i luften den 8. maj, fordi flyet var for tungt. Efter at have fjernet en hel del kom de afsted den 9. maj kl. 01:30.

Bennett var pilot, og de fløj ca. 150 km/h i 2000 fod. Byrd var navigatør, og han lagde kursen direkte mod nord. Der var 1230 km til nordpolen. Da det magnetiske kompas var upålidelige på grund af afvigelser i jordens magnetfelt så langt mod nord, benyttede Byrd en *sekstant* til måling af solens stilling på himlen og en *afdriftsindikator* som kunne måle vindretningen ved at sigte lodret nedad. Byrd virkede som pilot og aflastede Bennett ind i mellem.

Flyvningen til Nordpolen skulle tage ca. otte timer. Men kort før deres mål begyndte olietrykket på den ene motor at falde. Trods dette fortsatte de, og de nåede frem til Nordpolen i strålende solskin. De kontrollerede deres position og optog billeder og film. På turen tilbage mod Spitsbergen havde de medvind, så deres fart i forhold til jorden (GS) kom op på 160 km/h. Klokken 16:30 samme dag nåede *Josephine Ford* og besætningen tilbage til Spitsbergen i god behold.

Efter at Byrd og Bennett havde hvilet ud, blev successen fejret med et stort gilde af begge ekspeditioner. Dagen efter tog den norske ekspedition afsted i deres luftskib medbringende en del ekstraudstyr, som Byrd og Bennett havde skænket dem. Luftskibet *Norges* polarfærd løb ind i flere vanskeligheder, men det er en hel anden historie...

Karakteristisk for alle de bedrifter og rekorder, som er nævnt på de foregående sider er, at de krævede omhyggelig planlægning og flyvemaskiner med stor rækkevidde. I denne forbindelse er *Breguets sætning* et vigtigt redskab.

$$(4.2) \quad R = 600 \cdot \left(\frac{E}{C}\right) \left(\frac{F}{D}\right) \log\left(1 + \frac{m}{M}\right)$$

Sætningen fortæller om rækkevidden (i km) R , der kan opnås, som funktion af fremdriftsnyttevirkningen E , det specifikke brændstofferbrug C , og forholdet mellem flyets opdriftskraft F og modstandskraften D . Desuden indgår massen af brændstoffet m og flyets masse M ved flyvningens afslutning.

Faktoren (E/C) er et udtryk for, at flyet skal have en "god benzinøkonomi": Motorernes fremdriftsnyttevirkning skal være stor i forhold til flyets brændstofforbrug. At (F/D) skal være stor betyder, at opdriftskraften, som vingefladerne udøver, skal være stor i forhold til modstandskræfterne på flyet. Endelig skal (m/M), dvs. forholdet mellem brændstoffmassen og flyets tomvægt, være stor, så $\log(1 + m/M)$ bliver stor. I tilfældet Voyager, for eksempel, var flyets tomvægt ca. 427 kg, og det skulle medbringe ca. 4061 kg brændstof.

Øvelse 4.2:

Beregn størrelsen af produktet af de to faktorer (E/C) og (F/D), hvis Voyager skal præstere en flyvetur på 45000 km.

Projektforslag 2: MÅLING AF STARTLØB

Bemærk, at der er to afstande, der er interessante, når et fly skal starte. Den ene er afstanden, som flyet ruller på jorden, inden det kommer i luften. Denne afstand kaldes *startløbet*. Den anden afstand, *startdistancen*, er den, som er nødvendig, før flyet kommer over en forhindring, som er 15 meter over banens højde.

Startløbet for et fly afhænger af en række forhold: flyets startvægt, banens beskaffenhed og hældning, brug af flaps, modvindskomponent, og lufttemperatur er nogle af de vigtigste faktorer. Betragt vi et Cessna 172 sportsfly, når lufttemperaturen er 15°C, kan man i tabeller fra flyets håndbog bl.a. aflæse de startdata, der er vist i Figur 4.9.

Hvis det er muligt at flyve i en Cessna (eller i et andet fly) sammen med nogle elever fra klassen, forsøg da følgende målinger. Kontrollér modvindskomponenten (vindens komponent, der virker

FLYVNINGENS HISTORIE Via en isflade til Antarktis

Også i nyere tid har dristige mennesker præsteret rekorder ved flyvning i polaregnene. Nordmanden Monica Kristensens private ekspedition til sydpolen i 1986 skulle bruge et mindre tomotors fly – en Twin Otter – til forsyningsopgaver i Antarktis. Problemet var bare, at flyet ikke havde tilstrækkelig stor rækkevidde til turen fra New Zealand til Cape Evans i Antarktis.

Løsningen blev, at mandskabet fra forskningsskibet Aurora, der befandt sig ca. halvvejs, lagde en landingsbane ud på en isflade og ventede klar med reservebrændstof. Maskinen, døbt *Oceanic Fox*, med Sven Ahlquist og Jan Fridén som piloter og Alan Laugesen som flymekaniker, fløj fra Invercargill (65°50'N) i 14 timer (ca. 2200 km) over det øde ishav. Sven Ahlquist fandt isfladen og tog bestik af vindforholdene ved hjælp af røgsignaler. Flyets ski tog banen få meter fra kanten af isfladen, og flyet blev bragt til standsning indenfor 250 meter.

Efter at besætningen havde fået en kort hvil, og brændstof og andre forsyningsvarer var blevet lastet om bord i flyet, skulle flyet afsted igen. Det ville tage mere plads at lette end at lande, især da flyet nu var tungt lastet. Desuden var snefladen blevet løs og fugtig, og med den øgede modstandskraft kunne flyet

direkte modsat flyets startretning).

ikke få fart nok på indenfor banens 740 meter. Flyet blev lettet for et par tønder benzin, og man besluttede at vente til næste morgen i håbet om, at overfladen kunne blive fastfrosen i løbet af natten.

Afgangen kl. 04 om morgenen beskrives således af Monica Kristensen: "Flyet starter, farer som en sort prik over fjeldets flade og fortsætter ud over kanten. Først går det i en lille bue ned mod havoverfladen, men så stiger det langsomt, langsomt." Og senere: "Klokken 9 om morgenen rapporterer Sven over radioen, at han er landet ved Cape Evans uden problemer. Jeg har tårer i øjnene af lettelse."

Der findes normalt en vindhastighedsmåler i lufthavnens radiorum.

STARTLØB - CESSNA 172

Temp: 15°C - Flaps op - Havoverfladen

Vægt:	773 kg	909 kg	1045 kg
Modvind			
0 knob	133 m	192 m	264 m
10 knob	88 m	133 m	187 m
20 knob	53 m	84 m	123 m

NB: Ved større elevationer er startløbet længere. F.eks. ca. 50% længere ved en elevation på 5000 fod. Startløbet er ca. 10% længere for hver 15°C stigning over standardværdien.

Figur 4.9: Ovenstående tabel er et uddrag fra Flyvehåndbogen for et sportsfly.

Benyt en tegning af lufthavnen eller direkte opmåling til at sætte nogle markeringer af – f.eks. bambuspinde med nogle små flag – der viser afstande

langs startbanen fra en aftalt startposition. Et par elever skal indtage en position med kikkerter eller videokamera, således at flyets startløb kan observeres. Bed piloten om at starte med forskellige startvægte, f.eks. med ingen, én, to eller tre passagerer om bord, og notér i hvert tilfælde startløbet. Husk på, at flyet bruger nogle liter brændstof mellem hver start, og man bør ud fra kendskab til brændstofforbruget per minut korrigere herfor. Desuden skal du kende flyets tomvægt, pilotens vægt og vægten af det brændstof, som flyet starter med. Lav en graf eller tabel, der viser startløbet som funktion af flyets totalvægt.

ADVARSLER: I må normalt ikke færdes på lufthavnsområdet i nærheden af rulleveje og startbaner uden tilladelse. Inden der sættes flag op eller laves målinger, skal I have tilladelse af de lokale lufthavnsmyndigheder. Dette bliver normalt betydeligt lettere at opnå ved en lille lufthavn. Hvis I skal skiftes til at flyve PAS PÅ PROPELLEN ved passagerskifte. Nogle piloter vil helst have motoren slukket under af- og påstigninger. Lav en klar aftale med jeres pilot om, hvordan dette skal ordnes.

Projektforslag 3: FLYETS STIGNINGSEVNE, MM.

Hvis man er med til målingerne af startløb, kan man samtidig lave målinger af flyets stigningsevne. Vægtene på flyet og passagerer er måske kendte fra Projekt 2. Tag tid på stigningen, fra det øjeblik flyet letter, til det er kommet i en højde på f.eks. 300 meter over banen (dvs. 1000 fod over startelevationen). Lav en graf, der viser denne tid som funktion af startvægten.

Det kan også være interessant at undersøge flyets evne til at stige, f.eks. fra 1000 fods højde til 2000 fods højde.

Bemærk opstigningstid og variometer-visning. Passerinstrumenterne sammen? Hvis stigningen kan fortsætte til 3000 fod, 4000 fod og evt. til 5000 fod, læg mærke til, om stigningsraten aftager. Under start og stigning aflæs udetemperaturen for hver 500 fod (der er normalt et termometer i forbindelse med ventilationsluftindtaget). Tegn en graf, der viser udetemperaturen som funktion af højden. Normalt bør temperaturen falde med ca. 3°C for hver 1000 fod.

Projektforslag 4: VINDENS INDVIRKNING PÅ FLYET

Denne opgave kræver også, at man er i luften. Inden start bør man orientere sig om vindhastigheder og især retninger i forskellige højder, f.eks. 1000 fods og 2000 fods højde. Desuden skal man ved hjælp af et landkort eller flyvekort finde nogle letgenkendelige observationspunkter, f.eks. et kryds mellem to større veje, et vandtårn eller lignende.

Ekspperimentet går ud på at undersøge vindens indvirkning på flyets bevægelse, når flyet bevæger sig parallel med vinden, altså direkte *med* eller *mod* vindens retning. Vælg en passende flyvehøjde og marchhastighed, og vælg to observationpunkter, A og B, der ligger nogle få kilometer fra hinanden og på en linie, der er parallel med vindens retning. Flyv forbi det ene punkt med vinden i ryggen, og find tiden t_1 for flyvningen fra A til B. Vend om, og mål tiden t_2 for flyvningen tilbage igen fra B til A. Lad afstanden $|AB| = s$. Betegn vindens hastighed v og flyets hastighed c . Da $\text{afstand} = \text{hastighed} \cdot \text{tid}$, har vi:

$$(4.3) \quad s = (c + v) t_1 \quad \wedge \quad s = (c - v) t_2$$

Vi er ude på at finde vindens hastighed v ud fra vores kendskab til afstanden s og til de to tidsmålinger t_1 og t_2 . Ved at

omskrive ligningerne, fås $s/t_1 = (c + v)$, og $s/t_2 = (c - v)$. Trækker vi nu den anden ligning fra den første får vi:

$$(4.4) \quad s(1/t_1 - 1/t_2) = 2v$$

som kan reduceres til:

$$(4.5) \quad v = \frac{1}{2} s(t_2 - t_1)/(t_1 \cdot t_2)$$

Husk på, at alle størrelserne skal være i SI enheder, så hastigheden v bliver i m/s.

Øvelse 4.3:

Du ankommer til en fremmed flyveplads. Din egenfart gennem luften er 200 km/h. Du er usikker på, om banen er lang nok. Du skal bruge en banelængde på minimum 650 meter. En røgsøjle viser, at vindretningen er parallel med banen. Du overflyver pladsen, og ved hjælp af et stopur kan du konstatere, at det tager 9,8 sekunder at passere med vinden i ryggen og 12,0 sekunder at passere, når du flyver lige op imod vinden. Hvad er banens længde s ? Hvad er vindhastigheden v ?

Øvelse 4.4:

Benyt evt. de formler, som du udleder her, og afprøv metoden med en bane af kendt længde med kendt vindhastighed. Vurdér usikkerheden, som er forbundet med denne metode. Er denne usikkerhed "til at leve med", hvis metoden skulle benyttes i praksis?

Projektforslag 5: DEN JÆVNE CIRKELBEVÆGELSE

I Kapitel 3 så vi, at når flyets egenfart er lig med v hænger krængningsvinklen θ sammen med cirkelns radius r ved at:

$$(4.6) \quad \tan \theta = v^2/(rg)$$

hvor g er jordens tyngdeacceleration ($9,82 \text{ m/s}^2$). Find et egnet sted, f.eks. et vandtårn eller lignende, hvor man kan lave nogle 360° drej uden at genere lufttrafik eller folk på jorden. Vælg en passende hastighed (f.eks. $180 \text{ km/h} = 50 \text{ m/s}$), og udfør nogle drej ved krængningsvinkler på 15° , 30° og 45° . Lad medhjælperen i flyet finde kendingsmærker på jorden, der senere kan anvendes til at bestemme cirkelbanens radius. En anden mulighed er, at man kan måle tiden T , som det tager for at udføre et fuldstændigt drej på 360° . Tager drejet f.eks. 60 sekunder med en egenfart på 50 m/s , ved man at cirkelns omkreds er på 3000 m , diameteren er på $3000/\pi \approx 955 \text{ meter}$, og cirkelns radius er derfor ca. 477 meter .

Forsøg evt. at lave et standarddrej (et drej på 360° på 2 minutter) i det fly, som du flyver i. Et standarddrej anvendes bl.a., som nævnt i Kapitel 3, i et holding pattern, når man venter på landings-tilladelse under en instrumentflyvning. Den rigtige krængningsvinkel kan findes, når man kender flyets egenfart v :

$$(4.7) \quad \tan \theta = v^2/(rg) \quad \wedge \quad v = 2\pi r/T$$

Elimineres r fra disse ligninger, fås:

$$(4.8) \quad \tan \theta = 2\pi v/(Tg)$$

I et fly, der har en egenfart gennem luften på 50 m/s , må krængningsvinklen θ således være på $14,93^\circ \approx 15^\circ$.

Øvelse 4.5:

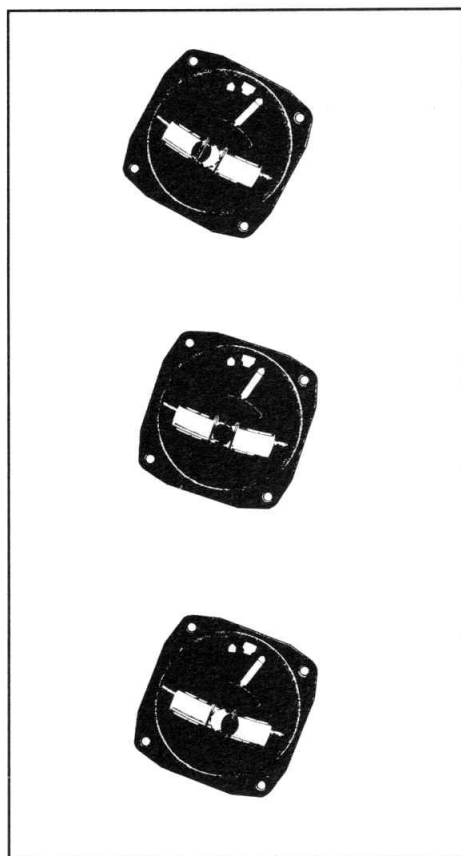
Antag, at et DC-9 har en egenfart på 194 knob i et holding pattern. Hvilken krængning skal piloten benytte under et standarddrej? Hvilken krængning skal en F-16, der flyver med 388 knob , bruge, når der skal udføres et standarddrej? Hvilken diameter har flyets bane under et standarddrej? Hvilken G -påvirkning oplever piloten under et sådant drej?

Øvelse 4.6:

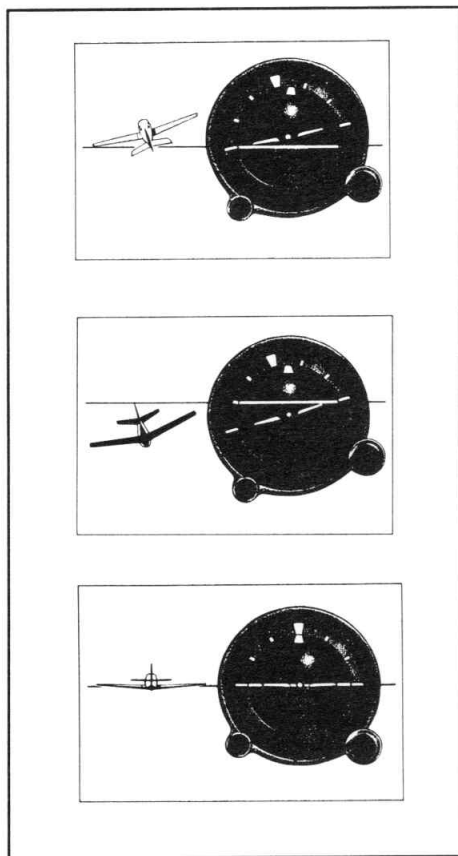
En flyvemaskine befinder sig i en højde på 1000 meter over jorden, og den har en konstant fart på 360 km/h , når den begynder at rette op fra et lodret dyk. Tegn et billede, der viser situationen, idet vi går ud fra, at flyet følger en cirkelbane med radius r under opretning for derefter af flyve vandret. Af gode grunde skal denne radius være mindre end 1000 meter . Undersøg størrelsen af den maksimale centripetalkraft i forhold til flyet vægt, når baneradius er på 250 meter , 500 meter og 750 meter . (VINK: Husk at tage hensyn til tyngdekraften.)

Øvelse 4.7:

Figur 4.10 viser drejnings- og krængningsviserne under forskellige situationer (a), (b) og (c). Hvordan bevæger flyet sig i disse situationer? Fortæl i hvert tilfælde, hvad piloten bør gøre, for at flyets drej bliver velkoordineret.



Figur 4.10: Drejnings- og krægningsviserne under forskellige drej.



Figur 4.11: Illustrationen viser gyrohorizonten under forskellige flyvestillinger.

Øvelse 4.8:

For at flyve med sikkerhed, når man ikke kan få øje på jordens horisont, og for at lette flyvningen i almindelighed, er det vigtigt, at man kan fortolke gyrohorizonten. Figur 4.11 viser gyrohorizonten under forskellige flyvestillinger. Beskriv i hvert af tilfældene (a)-(c), hvilken flyvestilling flyet befinder sig i.

KONKLUSION

Pladshensyn forhindrer, at vi fortsætter studiet af flyvningens fysik i dette hæfte. Emnet er meget omfattende, og der findes en stor mængde litteratur om emnet. Den interesserede læser henvises derfor til litteraturlisten i Appendix B. I Appendix A findes en kort beskrivelse af ét af de mange udmærkede flysimulations-programmer, som findes i dag. Her er også gode muligheder for at lære mere om flyvning.

Appendiks A - Flysimulation på computer (Flight Simulator)

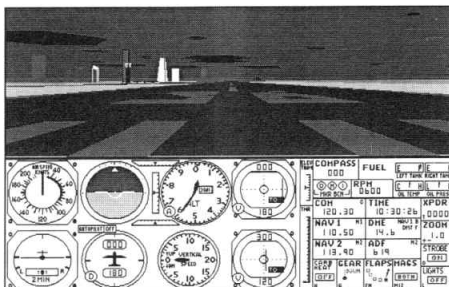
NØDVENDIGT UDSTYR OG PROGRAMMEL

Man kan anvende EDB-programmet Flight Simulator med ret beskedent udstyr. En almindelig 8086 IBM PC eller kompatibel maskine kan godt anvendes. Eneste krav er, at der skal være en grafisk skærm. Den største fornøjelse fås dog, når man har adgang til en hurtig maskine, f.eks. én som anvender en 80286 eller 80386 microprocessor. Skærmdisplay med farver – EGA eller VGA grafik, som det hedder – er bedst, for hermed fås skarpe, farverige billeder. Flight Simulator findes i flere udgaver, bl.a. til Commodore 64 og Amiga computere, men udgaven, der beskrives her, er version 4.0 til IBM PC'ere.

EN PRØVEFLYVNING MED FLIGHT SIMULATOR:

Der er et meget stort antal muligheder for at anvende Flight Simulator. Man kan lave almindelig VFR flyvning (med god sigtbarhed), IFR flyvning (instrumentflyvning), navigationsøvelser, landingsøvelser, flyve fra den ene ende af USA til den anden, flyve Cessna, Lear-Jet eller Sopwith Camel. Det, som beskrives her, er en ganske enkel flyvetur, som man f.eks. kunne prøve for lige at komme i gang. Det interessante ved programmet er, at det giver en virkelighedstro model af flyets instrumenter og opførsel i luften. Eneste væsentlige forskel er, at du skal benytte datamatens taster (eller mus eller joystick) i stedet for det virkelige styregrej. Dette betyder, at man ikke får den samme fornemmelse i hænder og fødder, som man ville få i et rigtigt fly. Til gengæld er der flere fordele: dels er flyvetimer med

simulatoren "gratis", og dels må du gerne begå alvorlige fejl, f.eks. styrte ned, uden at det gør skade.



Figur A.1: Her ses startbanen ved Meigs Lufthavn i Chicago. Forsøg at identificere alle instrumenterne.

Når man starter programmet op, skal man vælge den rigtige maskine- og skærmtypen og vælge "Normal Flight Mode", så man kan flyve selv. Når programmet starter op, befinder man sig i cockpittet på startbanen på Meigs Lufthavnen i Chicago, som vist i Figur A.1. Vi er på bane 36, dvs. flyets næse vender direkte mod magnetisk nord. Læg mærke til, at instrumentpanelet har alle de rigtige instrumenter. De vil reagere korrekt under din flyvning. Her kan man virkelig lære meget. Desuden virker navigationsradioerne korrekt, og der er flere radiofyr i området, vi kan bruge, når vi kommer i luften.

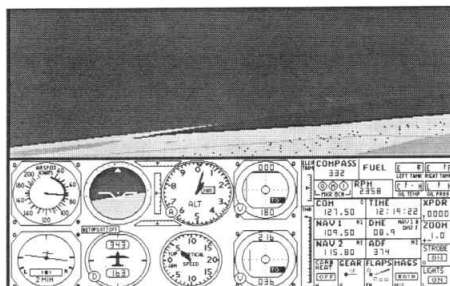
For at krænge (når tastaturet anvendes) skal man bruge højre og venstre cursorpiltasterne på højre side af tastaturet. For at "flytte styregrejet fremad/tilbage" skal man benytte cursorpil op/ned tasterne. Prøv nu inden start. Læg mærke til, at der er en indikator på skærmen mellem den kunstige horizon og højdemåleren. Den viser højderorets stilling.

(Denne viser er der ikke på et rigtigt fly, men den er nødvendig her, så man kan "se", i hvilken stilling styregrejet står.) Flaps styres ved hjælp af "F-tasterne", <F5> (flaps helt oppe) til <F8> (helt nede). Dit gashåndtag er <F2> (mindre gas) og <F3> (mere gas). <F1> sætter gassen straks til nul, og <F4> giver fuld gas (PgUp/PgDn virker også til at give/tage gassen).

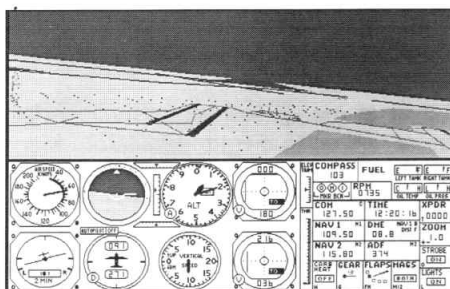
OK, nu starter vi. Vi sætter lidt flaps – trykker på <F6>-tasten for at få "et hak" flaps – ca. 10 grader. Vi holder nu <F3>-tasten nede, indtil vi har givet fuld gas. Er der lyd på din monitor, kan man høre motorens omløbstal stige. Når fartmåleren (øverst t.v.) viser ca. 60 knob, kan man "trække lidt tilbage i styregrejet" (tryk et par gange på pil-ned). Flyet bør lette. Så snart vi er sikkert i luften, tager vi landingsstellet op ved at taste på "G". En lille viser på højre side af instrumentpanelet bør vise, at GEAR er "UP". Stigningsfarten bør være omtrent 70 knob, og variometret (lige under højdemåleren) bør vise en stigningsrate på omkring 500 til 1000 fod i minuttet.

Når vi passerer 1000 fods højde, taster vi <F5> for at bringe flapsene helt op. Bemærk, at næsen vil falde lidt, fordi opdriften reduceres. Vi trækker en smule tilbage med næsen for at kompensere herfor. Vi holder øje med alle instrumenterne og forsøger at holde kursen konstant. Når flyets højde nærmer sig de 2000 fod, kan vi godt tage lidt af gassen (<F2>) og skubbe næsen lidt nedad (pil-op). Man lader næsen indtage en stilling, og lægger så mærke til, om flyet holder højden. Stiger det, skal man skubbe næsen en smule nedad og så vente. Mister flyet højde, skal man trække en smule tilbage og så vente lidt. Flyet bør indtage en stabil ligeudflyvestilling.

Nu skal vi til at dreje. Lad os prøve et drej mod venstre. Vi vil forsøge at finde O'Hare lufthavn, Chicagos hovedlufthavn med mange landingsbaner. Der er også et radiofyr midt på lufthavnsområdet (NAV 2 er stillet på 113,90). Vi krænger mod venstre ved at bruge venstre pil, indtil krængningsvinklen er omtrent 30 grader.



Figur A.2: Under et svagt stigende drej. Bemærk instrumenternes indstillinger.



Figur A.3: Flyet er nu i et nedadgående drej mod venstre.

Når krængningsvinklen er nået, skal krængerorene centrereres igen, mens flyet drejer. Dette gøres lettest ved at taste tallet "5" lige midt imellem pil-tasterne. Hold øje med kursgyroen (lige under den kunstige horizon), og ret op, når din kurs er på ca. 300 grader. Man skal begynde at rette op noget før, så man ender med at rulle ud på den rigtige kurs. Man skal hele tiden holde lidt øje med højdemåleren og variometret.

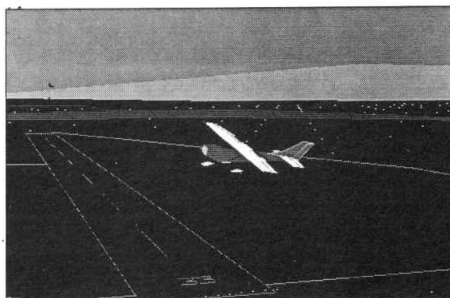
Skub næsen en smule fremad eller træk lidt tilbage (tast et par gange på pil op eller pil ned), så man holder højden på 2000 fod.

Vi går ud fra, at det er lykkedes dig at rulle ud på en kurs på 300 grader i en højde af 2000 fod. Læg nu mærke til VOR nålen på NAV 2 (Fjerde instrument fra venstre i nederste række.) Det bør vise 300 som kurs, og der bør stå "TO" i det lille røde vindue. Er nålen til venstre for midten, betyder det, at flyet er til højre fra den ønskede "radial" fra radiofyret, dvs. en usynlig radiolinie, som har en retning på 300 grader direkte igennem senderen. Derfor skal vi lave en kurskorrektio n til venstre for at komme mod radialen.

Et drej på 10 eller 20 grader fra vores nuværende kurs på 300 grader er passende. Når vi nærmer os radialen, kommer nålen tættere og tættere på midten af instrumentet. Når nålen er i midten, kan vi rette kursen tilbage igen til de 300 grader og følge radialen direkte mod lufthavnen. Alt dette forudsætter, at der ikke er afdrift pga. vinden. Er der det, skal man ændre flyveretningen, så næsen vender en smule til venstre for eller til højre for den ønskede kurs på 300 grader. Denne afdrift kan man korrigere for, observere nålen i nogle minutter, og så give en større eller mindre korrektion, som er nødvendig, for at blive på radialen. Lige nu bør der ikke være nogen vind, så kursen på 300° bør være god nok.

Har man fulgt denne vejledning, bør O'Hare lufthavn nu være i sigte. Herfra er det helt frit, hvor vi vil flyve hen. Én mulighed er, at vi flyver mod syd. Der er flere lufthavne i denne retning. Konsulter manualen for at skifte om til de andre VOR sendere, så de kan bruges til at finde vej. En anden

mulighed er at vende om til den modsatte kurs (120 grader) og flyve tilbage til Lake Michigan. Når vi lander (eller er styrtet ned!), kan vi fremkalde en analyse af vores flyvning ved at vælge "1". Der er mange muligheder.



Figur A.4: Mens man flyver, kan flyet observeres udefra fra et ledsagerfly.

Blandt de særdeles lærerige muligheder, som Flight Simulator tilbyder, er, at man kan observere flyets bevægelse udenfor flyet. F.eks. kan man vælge at se sin flyvning fra et ledsagerfly, der flyver lige ved siden af. Dette er illustreret i Figur A.4, hvor man ser flyet lige efter afgang. Det er især instruktivt at observere flyet, når det laver en "stall", så man får mulighed for at se præcis, hvordan denne manøvre arter sig, inden man selv prøver i et rigtigt fly.

Appendiks B - Litteratur og adresseliste

LITTERATUR OM FLYVNING

Disse og mange andre bøger på dansk er til rådighed på bibliotekerne, hos boghandleren eller ved henvendelse til Kongelig Dansk Aeroklub (KDA). Desuden har KDA selv et bibliotek med et stort udvalg af bøger på dansk, engelsk og andre sprog.

Per Weishaupt, **Motorflyvehåndbogen**, Flyv's Forlag, København 1970.

Per Weishaupt, **Svæveflyvehåndbogen**, Flyv's Forlag, København 1980.

Flypassagerens Hvem, Hvad, Hvor, Alt om flyvning, flytyper og lufthavne, København, 1979.

Bladet "Flyv" udgives af KDA, se adresselisten.

Finn Brinch, **Flyvemeteorologi**, 1981.

Glenn Brinks, **Ultralight Propulsion**, 1982.

Robert N. Buck, **Weather Flying**, Macmillan, New York, 1970.

Robert N. Buck, **Flying Know-How**, Delacorte Press, New York, 1975.

Wolfgang Langewiesche, **Stick and Rudder**, McGraw-Hill, New York, 1944
(en klassisk lærebog om flyvning).

John R. Hoyt, **Safety after Solo**, Pan American Navigation Service, Inc., Hollywood, California, 1970.

John R. Hoyt, **As the Pro Flies**, McGraw-Hill, New York, 1959.

Private Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402, 1965. (Kan købes til meget rimelig pris ved henvendelse til denne adresse.)

Aviation Weather, FAA, Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, Washington DC 20402, 1965. (Også til rådighed fra Govt. Printing Office i USA.)

ADRESSELISTE:

Kongelig Dansk Aeroklub (KDA), Lufthavnsvej 28, DK-4000 Roskilde
telefon: 42 39 08 11, telefax: 42 39 13 16. Her vil du kunne købe bøger, kort og andre materialer vedr. flyvning. Ved indmeldelse i KDA kan man også låne bøger fra deres bibliotek og modtage bladet "Flyv". Fra KDA kan du rekvirere en aktuel liste over danske flyveklubber.

Statens Luftfartsvæsen (SLV), Ellebjergvej 50, DK-2450 København SV
telefon: 36 44 48 48, telefax: 36 44 03 03. Vil man videre med en luftfartsuddannelse kan man få yderligere informationer ved henvendelse hertil. SLV udgiver også en række publikationer, f.eks. rapporter fra Havarikommissionen. Fra SLV kan du få kontaktinformationer (adresser og telefonnumre) til danske flyveskoler.

Stikordsregister

Acceleration	13,20	Galilei, Galileo	19
Ahlquist, Sven	38	Gashåndtag	6
Akser, flyets	5	General Dynamics	10
Antarktis	38	Grønland	18
Arealsætningen	14	Gyrohorizont	42
Atlanterhavet	24	Gyroskop	34
Basislinien	6	Halefinne	5
Bekendtgørelsen	3	Haleplan	5,25
Bellonte, Maurice	16	Hangarskib	15,17
Bennett, Floyd	36	Hastighed	12
Bevægelsesligninger	15	Hastighedstabel	11,49
Bevægelseslovene	20	Højakse	5
Boeing 747	30	Højdemåler	31
Breguets sætning	37	Højderor	5
Byrd, Richard	36	Holding pattern	29
Cape Evans	38	Indfaldsvinkel	23
Centripetalkraft	28	Instrumentpanel	8
Cessna 172	7,27	Jævn bevægelse	11
Checkliste	30	KDA	46
Cirkelbevægelse	29,41	Kernestoffet	3
Costes, Dieudonne	16	Kongelig Dansk Aeroclub	46
DC-9	12	Kordlinie	23
DC-10	10,14	Kraft	19
Drejningsviser	32,42	Kraftmoment	25
Earhart, Amelia	15	Kræfter på et fly	23
EDB program, projekt	28	Kræfter, sammensætning	21
EDB program, simulation	43	Krængeror	5
Ekskursion	3	Krængningsviser	32,42
F-16	10	Kristensen, Monica	38
Fart	12	Kritisk indfaldsvinkel	23
Fartmåler	31	Kursgyro	33
Finalen	6	Landingsrunden	6
Flaps	5	Lasteplan	27
Flyets akser	5	Lastning af fly	26
Flysimulation	4,43	Ligevægt, flyets	25
Flyvesikkerhed	30	Ligevægt, stabil	26
Formelsamling	49	Lindbergh, Anne Morrow	24
Fridén, Jan	38	Lindbergh, Charles	3,15,24
		Længdeakse	5

Magnetkompas	33	Vingeprofil	34
Masse	19	von Gronau, Wolfgang	18
Massemidtpunkt	25	Voyager	36
Medvindsben	6		
Mekanisk fysik	3	Wheatstones bro	35
Modstandskraft	23		
Momentarm	25	Yeager, Jeana	36
Nær omverden	3		
New Zealand	38		
Newtons 1. lov	20		
Newtons 2. lov	20		
Newtons 3. lov	20		
Newton, Isaac	19		
Newtons love	19		
Noonan, Fred	15		
Nordpolen	36		
Opdriftskraft	23,28,34		
Orteig-prisen	24		
Relativ vindretning	23		
Rutan, Dick	36		
Rækkevidde	37		
Sammensætning, kræfter	21		
SAS	10,18		
Sideror	5		
SLV	46		
Stall	6,23,28		
Startløb	38		
Statens Luftfartsvæsen	46		
Stigningsevne	39		
Styregrej	5		
Styrepind	5		
Tirstrup lufthavn	30		
Trafikrunden	6		
Trækkraft	23		
Tværakse	5		
Tværvindsben	6		
Twin Otter	38		
Tyngdeacceleration	13		
Variometer	32		
Vindens indvirkning	40		
Vindtunnel	35		
Vinge	23		

FORMELSAMLING:

Jævn bevægelse (s 11-12):

$$v = s / t$$

$$s = s_0 + v(t - t_0)$$

Accelereret bevægelse (s 13-15):

$$s = \frac{1}{2} a t^2$$

$$v(t) = v_0 + a(t - t_0)$$

$$s(t) = v_0(t - t_0) + \frac{1}{2} a(t - t_0)^2$$

$$v^2 = v_0^2 + 2 a s$$

Newtons love (s 19-20):

$$F=0 \Leftrightarrow a=0$$

$$F = m a$$

$$F_1 = -F_2$$

Momentsætningen (s 25):

$$\sum_i F_i \cdot a_i = 0$$

Jævn cirkelbevægelse (s 28-30, 41):

$$a = v^2/r$$

$$\tan \theta = v^2/(r \cdot g)$$

$$\tan \theta = 2\pi v/(T \cdot g)$$

Hastighed fra passagetider (s 40):

$$v = \frac{1}{2} s(t_2 - t_1)/(t_1 \cdot t_2)$$

Nogle omsætningsfaktorer for hastighed:

	km/h	m/s	miles/h	knot
1 km/h=	1	0,2278	0,6214	0,5399
1 m/s =	3,600	1	2,2371	1,9438
1 mi/h=	1,609	0,4470	1	0,8689
1 knot=	1,8521	0,5145	1,1509	1



ISBN 87-87229-52-8