

MATERIALESAMLING

FYSIK, FLY OG FLYVNING – A- OG B-NIVEAU

INDHOLD

Introduktion.....	2
Modul 1: Flyet starter	3
Modul 2: Tryk og luftens densitet.....	10
Modul 3: Opdrift.....	14
Modul 4: Energiforbrug ved flyvning.....	19
Modul 5: Flyvning over jordoverfladen.....	22
Modul 6: Forberedelse af virksomhedsbesøg og afsluttende opgave.....	28
Afsluttende opgave: Logistik: Planlægning af en konkret flyvetur.....	29

Materialet er udviklet af
Bjørn Svenningsen, gymnasielærer, Herlev Gymnasium og HF
og DA Åben Virksomhed

Introduktion

Dette materiale er en del af et undervisningsforløb til fysik på A eller B-niveau, hvor du også skal på besøg i flybranchen. Hovedvægten er lagt på at forstå de fysiske principper i flyvning, og der vil også være opgaver omkring energiforbrug. Viden om dette er kan bidrage til at gøre flyvning mere bæredygtigt.

Dette materiale fokuserer alene på den fysik, der ligger til grund for flyvning, og forholder sig ikke til den igangværende politiske debat om CO₂-udledning, flyrejser og bæredygtighed. Klassen kan evt. arbejde med dette i efterfølgende timer eller i andre fag.

Undervisningsforløbet er opdelt i 6 moduler før virksomhedsbesøget og 2 moduler efter virksomhedsbesøget, hvor klassen arbejder med en slutopgave.

Eksperimenter, der er markeret med  , kan udføres, hvis man skal ud at flyve.

Modul 1: Flyet starter

Flyet skal have fart på for at lette. Det sætter fuld kraft på jetmotorerne, drøner ud ad startbanen og accelererer op til hastigheden for takeoff. Men hvor lang skal banen være, for at dette kan lade sig gøre? Og hvilken hastighed bruger flyet for at lette? Og hvor stor effekt præsterer motorerne?

Det grundfaglige indhold: Stedfunktion $s(t)$, hastighedsfunktion $v(t)$ og accelerationsfunktion $a(t)$ samt sammenhængen mellem disse: $s'(t) = v(t)$ og $v'(t) = a(t)$. Desuden den jævnt voksende bevægelse (bevægelse med konstant acceleration). En krafts effekt er givet ved $P = F \cdot v$, hvor F og v er ensrettede.

Vi kan iagttage flyets bevægelse på 2 måder:

1. Vi kan betragte flyet udefra. Hvis vi optager en film af flyet, mens det starter, så kan vi bestemme flyets stedfunktion.
2. Vi kan sidde inde i flyet. Så kan vi måle flyets accelerationsfunktion.

De 2 forskellige måder at undersøge flyets bevægelse på skal naturligvis stemme overens.

Vi vil først se på en beskrivelse, hvor accelerationen er konstant. Denne form for bevægelse kaldes også en jævnt voksende bevægelse.

Flyets start beskrives som en jævnt voksende bevægelse

Accelerationen er konstant. Vi kan igen betragte denne bevægelse set fra jorden og set fra flyet.

1. Set fra jorden er flyets stedfunktion sådan, at når den differentieres 2 gange, så giver den en konstant acceleration, a . En matematisk løsning på dette problem er, at stedfunktionen er et andengradspolynomium (side 19 i kompendium i Fysik, Fysikforlaget 2012). Hvis du med videoanalyse undersøger stedfunktionen for bevægelsen, så finder du formodentlig, at et andengradspolynomium er en god model for stedfunktionen.

$$s(t) = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 + v_0 \cdot t + s_0$$

$$v(t) = a \cdot t + v_0$$

$$a(t) = a$$

2. Hvis du sidder inde i flyet, så vil du observere, at du presses tilbage i sædet under start. Ryglænet accelererer dig fremad med en kraft, der er bestemt ved Newtons II lov, $F = m \cdot a$. Matematisk kan vi gå den modsatte vej af ovenfor. Hastighedsfunktionen er en funktion,

som differentieret giver a , det vil sige, at $v(t)$ er stamfunktion til a , og stedfunktionen $s(t)$ er en funktion, som differentieret giver $v(t)$. $s(t)$ er en stamfunktion til $v(t)$. Formlerne for $v(t)$ og $a(t)$ bliver som ovenfor.

Opgave 1.1

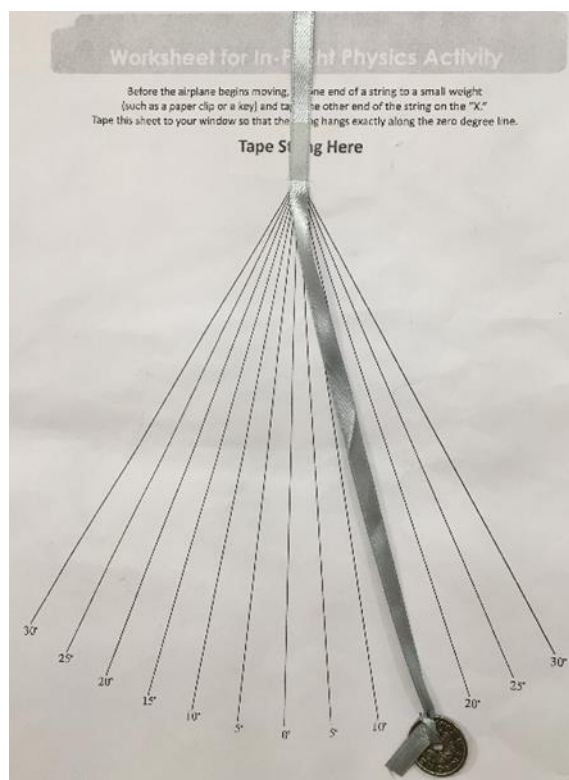
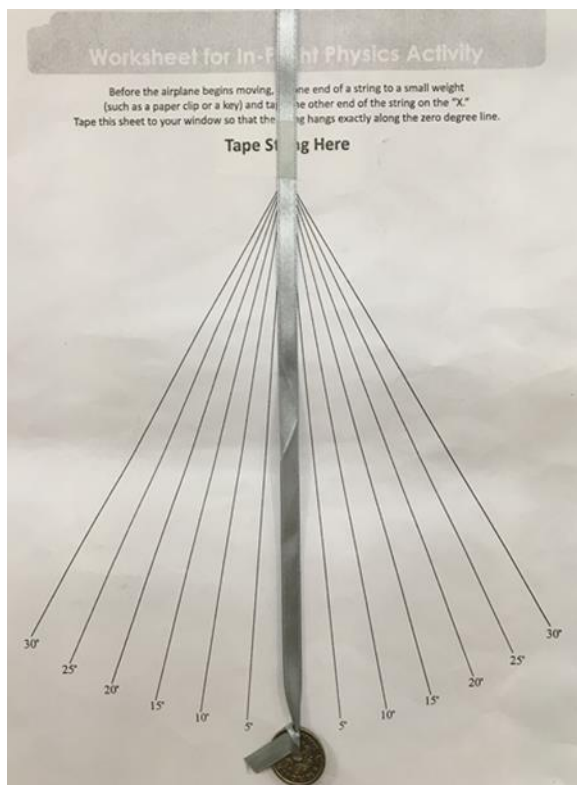
Vi tænker os, at vi har foretaget en videoanalyse af en flystart. Vi sørger i analysen for, at start-hastigheden v_0 er 0 til tiden 0, og at startstedet s_0 er 0 til tiden 0. Når vi sørger for dette, så bliver stedfunktionen meget simpel nemlig $s(t) = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$.

I et eksperiment har vi fundet stedfunktionen $s(t) = 1,48 \text{ m/s}^2 \cdot t^2$:

1. Bestem $v(t)$ ved differentiation af $s(t)$. Bestem hastigheden efter 10 sekunder.
2. Bestem accelerationen ved differentiation af $v(t)$. Bliver accelerationen konstant?
3. Flyet hastighed ved takeoff skal være 75 m/s. Benyt hastighedsfunktionen til at bestemme det tidspunkt, hvor flyet er klar til takeoff.
4. Hvor langt har flyet bevæget sig på startbanen ved takeoff?
5. Hvis du i slutopgaven vælger at arbejde med en bestemt flytype, så find oplysninger på nettet om dette flys hastighed ved takeoff.

Opgave 1.2

De 2 billeder viser en mønt i en snor inde i et fly foran en "gradskive". Det venstre billede viser situationen, før flyet starter, og det højre viser situationen under accelerationen. Ud fra de 2 billeder kan man finde flyets acceleration.



Gradskiven kan findes via dette link (på side 3 og 4):

<http://howthingsfly.si.edu/sites/default/files/attachment/ScienceinyourAirplaneSeat.pdf>

Møntens masse er 6 g. Bestem tyngdekraften på mønten. Vælg enhed og tegn tyngdekraften på venstre billedet. Der er en snorkraft opad på mønten. Den er lige så stor som tyngdekraften, så den resulterende kraft er 0, og mønten accelereres ikke og hænger stille.

Højre billede kan analyseres således: Tyngdekraften er som før. Der er en kraft på mønten skråt opad i snorens retning. Hvis vi tegner snorkraften, så den lodrette del ophæver tyngdekraften, så bliver den vandrette komponent lig med den resulterende kraft, og vi kan bestemme accelerationen ud fra Newtons II lov.

1. Bestem flyets acceleration a .
2. Bestem den resulterende kraft på dig selv, hvis du sad i flysædet.
3. Billedet er taget inde i en B737-800 med en angivet vægt ved start på 60 tons. Bestem den resulterende kraft på flyet under accelerationen.

Eksperiment E.1.1 Videoanalyse

Hvis du får lejlighed til det, så foretag en videoanalyse af en flystart. Det er en god ide at øve sig inden. Du kan lave eksperimenter på skolen med et frit fald, med en vogn, der kører ned ad et skråplan, med en filmoptagelse af tog, bus, bil eller andet, der starter. I denne forbindelse er det vigtigt:

- at filme fra en retning vinkelret på bevægelsesretningen
- at holde en afstand, så hele bevægelsen kan være i billedfeltet
- at holde kameraet helt stille under optagelsen
- at have en form for målestok på billedet i samme afstand som det filmede objekt
- at hvis man filmer fly, så kan flyets længde bruges som målestok

Filmen kan f.eks. analyseres i LoggerPro, som beskrevet her på YouTube:

https://www.youtube.com/watch?v=jaQ_X6MPuwE&feature=youtu.be&hd=

I linket analyseres en badmintonbolds fald, men metoden er den samme, når du skal analysere et fly, der starter.

Se i øvrigt sidst i Modul 1, hvis du ikke synes, at accelerationen er konstant.



Eksperiment E1.2 Accelerationsmåling

Accelerationsmålingen med en mønt, et nøglebundt eller et lod i en snor, opgave 1.2 ovenfor, kan afprøves i tog, bus eller bagsædet på en bil. Man kan også installere en app på sin mobiltelefon, der kan måle acceleration (f.eks. "G"), eller man kan bruge en accelerationsmåler, hvis der er en i fysiksamlingen på gymnasiet. Anvendelse af app'en under flyvning kræver, at telefonen må være tændt i flight mode, hvilket de fleste flyselskaber tillader. Alternativt må man holde sig til den lavteknologiske løsning.

Så længe man holder ig til den jævnt voksende bevægelse, så kan man forsyne bevægelsesligningerne med et par formler mere. Husk i øvrigt, at accelerationen godt kan være negativ:

$$v^2 - v_0^2 = 2 \cdot a \cdot (s - s_0)$$

Desuden kan man til en hurtig beregning benytte, at tilbagelagt strækning divideret med gennemsnitshastighed er lig med tiden.

Opgave 1.3

Et fly lander. Flyet har hastigheden 70 m/s, i det øjeblik hjulene rører landingsbanen. Opremsningen foregår med en konstant negativ acceleration over strækningen 1.000 m.

1. Beregn flyets acceleration under opbremsningen. Benyt $v^2 - v_0^2 = 2 \cdot a \cdot (s - s_0)$
2. Hvor lang tid varer opbremsningen?
3. På et tidspunkt er hastigheden halvdelen af de 70 m/s, nemlig 35 m/s. Hvilken strækning har flyet tilbagelagt, når det har hastigheden 35 m/s?

Opgave 1.4

Jagerfly, der skal starte på et hangarskib, har en meget kort startbane til rådighed, og accelerationen er stor under start.

Et jagerfly skal starte fra en startbane på 80 m. For at komme i luften skal hastigheden være 260 km/h.

1. Omregn starthastigheden til enheden m/s.
2. Beregn accelerationen under start.
3. Accelerationen divideret med tyngdeaccelerationen kaldes også G-faktoren. Beregn G-faktoren.

En ikke jævnt voksende bevægelse

Vi ser på en bevægelse i en dimension. Den resulterende krafts effekt er bestemt ved kraft gange hastighed. $P = F \cdot v$.

Det vil dog betyde, at holder vi kraften og dermed accelerationen fast, så stiger effekten proportionalt med hastigheden. Det er derfor næppe realistisk at fastholde den høje acceleration under

hele starten. I praksis må den aftage. Det fænomen kender vi også fra bilkørsel. Man kan accelerere kraftigt ved lav hastighed, men ikke så voldsomt ved høj hastighed.

Hvis du laver videoanalyse eller undersøger acceleration i et køretøj eller fly under start, så vil du formodentlig finde frem til en aftagende accelerationsfunktion, $a(t)$. Der gælder stadig at $v'(t) = a(t)$ og $s'(t) = v(t)$.

Nedenstående opgave 1.5 handler netop om dette. Det er en eksamensopgave i Fysik A, som vi har forsynet med et par ekstra spørgsmål.

Opgave 1.5

Airbus



Et fly af typen Airbus 321 har massen 69,0 ton.

1. Beregn størrelsen af tyngdekraften på flyet. Når flyet sætter i gang på startbanen, er det påvirket af en gnidningskraft, der har størrelsen 70,7 kN. Motorerne frembringer en fremadrettet kraft på flyet med størrelsen 284 kN.
2. Beregn flyets acceleration, når det sætter i gang. Flyet sætter i gang til tiden $t = 0$ s. På vej hen ad startbanen stiger gnidningskraften, og accelerationen som funktion af tiden er:

$$a(t) = -0,044 \frac{\text{m}}{\text{s}^3} \cdot t + 3,1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Flyet letter efter 29 sekunder:

3. Bestem flyets fart, når det letter.
4. Beregn, hvor langt flyet bevæger sig på startbanen, inden det letter.
5. Vi ser bort fra gnidningskraften. Beregn den resulterende kraft som masse gange acceleration og effekten som kraft gange hastighed
6. Bestem den maksimale effekt. Sammenhold med oplysninger, du kan finde på nettet om denne flytype.

Eksperiment E1.3 Flystart

Du kan filme et startende fly med henblik på videoanalyse, eller du kan filme et lod i en snor, hvis du sidder i et startende fly. Noter dig desuden flytype, så du kan søge oplysninger om flyet.

Herefter kan du analysere bevægelsen. Brug ovenstående opgave som inspiration til, hvad du kan undersøge og udregne.

Hvis du hverken skal ud at flyve eller har mulighed for at filme en flystart, så kan du følge et flys start på: <https://www.flightradar24.com/55.62,372.64/14>

Her får du dog ikke så mange detaljer med. Du kan få hastigheden med nogle sekunders mellemrum og ud fra dette beregne accelerationen. Desuden kan du benytte højden til at bestemme, hvornår flyet letter.

Modul 2: Tryk og luftens densitet

Muligheden for at flyve afhænger af luftens egenskaber, først og fremmest lufttrykket og luftens densitet.

Det grundfaglige indhold: Tryk, trykket i en gassøjle, densitet, absolut temperatur.
Supplerende stof: Densitetens afhængighed af tryk og temperatur.

Tryk

Tryk defineres som kraft pr. arealenhed. Trykket har betegnelsen p (pressure):

$$p = F/A \text{ med enheden } [p] = \frac{N}{m^2} = \text{pa (pascal)}$$

Enheden $1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ pa}$ er en meget lille enhed i forhold til atmosfæretrykket. Vores normale tryk ved jordoverfladen kalder vi 1 atm og $1 \text{ atm} = 101325 \text{ pa}$.

Luften trykker, fordi den vejer noget. Når luften trykker med 101.325 N på hver m^2 , så må det være, fordi tyngdekraften på luften over hver m^2 er 101.325 N . Massen, m , af luft over hver m^2 er bestemt ved $F = m \cdot g$, og dermed er $m = 101.325 \text{ N} / (9,82 \text{ m/s}^2) = 10.318 \text{ kg}$. Der ligger altså mere end 10 tons luft oven over hver kvadratmeter af jordoverfladen.

Opgave 2.1

Stemplet i en cykelpumpe har arealet 5 cm^2 . Du presser luften sammen med en kraft på 200 N .

1. Omregn arealet til m^2 .
2. Beregn trykket inde i pumpen målt i pa.
3. Beregn trykket målt i atm.

(Bemærk, at det tryk, du på denne måde beregner, er overtrykket i forhold til atmosfæretrykket).

Opgave 2.2

Vi skal se på, hvilke kræfter flyets nødudgang er påvirket af.

Ved flyvning i stor højde er trykket inde i kabinen $0,80 \text{ atm}$ og trykket udefra $0,25 \text{ atm}$:

1. Skal nødudgangen konstrueres, så den åbnes indad eller udad? Begrund dit svar.

Nødudgangen har højden 120 cm og bredden 90 cm :

2. Beregn den samlede kraft udad på nødudgangen og indad på nødudgangen fra lufttrykket, samt summen af de 2 kræfter.

Opgave 2.3

I praksis anvendes mange forskellige enheder for tryk:

1. Find eksempler på trykenheder, f.eks. i databogen (DATABOG fysik kemi, F & K forlaget).
2. Dæktryk måles tit i psi. Hvad står psi for?

Luftens densitet

Densitet er masse pr. rumfang. Symbolet for densitet er ρ (rho). Der gælder således:

$$\rho = m/V \text{ og } [\rho] = \frac{kg}{m^3}$$

Den atmosfæriske lufts densitet ved temperaturen 0oC og trykket $p_0 = 1 \text{ atm}$ er $\rho_0 = 1,29 \text{ kg/m}^3$. Densiteten ændrer sig, hvis temperaturen eller trykket ændres.

Eksperiment E2.1 Luftens densitet

Et lille eksperiment, hvor man bruger en cykelpumpe til at pumpe luft i en beholder. Beholderen vejes før og efter. Så kender man massen af luft, der er pumpet ind. Herefter lukkes luften ud og opsamles, så man finder rumfanget, og densiteten kan beregnes.

Vejledningen er først på tysk og derefter på engelsk: <https://shop.skolebutik.dk/images/pdf/20730.pdf>.

Hvis trykket stiger, så presses luften sammen, og densiteten stiger. Ved trykket p bliver densiteten af luften:

$$\rho = \rho_0 \cdot p/p_0 \text{ (større tryk giver større densitet)}$$

Hvis temperaturen stiger, så udvider luften sig. Hver rumfangsenhed vil derfor indeholde færre luftmolekyler, og densiteten bliver mindre. I dette tilfælde skal vi også gange med en brøk af temperaturen, men vi kan ikke bruge celsius-temperaturen. Vi skal omregne til absolut temperatur eller kelvin ved at lægge 273,15 grader til.

Eksempel:

$t = 0^{\circ}\text{C}$ svarer til $T_0 = 273,15\text{ K}$

$t = 25^{\circ}\text{C}$ svarer til $T = (25 + 273,15)\text{ K} = 298,15\text{ K}$

$t = -10^{\circ}\text{C}$ svarer til $T = (-10 + 273,15)\text{ K} = 263,15\text{ K}$

Densiteten ved den absolutte temperatur T er således:

$$\rho = \rho_0 \cdot T_0/T \text{ (større temperatur giver mindre densitet)}$$

Opgave 2.4

I højden 4 km er luftens tryk ca. 0,6 atm. Sæt temperaturen til 0°C .

Beregn luftens densitet under disse forhold.

Opgave 2.5

Omregn disse temperaturer til absolutte temperaturer:

1. 20°C
2. 35°C
3. -35°C

Opgave 2.6

1. Find på nettet en flyrute fra en lufthavn, der ligger et koldt sted til en lufthavn, der ligger varmt.
 2. Find de aktuelle temperaturer de 2 steder.
 3. Beregn luftens densitet de 2 steder. Du kan regne med, at trykket i begge tilfælde er 1 atm.
- (I næste modul vil vi se, at luftens densitet betyder en hel del for flyvning. Piloten skal tage højde for temperaturen ved start og landing).

Lufttrykket op gennem atmosfæren

Trykket i en gassøjle kan bestemmes ved denne formel:

$$p = p_0 - \rho \cdot g \cdot h$$

Hvor p_0 er trykket i bunden af gassøjlen, p er trykket i højden h , og ρ er luftens densitet.

Formlen siger, at lufttrykket aftager lineært med højden, men dette er jo kun sandt, så længe densiteten er konstant, men densiteten er ikke konstant. Den bliver mindre, når trykket bliver mindre, og det gør det jo, når man bevæger sig opad.

Alt i alt vil trykkets aftagen være proportional med trykket selv, og dette er netop opskriften på en aftagende eksponentialfunktion.

Halveringskonstanten er ca. 5,5 km.

En omtrentlig model for atmosfærens tryk er dermed:

$$p = 1 \text{ atm} \cdot (1/2)^{(h/5,5 \text{ km})}$$

Formlen er ikke nøjagtig, fordi den ikke tager højde for temperaturen op gennem atmosfæren. Du kan finde en tabel med lidt bedre værdier i databogen (DATABOG fysik kemi, F & K forlaget) under opslaget "Atmosfæren".

Opgave 2.7

Bestem trykket og luftens densitet i 8 km højde ved beregning eller opslag i databogen.



Eksperiment E 2.2. Luftmængden over os

Hvis du flyver, så bemærk, at den skyfri blå himmel over dig bliver mørkere, jo længere flyet kommer op. Himlen over os er blå, fordi solstrålerne over os afbøjes af luftens molekyler. Jo mindre luft, desto mørkere himmel.

Hvis du er ude at flyve, kan du eventuelt måle dette med en lysmåler i kamera eller mobiltelefon. Mål op mod himlen væk fra solen, når du lige er kommet over skyerne og i stor højde, når du er længst oppe.

Modul 3: Opdrift

Det grundfaglige indhold: Kræfter og tryk, sammensætning af kræfter, Newtons 2. og 3. lov.
 Desuden på A-niveau: Impulssætningen ($\Delta p = F \cdot \Delta t$).
 Supplerende stof på A- og B-niveau: Bernoullis lov.

Det er luftens strømning omkring vingerne, der forklarer opdriften på fly. Vi skal se på to bidrag til at holde flyet oppe: Bernoullis lov og det fænomen, at en skråtstillet vinge kan presse en luftstrøm nedad, hvorved vingen selv presses opad (Newtons 2. og 3. lov).

Vi ser på nogle eksempler på beregninger af opdrift fra de to bidrag. Det vil dog vise sig, at de to adskilte bidrag ikke er helt nok til at forklare hele opdriften på flyet, men beregningerne viser princippet i, hvad der sker.

Bernoullis lov

Når et profil omstrømmes af luft, vil trykket være lavest, der hvor lufthastigheden er højest. Man laver vingernes oversider krumme. Det bevirker, at de luftmolekyler, der bevæger sig over vingen, bevæger sig hurtigere end de molekyler, som passerer under vingen.



Man kan beregne trykket i den strømmende luft ved hjælp af følgende formel (Bernoullis lov): $p = p_0 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$, hvor p_0 , er lufttrykket i stillestående luft, og p er trykket i den strømmende luft. Luften strømmer med hastigheden v , og luftens densitet er ρ . Formlen viser, at trykket er lavest i den hurtigst strømmende luft.

Det er også forklaret her:

<https://spoerg-piloten.dk/hvordan-skabes-lift-til-at-fa-flyet-til-at-lette/>

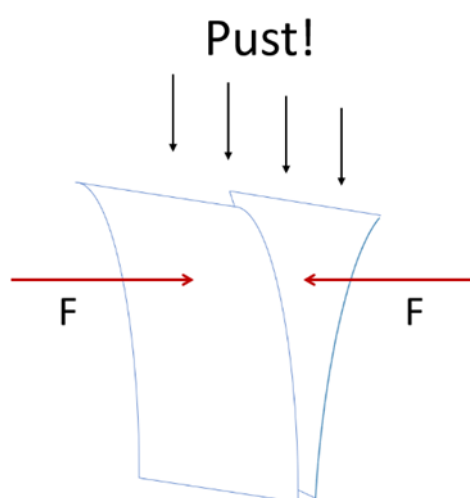
Her er nogle eksempler på beregning med Bernoullis lov. Beregningerne er grove vurderinger. Det, der sker omkring en flyvinge, er kompliceret, og i praksis laver man både beregninger og modelforsøg, når man skal konstruere fly.

Man kan eventuelt lave eksperimenter med en blæser og en vingeprofil. Blæseren i fysiksalen kan give en lufthastighed på omkring 18 m/s. Vi tænker os, at atmosfæretrykket er 101,3

kPa = 101.300 Pa og densiteten af luft 1,29 kg/m³. Temperaturen er 0 oC. Trykket i den strømmende luft er dermed:

$$P = 101.300 \text{ Pa} - \frac{1}{2} \cdot 1,29 \text{ kg/m}^3 \cdot (18 \text{ m/s})^2 = 101.091 \text{ Pa}$$

Så relativt er blæserens ændring af trykket meget lille, men det er nok overraskende for de fleste, at trykket bliver mindre i den strømmende luft. Trykket ændres fra 101,3 kPa til 101,1 kPa. Det er lige på grænsen til, at vi kan måle trykforskellen med en almindelig trykmåler, men vi kan godt måle opdriften på en vinge.



Bernouillis princip kan vi på en meget enkel måde illustrere med to stykker papir. Lufthastigheden er størst imellem de to stykker papir, hvor trykket derfor vil være mindst. Overtrykket på ydersiderne vil derfor give en indadrettet kraft og vil få papirstykkerne til at bevæge sig sammen.



Opstilling til måling af opdriften på en flyvinge. Vingemodellen står på en vægt. Luften blæses ind fra højre. Vingens vinkel med vandret aflæses på vinkelmåleren på vingens nærmeste ende. Luftens hastighed måles med vindmåleren til 9,5 m/s. Vægten var nulstillet, inden blæseren blev tændt. Den viser nu -8,6 gram, altså en reduceret vægt svarende til en opdrift. Man kan undersøge opdriften som funktion af vindhastighed og som funktion af vinkel med vandret.

Her kommer nogle overslagsberegninger, der bygger på de to bidrag til opdrift:

Opdrift ifølge Bernoulli

Et fly har en hastighed på ca. 270 km/h = 75 m/s ved start. Vingens profil er sådan, at luftstrømmen over vingen er 20 pct. større end under vingen, så luftens hastighed sætter vi groft til 75 m/s under vingen og 90 m/s over vingen. Ved start er $p_0 = 101.300 \text{ Pa}$.

Så bliver trykket under vingen $p = 101.300 \text{ Pa} - \frac{1}{2} \cdot 1,29 \text{ kg/m}^3 \cdot (75 \text{ m/s})^2 = 97.672 \text{ Pa}$.

Trykket over vingen bliver $p = 101.300 \text{ Pa} - \frac{1}{2} \cdot 1,29 \text{ kg/m}^3 \cdot (90 \text{ m/s})^2 = 96.076 \text{ Pa}$.

Trykforskellen mellem overside og underside af vingen er $97.672 \text{ Pa} - 96.076 \text{ Pa} = 1.596 \text{ Pa} = 1.596 \text{ N/m}^2$.

Vingernes areal (f.eks. for en Airbus 300) er i alt 260 m^2 .

Så bliver den samlede opdrift lig trykforskel gange areal $= 1.596 \text{ N/m}^2 \cdot 260 \text{ m}^2 = 414.960 \text{ N}$.

Det svarer til tyngdekraften på massen $m = F/g = 414.960 \text{ N}/(9.82 \text{ N/kg}) = 42.265,6 \text{ kg}$ eller ca. 42,3 tons.

Det svarer stort set til massen af en Airbus 300 uden brændstof, men med brændstof vejer den 80 tons, og de 80 tons skal vi have til at lette.

Opgave 3.1.

Gentag beregningen af opdriften i 11 km højde, hvor densiteten af luften er ca. 1/4 af densiteten ved jordoverfladen og hastigheden 900 km/h.

Opgave 3.2

Gentag beregningen af opdriften ved jordens overflade med en hastighed ved takeoff på 300 km/h.

Opgave 3.3

Gentag beregningen ved jordens overflade med samme atmosfæretryk som før, men med lavere densitet, fordi temperaturen er hele 35°C.

Opdrift fra skråtstillet vinge

Vi antager, at vingen er glat og flad på undersiden, og at den er vippet lidt opad, så vingen danner en vinkel på 10° med vandret. Flyet skal lette og bevæger sig fremad med 75 m/s.

I forhold til vingen kommer luftmolekylerne farende opad med en hastighed på $75 \text{ m/s} \cdot \sin(10^\circ) = 13,0 \text{ m/s}$.

Luften sendes nedad med samme hastighed, så luften får alt i alt en hastighedsændring i lodret retning på $2 \cdot 13,0 \text{ m/s} = 26,0 \text{ m/s}$.

Vi ønsker at finde den opadrettede kraft på flyet, og den beregnes som den nedadrettede kraft på luften. Her benytter vi Newtons 3. lov. Desuden anvendes impulssætningen:

$$\Delta p = F \cdot \Delta t = m \cdot \Delta v \text{ og dermed}$$

$$F = (m/\Delta t) \cdot \Delta v, \text{ hvor } (m/\Delta t) \text{ er den masse luft, der rammes pr. sekund.}$$

Hvis vi igen tager en vinge med arealet 260 m^2 , så er massen af luft, der rammer pr. sekund, lig med:

$$260 \text{ m}^2 \cdot \sin(10^\circ) \cdot 75 \text{ m/s} \cdot 1,29 \text{ kg/m}^3 = 4.360 \text{ kg/s.}$$

$$F = 4.360 \text{ kg/s} \cdot 26,0 \text{ m/s} = 113.365 \text{ N}.$$

Det svarer til tyngdekraften på massen $m = F/g = 113.365 \text{ N}/(9.82 \text{ N/kg}) = 11.544 \text{ kg}$ eller ca. 11,5 tons.

Opgave 3.4

Gentag beregningen, når flyet er oppe i 11 km højde med tilsvarende lavere densitet af luft, og hastigheden er marchhastighed (hastigheden, når flyet er oppe i fuld flyvehøjde og tilhørende hastighed) 900 km/h.

Modul 4: Energiforbrug ved flyvning

Det grundfaglige indhold: En krafts arbejde, luftmodstand, brændværdi, virkningsgrad, kinetisk, potentiel og mekanisk energi.

Vi skal se på energiforbruget ved flyvning. Der skal bruges energi til at få flyet op i fart. Denne energi kaldes kinetisk energi. Der skal desuden bruges energi til at løfte flyet højt op. Denne energi kaldes potentiel energi. Summen af potentiel energi og kinetisk energi kaldes mekanisk energi.

Under flyvningen skal der bruges energi til at overvinde luftmodstanden. Jo højere man flyver, desto mindre er lufttrykket og dermed luftmodstanden, så det gælder om at flyve højt for at minimere energiforbruget. På den anden side skal der være tilstrækkelig luft til at skabe den opadgående kraft, så flyet kan holde sig flyvende. Det er en balance. På kortere strækninger kan det ikke betale sig at flyve helt så højt og hurtigt. Så spares der lidt på den kinetiske og potentielle energi.

De forskellige energiformer og energiomsætninger er beskrevet nedenfor:

Kinetisk energi

Bevægelsesenergi kaldes også kinetisk energi. Den kinetiske energi afhænger af massen af det, der bevæger sig, m , og af hastigheden, v . Formelen for kinetisk energi er:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Den kinetiske energi er altså proportional med massen, hvilket nok ikke er overraskende. Den er også proportional med hastigheden i 2. potens, hvilket er værd at lægge mærke til.

Når du indsætter i formlen: $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$, så skal massen, m , måles i kg og hastigheden v i m/s. Resultatet kommer så ud i J.

Potentiel energi

Hvis en tung genstand skal løftes op, så kræver det energi, men man kan få energien igen ved at lade genstanden synke ned igen. Denne mulighed for at få energien igen er begrundelsen for at kalde denne beliggenhedsenergi for potentiel energi.

Den potentielle energi beregnes som masse gange tyngdeacceleration gange højde:

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h$$

Massen, m , måles i kg, tyngdeaccelerationen $g = 9,82 \text{ m/s}^2$ og højden, h , måles i m. Så kommer den potentielle energi E_{pot} ud i J.

Mekanisk energi

Summen af kinetisk og potentiel energi kaldes mekanisk energi:

$$E_{mek} = E_{kin} + E_{pot}$$

Det giver god mening at slå kinetisk og potentiel energi sammen til 1 energi, for de 2 energier omsættes nemt til hinanden. Hvis man er højt oppe og dermed har stor potentiel energi, så kan man få fart på ved at glide nedad og hermed veksle potentiel energi til kinetisk energi.

Opgave 4.1

En lastet A321 har vægten 80 tons. Flyet skal op i højden 11 km, og det skal have hastigheden 890 km/h:

1. Beregn flyets tilvækst i potentiel energi.
2. Beregn flyets tilvækst i kinetisk energi.
3. Beregn flyets tilvækst i mekanisk energi.

Luftmodstand

Formlen for luftmodstand er:

$$F_{luft} = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$

Hvor c_w er den såkaldte formfaktor, ρ er luftens densitet, A er flyets tværsnitsareal set forfra, og v er flyets hastighed. Formfaktoren c_w er et dimensionsløst tal, der angiver, hvor strømlinet flyet er. Hvis flyet var helt kantet, ville formfaktoren være tæt på 1, mens et strømlinet fly kan have en formfaktor på 0,1-0,2.

Opgave 4.2

En A321 flyver med hastigheden 890 km/h i 11 km højde, så luftens densitet er $0,36 \text{ kg/m}^3$. Flyets tværsnitsareal vurderes til ca. 25 m^2 . Formfaktoren sættes til 0,15:

1. Omregn hastigheden til enheden m/s.
2. Beregn luftmodstanden målt i N.
3. Beregn den nødvendige effekt til at overvinde luftmodstanden.
4. Beregn energiforbruget pr fløjet kilometer til at overvinde luftmodstanden.

Modul 5: Flyvning over jordoverfladen

Grundfagligt indhold: Hastigheder som vektorer, cirkelbevægelse og centripetalkraft.

Flyvning i vind

Så snart et fly er lettet, så bevæger det sig i forhold til den omgivende luft, og hvis det blæser kraftigt, så kan det betyde meget for flyets hastighed i forhold til jorden. Når vi kommer op i stor højde, så kan vindhastighederne være meget store, op til 200 km/h. Hvis flyet flyver i medvind, så skal vindhastigheden lægges til flyets hastighed i forhold til luft (TAS = True Air Speed) for at få hastigheden i forhold til jord (GS = Ground Speed) og trækkes fra i modvind.

Opgave 5.1

Vi planlægger en flyvning fra København til New York og retur. Ruten er næsten vest ud og øst hjem. Flyet bevæger sig med hastigheden 860 km/h i forhold til den omgivende luft (TAS).

Vindhastigheden i de høje luftlag er 100 km/h fra vest mod øst, og afstanden København-New York er 6.197 km:

1. Beregn GS fra København mod New York.
2. Hvor lang tid tager flyveturen fra København til New York.
3. Beregn GS fra New York mod København.
4. Hvor lang tid tager turen fra New York til København.
5. Prøv at søge en returrejse til New York på nettet. Hvilke rejsetider angives?

Opgave 5.2

Man kan nogle gange blive overrasket over, hvor de lange flyruter fører os hen. Den korteste vej mellem 2 steder på jorden går langs en storcirkel, og den kan man vise ved at tage en snor og stramme den ud mellem de 2 punkter på en globus.

Benyt en globus og en snor til at afgøre følgende:

1. Vi flyver direkte den korteste vej fra København til Mexico City. Hvilken kurs skal vi holde, når vi letter fra København?

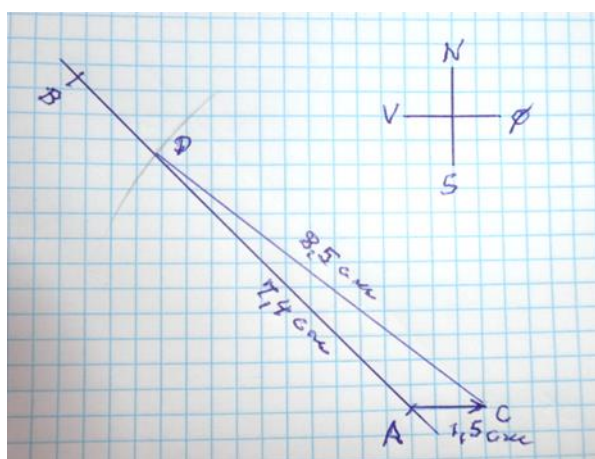
2. Vi tager den direkte vej fra København til Auckland, New Zealand, men vi mellemlander midtvejs. Hvor er det?

I opgave 5.1 fløj vi direkte mod vinden eller direkte med vinden. Det behøver ikke at være sådan. Nedenfor ser vi på den situation, at vi skal flyve skråt i forhold til vinden.

Vi skal flyve fra A til B, og retningen fra A til B er NV (kurs 315°). Vi flyver med hastigheden 850 km/h i forhold til luften. Vindhastigheden er 150 km/h fra vest mod øst.

Vi kan opfatte både vindhastigheden og flyhastigheden i forhold til vinden som vektorer. Summen af de 2 vektorer skal gå i den rigtige retning, så vi bevæger os fra A mod B.

Vi kan løse problemet med en lille konstruktion, hvor enheden 1 cm svarer til hastigheden 100 km/h:



Først tegnes retningen fra A til B.

Så tegnes en vektor (vinden) med længden 1,5 cm mod øst til punktet C.

Med spidsen af denne vektor som centrum tegnes en cirkel med radius 8,5 cm svarende til en hastighed i en eller anden retning på 850 km/h.

Flyhastigheden TAS er da bestemt ved vektoren fra cirkelns centrum til skæring med linjen AB.

På tegningen kan vi måle, at hastigheden i forhold til jorden, GS, er ca. 750 km/h, og at flyet skal flyve med kurs 309°. Det er altså den retning, som flyets næse skal pege.

Du kan også løse problemet ved trekantsberegning. Du kender 2 sider og 1 vinkel i trekant ACD.

Opgave 5.3

Du skal flyve fra København til Azorerne. Flyets hastighed i forhold til luften er 900 km/h. Afstanden er 3.463 km, og kursen skal være SV. Vindhastigheden er 200 km/h fra vest.

1. Bestem flyets hastighed over jorden mod Azorerne.
2. Hvor lang tid tager turen?
3. I hvilken retning peger flyets næse under flyvningen?

Flyet drejer

Vi skal se på et fly, der foretager en cirkelbevægelse eller en del af en cirkelbevægelse, f.eks. ved indflyvning til en lufthavn, eller når det skal sætte kursen efter start.

For at foretage en cirkelbevægelse, så er det nødvendigt med en centripetalkraft. Formlen for denne er:

$$F_C = m \cdot v^2/r$$

Hvor m er flyets masse i kg, v er hastigheden i m/s, og r er radius i cirkelbevægelsen målt i m.

Opgave 5.4

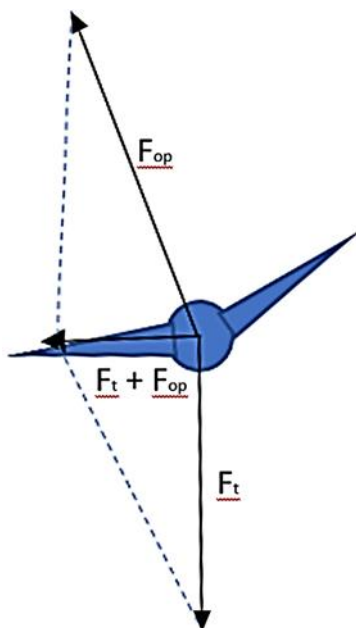
Du kan følge et fly live på denne adresse:

<https://www.flightradar24.com/55.74,9.19/13>

Hvis du klikker ind på ovenstående link, kommer du til Billund, men du kan flytte til en anden lufthavn.

- Find et fly, der nærmer sig lufthavnen i en retning, så det må dreje før landing.
- Følg flyet under indflyvningen. Aflæs flyets hastighed og vurder radius i banen.
- Ud fra flytype kan du vurdere massen af flyet.
- Beregn centripetalkraften og tyngdekraften.

Opdriften fra vingerne F_{op} må modsvare tyngdekraften F_t i lodret retning og summen af de 2 leverer centripetalkraften. Se tegning.



Flyet er set bagfra, og det drejer mod venstre. Opdriften er vinkelret på vingerne. Opdriftens lodrette komponent svarer til tyngdekraften, så den resulterende kraft går vandret til venstre. Denne kraft er den nødvendige centripetalkraft til cirkelbevægelsen.

- Beregn den vinkel, som dit observerede fly må vippe.
- Vurder vinklen. Ser dit resultat sandsynligt ud?

Du kan betragte flyet fra jorden, eller du kan bedømme vinklen som flyet vippes i forhold til horisonten, hvis du sidder inde i flyet, og det er klart vejr.

Cirkelbevægelse om jorden

Jordens rotation mod øst betyder noget. Omkring ækvator roterer jordoverfladen med en hastighed på jordens omkreds/24 timer = 40000 km/24 timer = 1670 km/h.

Hvis man flyver mod øst med denne hastighed, så skal man lægge flyhastigheden til dette tal for at se, hvor hurtigt man bevæger sig i en cirkelbevægelse. Hvis man flyver mod vest, bliver de 1.670 km/h reduceret med flyhastigheden.

<https://www.sciencealert.com/Earth-spins-to-the-east-why-isn-t-it-faster-to-fly-west>

I begge tilfælde foretager man en cirkelbevægelse mod øst, men med meget forskellig hastighed. Man kan udregne centripetalkraften som $F_C = m \cdot v^2/R$, hvor m er massen af flyet, v er hastigheden, og R er jordens radius plus flyhøjde for at være helt korrekt.

For at holde flyet i cirkelbevægelsen skal den resulterende kraft mod centrum være denne centripetalkraft. Den fås som tyngdekraften minus opdriften. Vi kan altså nøjes med en mindre opdrift på flyet, når centripetalkraften er stor.

Det virker i alt i alt, som om tyngdekraften reduceres med centripetalkraften, eller tyngdeaccelerationen reduceres med centripetalaccelerationen:

$$\text{Oplevet tyngdeacceleration} = g - v^2/R$$

Jordoverfladens hastighed mod øst er $1.670 \text{ km/h} = 464 \text{ m/s}$.

Fly mod øst ved ækvator har hastigheden $(1.670 + 900) \text{ km/h} = 714 \text{ m/s}$.

Fly mod vest har hastigheden $(1.670 - 900) \text{ km/h} = 214 \text{ m/s}$.

Jordens radius ved ækvator 6.378 km .

Flyhøjde 10 km .

Tabelværdi for g ved ækvator $9,780 \text{ m/s}^2$, men denne er i forvejen reduceret med centripetalaccelerationen. Så den rene tyngdeacceleration er $9,780 \text{ m/s}^2 + (464 \text{ m/s})^2/(6378000 + 10000) \text{ m} = 9,780 \text{ m/s}^2 + 0,034 \text{ m/s}^2 = 9,814 \text{ m/s}^2$

Så:

Oplevet tyngdeacceleration ved flyvning mod øst er $9,734 \text{ m/s}^2$ og mod vest $9,807 \text{ m/s}^2$, altså en forskel på 0,7 pct.

Det er således lidt nemmere at holde sig oppe på vej østover end vestover, men forskellen er ikke stor.

Opgave 5.5

Regn efter:

1. Vis oplevet tyngdeacceleration ved flyvning mod øst $9,734 \text{ m/s}^2$ og mod vest $9,807 \text{ m/s}^2$.

Hvor stor en del af jordkloden kan vi nå med nonstop flyvning?

Betragt en globus og overvej, hvorfor der aldrig er grund til at flyve mere end 20.000 km non-stop.

Opgave 5.6

En af verdens længste flyruter går fra Doha til Auckland, 14.500 km. Med en rækkevidde på 14.500 km kan man nå det meste af jordens overflade, men hvor mange pct. af jordens overflade?

Prøv at besvare dette spørgsmål ved at vurdere arealer på en globus. Hvilke lande kan ikke nås fra Danmark?

Spørgsmålet med procentdelen, der ikke kan nås, kan besvares mere nøjagtigt ved at integrere overfladen af det omdrejningslegeme, som en kugle jo er (klasser, der har Matematik på A-niveau kan bruge denne metode).

Geometri med afstand til horisont

Man kan foretage forskellige geometriske overvejelser, der bygger på den store flyvehøjde og jordkuglens runding. I matematik har man gerne nogle overvejelser i stil med dette fra den græske matematik.

Hvis man er i toppen af et højt tårn, så kan man se langt, og hvis man flyver i 10 km højde, så kan man se meget langt, men hvor langt?

Resultatet er følgende: Hvis en iagttager befinder sig i højden h over jordoverfladen, så kan vedkommende se ud til afstanden d bestemt ved:

$$d = \sqrt{2 \cdot R \cdot h} \quad R \text{ er jordens radius} \quad (h \ll R)$$

Her skal R , h og d måles i samme enheder, m eller km.

Opgave 5.7

Sæt jordens radius R til 6.370 km = 6.370.000 m.

1. Hvor langt kan du se fra et tårn på 50 m højde?
2. Hvor langt kan du se, hvis du flyver i 10 km højde?

Modul 6: Forberedelse af virksomhedsbesøg og afsluttende opgave

I dette modul skal du forberede dit virksomhedsbesøg og den afsluttende opgave.

Din lærer vil fortælle, hvem I skal møde, hvad I skal se, og hvilke rammer der er for den afsluttende opgave.

Når man taler med personer i flybranchen, så bruger de tit amerikanske enheder. Opgaven nedenfor går ud på at lære et par af disse enheder at kende.

Opgave 6.1

Omregn følgende størrelser til SI-enheder (metersystemet). Find oplysninger om enheder på nettet.

1. Flyhøjden er 33.000 ft.
2. Afstanden 1.200 nm.
3. Hastigheden 440 kts (nm/t).
4. Lasten er 40.000 lb.
5. Rumfanget af brændstof (100 LL) er 2.000 USG.
6. Flybrændstof (100 LL) har massefylde 0,71 kg/L. Beregn massen af 2.000 USG flybrændstof.

I den afsluttende opgave skal du lave en flyveplan for en konkret flyvning. Du skal vælge flytype og rute for flyvningen. Opgaven er nærmere beskrevet på næste side.

Tænk på forhånd over, om der er nogle konkrete spørgsmål, du får brug for at få svar på under besøget. Du må også overveje, om der er målinger, du skal foretage, eller du skal tage billeder (spørg om lov, inden du fotograferer på virksomheden).

Afsluttende opgave: Logistik: Planlægning af en konkret flyvetur.

Til planlægning af flyveturen skal du bruge forskellige online-værktøjer og din viden om fysik.

Opgave

Hvis virksomheden og læreren ikke har aftalt en alternativ slutopgave, kan I bruge denne.

Du er medlem af Roskilde Flyveklub og skal flyve et lille en motors propelfly af typen Piper 28-140B fra Roskilde Lufthavn (der har koden EKRK) til Billund Lufthavn (der har koden EKBI) med 2 voksne og 2 børn ombord.

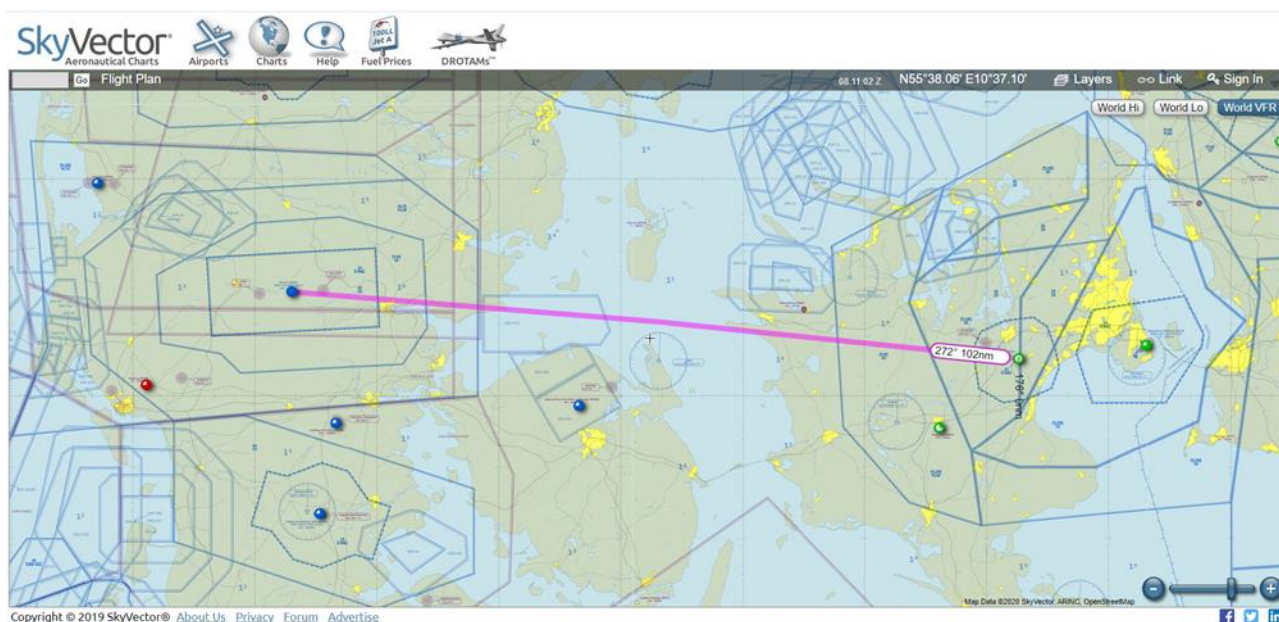
Først skal du lave et kort over flyruten og måle distancen, I skal flyve. Som værktøj til det kan du bruge online-værktøjet Skyvector.com.

- Find distancen fra Roskilde til Billund.
- Find flyvetiden (ETE).
- Hvilken retning (angivet i grader) skal I flyve i?

Værktøjet skyvector.com

Skyvector.com er et gratis online-værktøj, der kan bruges til at lave flyveplaner.

Man kan zoome ind og ud og flytte rundt på kortudsnittet. Vælg visningen World VFR oppe til højre på kortet. Når man åbner skyvector.com, kan man skrive forkortelsen for en konkret lufthavn i det lille grå felt øverst til venstre. Roskilde Lufthavn hedder f.eks. EKRK, Billund Lufthavn hedder EKBI. Så får man et kort frem over det område, man skal bruge.



Herinde kan man finde mange informationer om flyveforholdene, distancer, flyvetider m.v. og tegne sin planlagte flyverute ind.

Planlægning af flyveturen til Billund

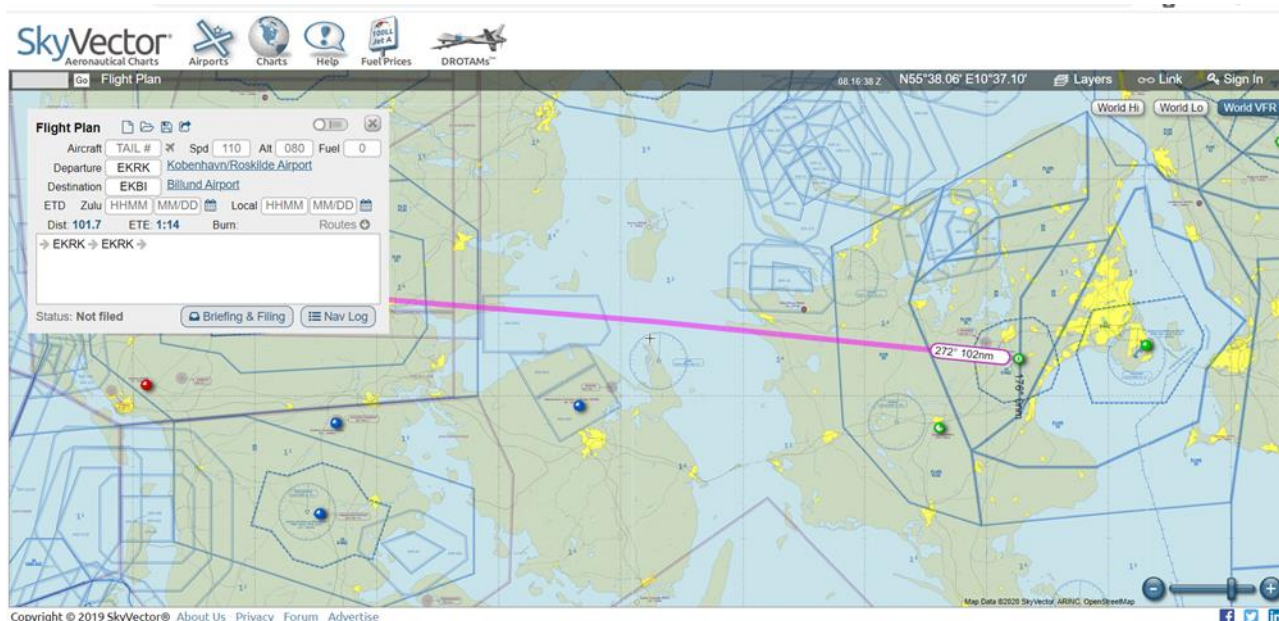
Du skal flyve fra Roskilde lufthavn. Roskilde Lufthavn har koden EKRK. Derfor skriver du EKRK i feltet oppe til venstre i Skyvector.com og trykker Go.

Hvis du klikker på i i den blå cirkel til højre for "København/Roskilde", så får du nogle oplysninger om lufthavnen, f.eks. at der er 4 startbaner *runway* 11/29 og 03/21 og deres retning.

Prøv at afsløre sammenhængen mellem betegnelsen 11/29 og banernes retning.

Klik på FLIGHT PLAN i øverste venstre hjørne. Inde i Flight Plan skriver du EKRK (Roskilde) ud for *Departure* og EKBI (Billund) ud for *Destination*, fordi du skal fra Roskilde til Billund.

Du kan nu se flyruten på kortet, og du kan aflæse flyretningen samt distancen målt i nautiske mil (nm).



Du kan aflæse en masse information i Skyvector.com. Det, du skal bruge i opgaven, er distancen, flyvetiden og vinklen i forhold til nord. Inde i Flight Plan kan du aflæse den estimerede flyvetid.

Nyttig information: *Klik på i Flight Plan, hvis du vil nulstille og slette.*

Afstande måles i nm (nautiske mil) = 1,8 km.

Hastigheder (spd = true air speed TAS) måles i knob = kts (nm/t).

Dist = samlet distance.

ETE = estimeret flyvetid.

Der er ofte modvind, når man flyver vestpå, så Ground Speed (GS) typisk er lavere end True Air Speed (TAS). Beregn flyvetiden for denne flyvning fra Roskilde til Billund, når flyets Ground speed sættes til 95 kts (nm/t)

Brændstofforbrug

Gå ind på Roskilde Flyveklubs hjemmeside: rfk.dk.

Vælg fanen "Booking" og vælg flyet OY-CYF. Her kan du se alle specifikationer for det fly, som I skal flyve i.

I skemaet under ”Performance-tabeller” klik på ”Se Performance (pdf)” og find herinde den tabel, der viser *Cruise Performance*.

På distancen fra Roskilde til Billund skal I cruise med 65 pct. af flyets motorkraft (*Pow.*) i 3000 fods højde (*Dens. Alt.*). Vælg *True Air Speed* (TAS) 103. Aflæs i tabellen, hvor meget brændstof i enheden *USG*, som flyet bruger pr. time.

Du skal have tilstrækkeligt med brændstof på flyet til den estimerede flyvetid + mindst 1 time (for at være på den sikre side).

- Hvor meget brændstof skal du mindst have med på turen fra Roskilde til Billund?

I skemaet under ”**Vægt- og balanceberegning**” klik på ”**Beregn online**”.

Indtast vægt på de 2 voksne, de 2 børn og evt. bagage i felterne (du bestemmer vægten i kg). Indtast den mængde brændstof (*fuel*), du har regnet ud, I skal have med (rund af til hele tal). Vælg enheden *USG 100 LL*:

- Beregn, om den planlagte vægt er ok ved at trykke *calculate*. Er prikken i diagrammet grøn, er det ok. Er den rød, betyder det, at flyet er for tungt, og du må reducere vægten, før I kan flyve
- Hvis I skulle flyve helt til Kristiansand i Norge og ikke kun til Billund. Hvor mange passagerer kan der så være i flyet, hvis vægten skal balancere, og der skal være tilstrækkeligt brændstof (lufthavnen i Kristiansand har koden *ENCN*. Brug samme metoder som før)?

I skemaet under ”**Start- og landingsdistanceberegning**” klik på ”**Beregn online**”.

Åbn et Excel-ark, der kan bruges til beregning af, hvor lang start- og landingsbane skal være, før du kan starte og lande flyet.

Venstre side af regnearket indeholder data for startbanen:

- *Startsted* er allerede sat til Roskilde Lufthavn (EKRK).
- *Startbane i meter (TODA)* viser, hvor lang startbanen er i Roskilde.
- *Aerodrome Elevation* i feet viser lufthavnens højde over havet i fod.
- *QNH* er lufttrykket i hekto-pascal (varierer mellem 990 og 1.025). Den er her sat til 1.013 hPa som standardatmosfæren.

- *Temperaturen* er lufttemperaturen ved jorden i lufthavnen. Den er sat til 15°C som standard-atmosfæren.
- *Startdistance* viser, hvor langt en startbane flyet skal have for at lette.

Nederst er forskellige korrektioner, som man skal korrigere for, hvis man ikke har at gøre med en asfalteret startbane, men en anden type underlag – f.eks. langt græs (der kan du se, at man skal lægge 25 pct. til startdistancen på grund af den øgede modstand).

I højre side af regnearket er plads til tilsvarende data for landingsbanen.

Du skal bruge regnearket til at indtaste data for din flyvetur fra Roskilde til Billund. Du skal lande på landingsbane 27 i Billund (EKBI).

- Find på nettet længden af landingsbane 27 (i meter) og højden over havet (i fod).
- Beregn landingsdistancen.
- Trafikstyrelsen kræver, at banelængde skal være en faktor 1,43 længere end ”korrigeret landingsdistance” (for en sikkerheds skyld). I den gule række forneden kan du se, om henholdsvis start- og landingsbane er tilstrækkelig lange til at lande under de givne forhold og omstændigheder.
- Prøv at variere temperatur, lufttryk, højde, underlag m.v. og brug regnearket til se, hvordan det påvirker start og landingsdistance. Brug noget af den fysik, du har fået gennemgået i undervisningsforløbet til at forklare, hvad der sker, og hvorfor når de forskellige værdier ændres.
- Ifølge formlen for luftmodstand er luftmodstanden proportional med 2. potens af hastigheden. Men flyvetiden for en bestemt distance er proportional med hastigheden i minus 1. potens. Alt i alt skulle brændstofforbruget således være proportionalt med hastigheden.
- Beregn brændstofforbruget for turen fra Roskilde til Billund ved 3 forskellige realistiske hastigheder. Undersøg, hvordan brændstofforbruget afhænger af hastigheden.