Dansk Naturvidenskabsfestival

Faldskærm i fart!

Syddansk Universitet

Institut for Mekanik og Elektronik
Sønderborg

Dette hæfte kan anvendes på en række forskellige måder:

- Som den første introduktion til fysik i gymnasiet/htx. Med hovedvægt på at afdække (lineære) sammenhænge mellem forskellige størrelser, simple eksperimentelle målinger og en introduktion til Excel, indeholder hæftet mange af de ting, man normalt ville have med i et introduktionsforløb til fysikfaget. Nogle af forsøgene kan med fordel deles ud blandt eleverne, så hver gruppe i et par timer arbejder med hver sin problemstilling.
- Som baggrund for et undervisning i naturvidenskabeligt grundforløb, hvor biologi og fysik kan være fælles om et emne om ekstremsport som f.eks. faldskærmsudspring og frit fald (adrenalin-kick osv.).
- Som baggrund for et tværfagligt samarbejde mellem fysik og matematik om proportionalitet og brug af Excel.
- Som baggrund for et forløb i almen studieforberedelse (studieområdet på htx) i et samarbejde med billedkunst/design. Historie (idehistorie/teknologihistorie på htx) kan også indgå, idet man kan arbejde med Leonardo da Vincis 500 år gamle skitser af faldskærm og helikopter. Billedet herunder er fra et forsøg med en moderne version af da Vincis faldskærm (link til forsøget findes bagest i hæftet).
- Som en meget aktuel indgangsvinkel kan man undersøge, hvordan verdens eneste amatørbaserede rumfartsprogram, *Copenhagen Suborbitals*, er ved at udvikle en ganske speciel faldskærm, "balutten", som skal bringe deres bemandede raketmodul sikkert til jorden efter en forhåbentlig succesfuld tur ud i rummet! Billedet på forsiden af dette hæfte viser Mads Stenfatt, der leder Copenhagen Suborbitals faldskærmsgruppe, under en test i en vindtunnel. Mads Stenfatt kommer til faldskærmskonkurrencen på Alsion og fortæller om deres erfaringer med faldskærmsbyggeri. Find også flere links herom bag i hæftet.
- Endelig indeholder hæftet også forslag til, hvordan man kan gå mere i dybden med det fysikfaglige (udover 1.g-niveau) ved at undersøge luftmodstanden eksperimentelt og sammenligne med en model, der opstilles ved brug af en differensligning.

Indholdsfortegnelse

Indledning

Når man skal konstruere en faldskærm, der kan bringe et 50 grams lod langsomt (og sikkert) til jorden fra stor højde, er der mange ting, man skal tage hensyn til. Særligt når faldskærmen skal svæve i luften så lang tid som muligt og samtidig helst skal dale ned så lodret som muligt!

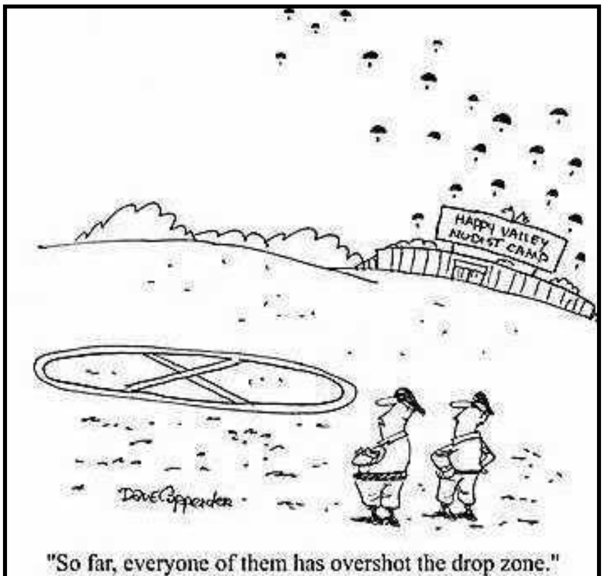
Der er klart, at luftmodstanden er en afgørende faktor for, hvorledes faldskærmen bevæger sig. Derfor må faldskærmens størrelse og facon også være vigtige. Men faconen kan jo afhænge af længden af de snore, man binder i faldskærmen, så det må også være en parameter, der har indflydelse på faldskærmens bevægelse. Og hvad med antallet af snore, har det indflydelse?

Når faldskærmen skal holde sig svævende i lang tid, må det være en fordel, at den er så let som mulig. Men samtidig skal den vel også være så stor som mulig – uden at det går for meget ud over faldskærmens præcision...! Hvordan finder man et kompromis, så man opnår den mest optimale faldskærm?

Endelig er der også interessant at kunne forudsige svævetiden for en faldskærm, man selv har konstrueret. Men hvordan skal man egentlig gribe det an, hvis den højde, man skal finde svævetiden for, er langt større, end man har mulighed for at måle på i laboratoriet?

Det er spørgsmål af denne art, som hæftet her giver en række redskaber til at kunne besvare. Hæftet er desuden tænkt som en introduktion til fysik, dvs. der lægges vægt på at vise, hvordan man ved at indføre nogle fysiske begreber og tilhørende arbejdsmetoder bliver i stand til at besvare spørgsmålene herover på en kvalificeret måde.

God fornøjelse og held og lykke med faldskærmsbyggeriet!



"So far, everyone of them has overshot the drop zone."

Fysik i en nøddeskal: Sammenhænge mellem størrelser

En fysisk model

I fysik er man ude efter at finde sammenhænge mellem forskellige fysiske størrelser. En sådan sammenhæng skrives ofte som en matematisk formel, og man siger, at man i det tilfælde har opstillet en *model* for den pågældende situation.

Eksempel 1: En golfkugles fald

Vi ser på hvor hurtigt en golfkugle falder til jorden, når den slippes i forskellige højder og får lov at falde frit. Vi er interesseret i at undersøge, om der er en sammenhæng mellem den højde golfkuglen falder og den tid, faldet varer.

For at finde en sammenhæng mellem højde og tid må vi så lave nogle systematiske målinger af de to størrelser. Vi vælger så at måle faldtiden for en række forskellige højder og undersøge, om der er en eller anden form for system i den måde, højde og tid ændrer sig på.

I praksis betyder det, at man indtegner sine målepunkter i et koordinatsystem og ser om punkterne ligger på en bestemt kurve, som man så kan forsøge at finde en regneforskrift for.

Koordinatsystemet kunne komme til at se ud som vist herunder. Bemærk at vi i laboratoriet åbenbart har været i stand til at måle højder op til knap 3 meter, og faldtiden er i det tilfælde knap 0,8 sekunder.

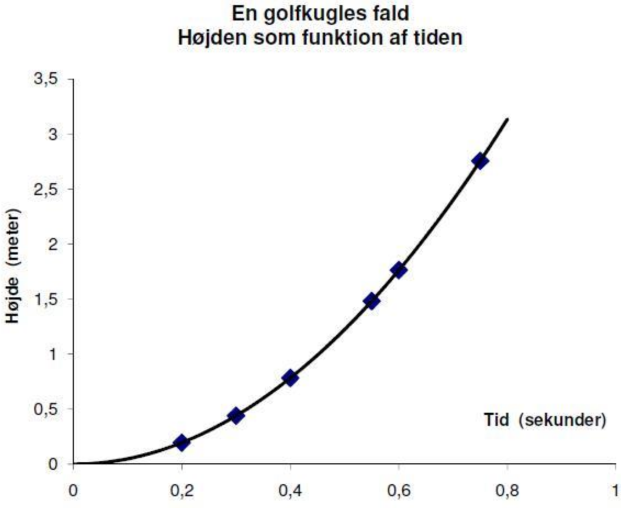


Fig. 1 Man kan her tegne en pæn kurve gennem målepunkterne, så det er rimeligt at konkludere, at der er en sammenhæng mellem de to størrelser.

For golfkuglens vedkommende vil man opdage, at højden h afhænger af tiden t på følgende måde (svarende til den krumme kurve på figuren):

$$h = 4{,}9\,\tfrac{m}{s^2} \cdot t^2$$

Dette er så vores model for golfkuglens fald. Fordelen er, at man nu kan bruge den fundne model til at forudsige, hvad der vil ske, hvis man gerne vil vide, hvor langt kuglen falder på f.eks. 2 sekunder, altså væsentligt længere tid, end vi har mulighed for at undersøge i laboratoriet. Vi bruger modellen, og beregner højden ved et fald på 2 sekunder:

$$\begin{aligned} h &= 4{,}9\,\tfrac{m}{s^2} \cdot (2\,s)^2 \\ &= 4{,}9\,\tfrac{m}{s^2} \cdot 2^2\,s^2 \\ &= 19{,}6\,m \end{aligned}$$

Modellen kan også bruges til at beregne faldtiden, hvis kuglen skal falde fra 30 meters højde, altså en højde vi slet ikke har mulighed for at måle på i laboratoriet (!):

$$h = 4{,}9\,\tfrac{m}{s^2} \cdot t^2$$
$$\Updownarrow$$
$$30m = 4{,}9\,\tfrac{m}{s^2} \cdot t^2$$
$$\Updownarrow$$
$$t^2 = \frac{30m}{4{,}9\,\tfrac{m}{s^2}}$$
$$\Updownarrow$$
$$t = \sqrt{\frac{30m}{4{,}9\,\tfrac{m}{s^2}}} = \sqrt{\frac{30}{4{,}9}\,s^2} = 2{,}5\,s$$

Det vil sige at det tager en golfkugle 2,5 sekunder at falde fra en højde på 30 meter.[a]

Øvelse 1. a) Hvor langt falder en golfkugle på 3,5 s ?

b) Hvor lang tid vil en golfkugle være om at falde ned fra Rundetårn (34,8 m) ?

[a] Vi har i beregningen set bort fra den matematiske løsning t = - 2,5 s, da vi ved at tiden må være positiv.

Proportionalitet – den mest simple sammenhæng

To størrelser x og y er proportionale, hvis der gælder at

$$y = k \cdot x$$

hvor k er en konstant.

Man undersøger om to størrelser er proportionale ved at indtegne sine målepunkter i et koordinatsystem. Hvis punkterne med god tilnærmelse ligger på en ret linje, der går igennem (0,0), så er der tale om en proportionalitet.

Linjens hældningskoefficient er så proportionalitetskonstanten k.

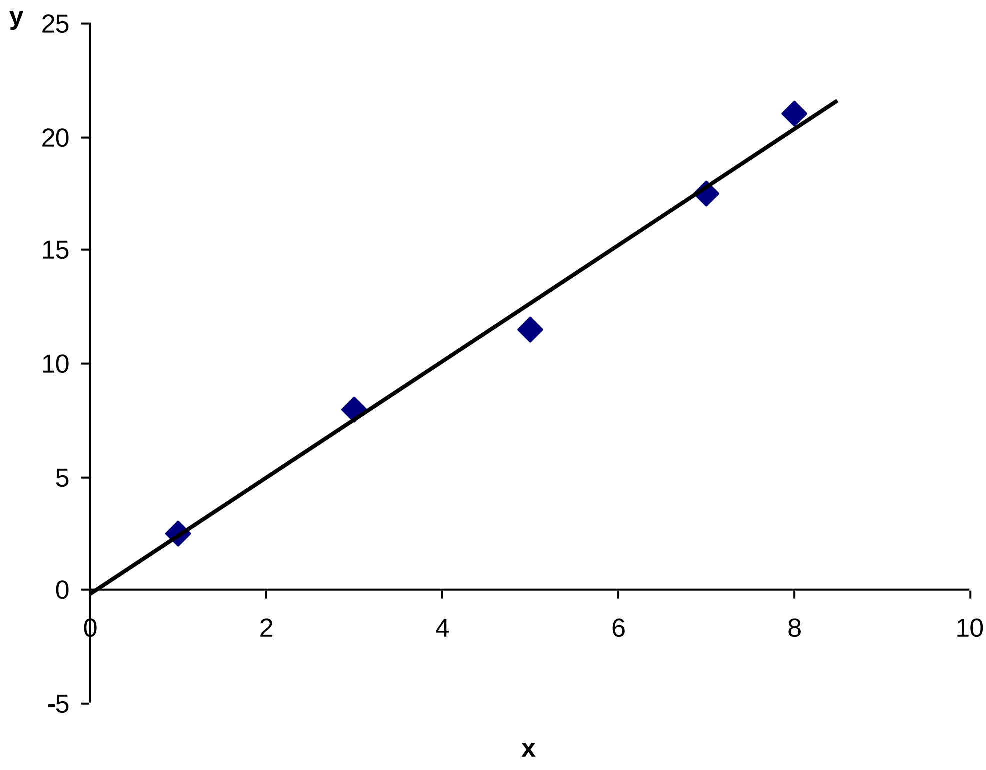


Fig. 2 Der er her tale om at x og y er proportionale, da punkterne med god tilnærmelse ligger på en ret linje der går igennem (0,0).

Proportionalitet mellem to størrelser er den mest simple sammenhæng man kan tænke sig, men ikke desto mindre er det en meget anvendelig model – rigtig mange størrelser i fysik viser sig med god tilnærmelse at være proportionale.

Konstanten k i formlen har som regel en helt bestemt fysisk fortolkning. Det ser vi blandt andet i følgende eksempel.

Eksempel 2: Masse og rumfang for en væske

Masse m og rumfang V for en væske som f.eks. sprit er proportionale. Det ses ved at afsætte sammenhængende værdier for masse og rumfang i et koordinatsystem:

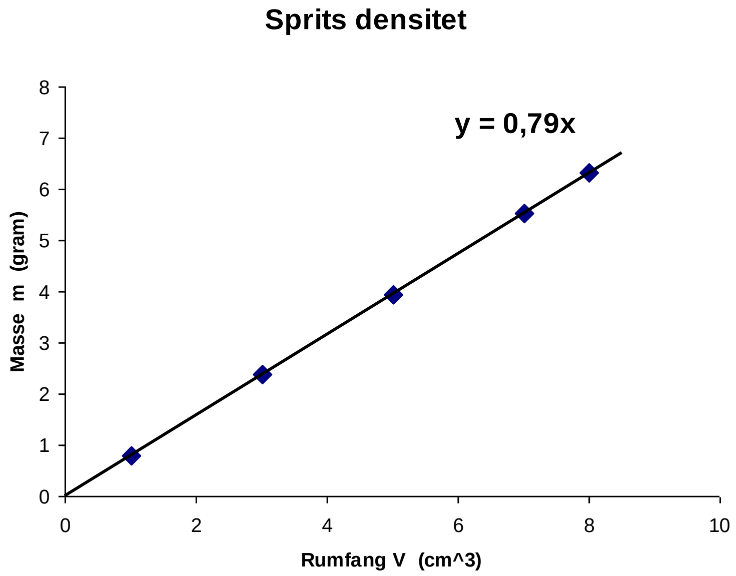


Fig. 3 Masse og rumfang af sprit er proportionale, da punkterne med god tilnærmelse ligger på en ret linje gennem (0,0).
Excel har beregnet ligningen for "tendenslinjen" og fundet ligningen $y = 0{,}79 \cdot x$.

Der gælder således:

$$m = 0{,}79\,\tfrac{g}{cm^3} \cdot V$$

Proportionalitetskonstanten er her $0{,}79\,\tfrac{g}{cm^3}$, og den udtrykker hvor mange gram én kubikcentimeter sprit vejer. Altså er proportionalitetskonstanten her *densiteten* (eller massefylden) for sprit. Densiteten betegnes ofte med det græske bogstav "ro": ρ .
Vi kan derfor også skrive sammenhængen:

$$m = \rho \cdot V$$

Øvelse 2. Find selv på andre størrelser der er proportionale.

Kræfter i fysik

Når man hører ordet kraft, tænker de fleste i første omgang på store muskler og den slags! I fysik har ordet kraft imidlertid en anden og mere præcis betydning.

I fysik kan forskellige genstande påvirke hinanden med forskellige kræfter. Eksempler på kræfter er:

Fig. 4 En fysiklærer demonstrerer "kræfter"…

- tyngdekraften (Jorden påvirker genstande ved Jordens overflade med en kraft nedad)
- elektriske kræfter (kan være både tiltrækkende og frastødende)
- magnetiske kræfter (kan være både tiltrækkende og frastødende)
- gnidning mod et underlag (en påvirkning modsatrettet bevægelsen)
- luftmodstand (det er faktisk en form for gnidningskraft)

En fysisk kraft er karakteriseret ved to egenskaber: Den har både en *retning* og en *størrelse.*

Derfor kan man illustrere en kraft ved hjælp af en pil, for en pil har jo netop både en retning og en størrelse. I fysik benytter man bogstavet F som symbol for en kraft – det kommer af det engelske ord for en kraft: *Force* .

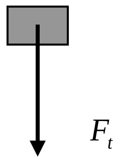


Fig. 5 Tyngdekraften har retningen nedad (dvs. ind mod Jordens centrum).

Eksempel 3: Elektrisk tiltrækning

En elektron er negativt ladet, mens en proton er positivt ladet. Elektronen og protonen påvirker derfor hver især hinanden med en tiltrækkende kraft.

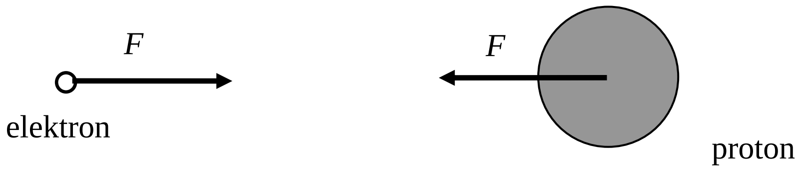


Fig. 6 Tiltrækning mellem en negativt og en positivt ladet partikel.

Eksempel 4: Kræfter på en cyklist

Der virker adskillige kræfter på en cyklist. Nogle af dem er indtegnet på figuren herunder.

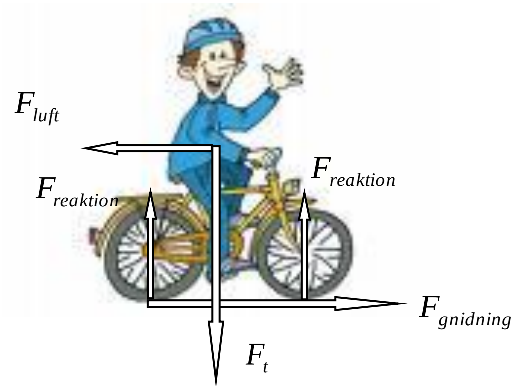


Fig. 7 Kræfter på en cyklist.

Bemærk at gnidningskraften fra vejen virker i bevægelsens retning – det er den kraft, der er årsag til at cyklisten kan komme fremad!

Desuden er der tyngdekraften som virker nedad. Hvis ikke der var en lodret kraft til at modvirke tyngdekraften ville cyklisten trykke sig ned igennem vejbanen! Det sker jo ikke. Det skyldes, at vejen påvirker cyklen med en lodret kraft opad. Den kaldes reaktionskraften. På figuren er der tegnet to reaktionskræfter, da cyklen rører vejbanen med begge hjul. Læg mærke til at de to reaktionskræfter til sammen er lige så lang som tyngdekraften.

Endelig er der også indtegnet en luftmodstand. Den påvirker cyklisten i modsat retning af bevægelsen.

Måleenheden (SI-enheden) for en kraft er *newton*, som forkortes med N .

Et simpelt instrument til at måle en krafts størrelse er et dynamometer (også kaldet et newtonmeter), som i hovedtræk blot er en fjeder påmonteret en skala.

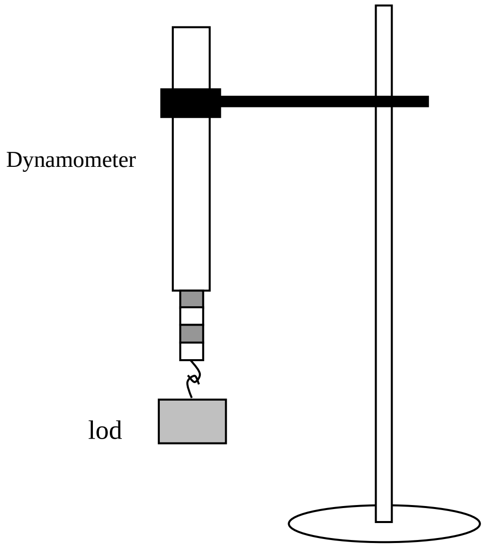
Fig. 8 Dynamometer/newtonmeter

Det er som regel ikke så svært at se, hvilken retning en given kraft har. Vi skal derfor i dette hæfte nøjes med at måle størrelsen af en kraft.

Eksperiment 1: En model for tyngdekraften

Formål: Det er formålet at undersøge om der er en sammenhæng mellem tyngdekraften på en genstand og genstandens masse.

Udførelse: Mål ved hjælp at et dynamometer tyngdekraften på forskellige lodder. Notér i et skema som herunder loddernes masse og tyngdekraften.



Måleresultater:

Masse m (kg)	Tyngdekraft F_t (N)

Resultat-behandling:

1. Indtegn (f.eks. ved brug af Excel) målepunkterne i et koordinatsystem med massen på 1. aksen og tyngdekraften på 2. aksen. (Vejledning til Excel findes i appendiks B side 27).
2. Hvilken sammenhæng er der tale om?
3. Opstil en model for hvorledes tyngdekraften afhænger af massen.
4. Benyt den fundne model til at beregne tyngdekraften på dig selv.
5. Benyt den fundne model til at beregne, hvor stor massen skal være for at tyngdekraften på genstanden er 500 N.
6. Proportionalitetskonstanten I har fundet i dette forsøg kaldes *tyngdeaccelerationen*. Den betegnes g og tabelværdien er $g = 9{,}82\,\frac{N}{kg}$ eller $g = 9{,}82\,\frac{m}{s^2}$. Hvor mange procent afviger jeres værdi fra tabelværdien?

Eksperiment 2: Svævetiden for en faldskærm

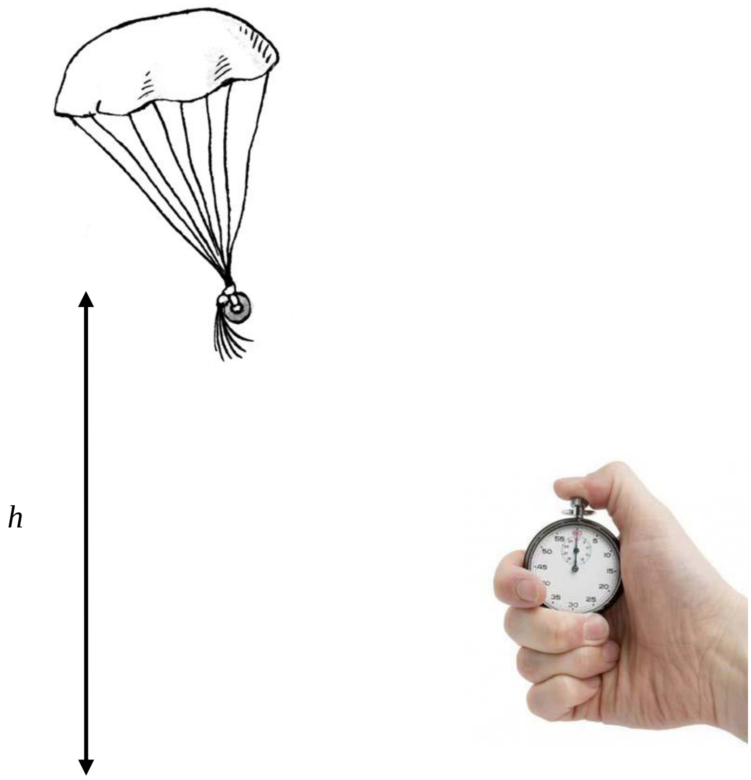
Formål: Det er formålet at undersøge om der er en sammenhæng mellem den højde en faldskærm slippes i og den tid faldskærmen er om at svæve til jorden (svævetiden).

(Nogle tips til hvordan man kan bygge sin egen faldskærm findes i appendiks A).

Teori: Når en faldskærm svæver mod jorden, er den påvirket af to kræfter: Tyngdekraften F_t som virker nedad og luftmodstanden F_{luft} som virker opad.

Luftmodstanden afhænger af, hvor hurtigt faldskærmen bevæger sig – jo større fart desto større luftmodstand. En lille modelfaldskærm vil hurtigt opnå en fart, således at luftmodstanden præcis svarer til tyngdekraften. Når dette er tilfældet vil faldskærmen svæve nedad med konstant fart.

(Der kan læses lidt yderligere om luftmodstand i teoriafsnittet til eksperiment 8).



Udførelse: Montér et lille lod med en masse på f.eks. 50 g under faldskærmen. Slip faldskærmen i forskellige højder h og mål for hver højde svævetiden med et stopur. Man bør benytte alt fra helt små højder til så store som det er muligt i laboratoriet. Lav tre målinger for hver højde og beregn den gennemsnitlige svævetid, t .

Måleresultater:

1. svævetid (s)	2. svævetid (s)	3. svævetid (s)	Gennemsnit t (s)	Højde h (m)

Resultat-behandling:

1. Indtegn (f.eks. ved brug af Excel) målepunkterne i et koordinatsystem med den gennemsnitlige svævetid t på 1. aksen og højden h på 2. aksen.

2. Hvilken sammenhæng er der tale om?

3. Opstil en model for hvorledes højden afhænger af svævetiden.

4. Benyt den fundne model til at beregne svævetiden, når højden er 12,5 meter.

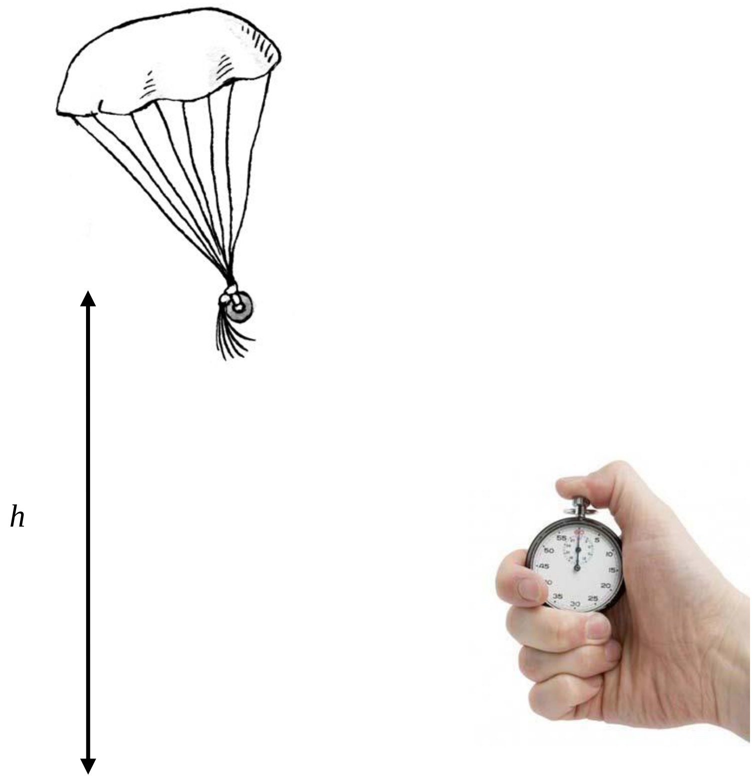
5. Er der væsentlige fejlkilder eller måleusikkerheder knyttet til dette forsøg?

Eksperiment 3: Svævetidens afhængighed af massen

Formål: Det er formålet at undersøge om der er en sammenhæng mellem svævetiden for en faldskærm og den masse faldskærmen har (inklusiv lod).

(Nogle tips til hvordan man kan bygge sin egen faldskærm findes i appendiks A).

Udførelse: Hæng forskellige lodder i faldskærmen og mål for hver masse svævetiden fra en bestemt højde med et stopur. Højden bør være så stor, som det er muligt i laboratoriet. Lav tre målinger for hver masse og beregn den gennemsnitlige svævetid, t . Notér også den anvendte højde. I skemaet anføres den samlede masse af faldskærm + lod.



Måleresultater:

Masse m (kg)	1. svævetid (s)	2. svævetid (s)	3. svævetid (s)	Gennemsnit t (s)

Resultat-behandling:

1. Indtegn (f.eks. ved brug af Excel) målepunkterne i et koordinatsystem med massen m på 1. aksen og den gennemsnitlige svævetid t på 2. aksen.

2. Kan forsøget afsløre hvilken sammenhæng der er tale om?

3. Hvis man skal lave en faldskærm der skal have den længst mulige svævetid, hvilken oplagt ting viser forsøget så, at man skal være opmærksom på ved konstruktion af faldskærmen?

4. Er der væsentlige fejlkilder eller måleusikkerheder knyttet til dette forsøg?

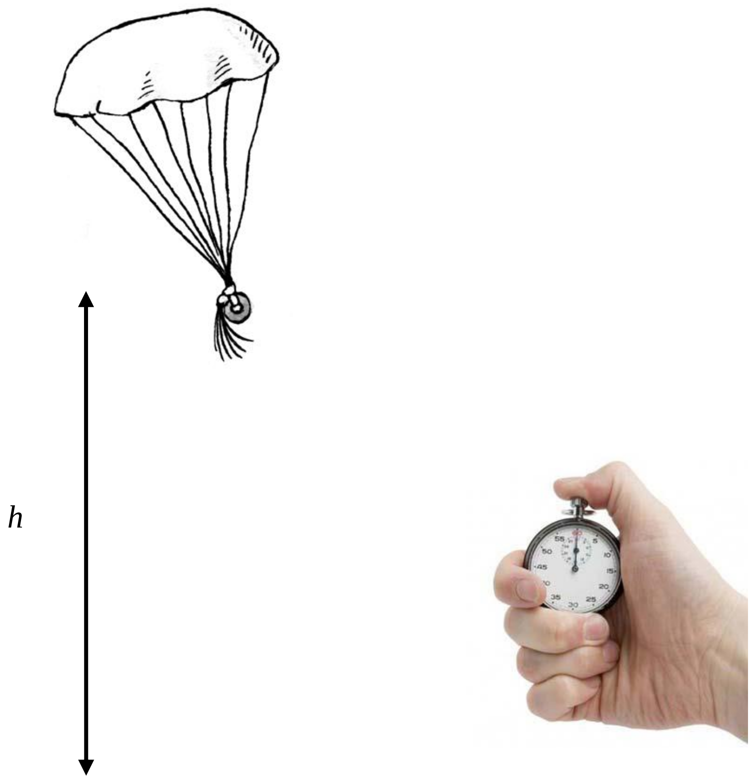
Eksperiment 4: Svævetidens afhængighed af faldskærmens størrelse

Formål: Det er formålet at undersøge om der er en sammenhæng mellem svævetiden for en faldskærm og faldskærmens størrelse.

(Nogle tips til hvordan man kan bygge sin egen faldskærm findes i appendiks A).

Udførelse: Lav nogle simple faldskærme i forskellig størrelse men i samme facon. Opmål så godt som muligt tværsnitsarealet (”skyggearealet”) af hver faldskærm, når den er ”pustet op”.

Find et lod af passende masse og mål for hver faldskærm svævetiden fra en bestemt højde med et stopur. Højden bør være så stor, som det er muligt i laboratoriet. Lav tre målinger for hver masse og beregn den gennemsnitlige svævetid, t .



Måleresultater:

Areal A (m^3)	1. svævetid (s)	2. svævetid (s)	3. svævetid (s)	Gennemsnit t (s)

Resultat-behandling:

1. Indtegn (f.eks. ved brug af Excel) målepunkterne i et koordinatsystem med tværsnitarealet A på 1. aksen og den gennemsnitlige svævetid t på 2. aksen.

2. Kan forsøget afsløre hvilken sammenhæng der er tale om?

3. Hvis man skal lave en faldskærm der skal have den længst mulige svævetid, hvilken oplagt ting viser forsøget så, at man skal være opmærksom på ved konstruktion af faldskærmen?

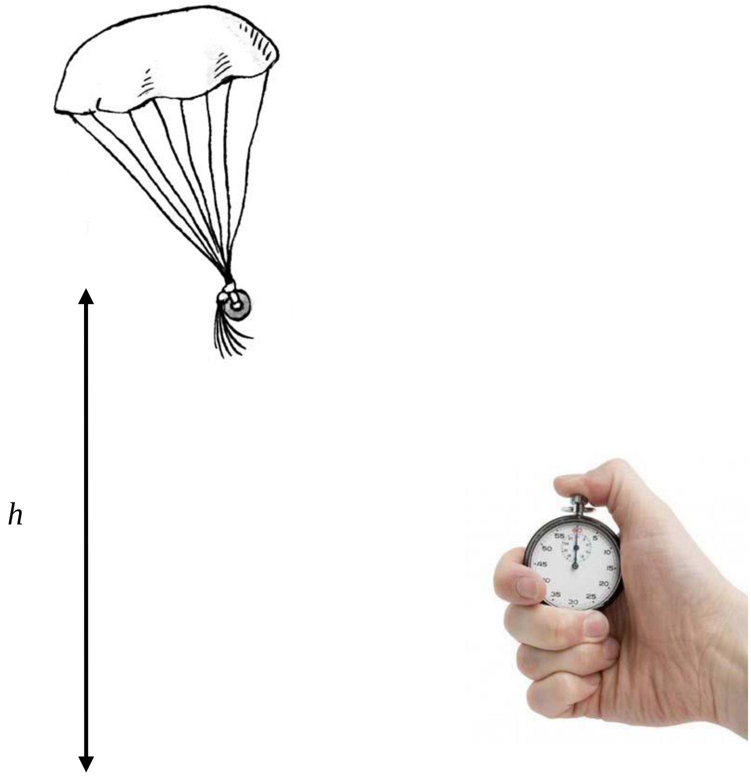
4. Er der væsentlige fejlkilder eller måleusikkerheder knyttet til dette forsøg?

Eksperiment 5: Svævetidens afhængighed af antallet af snore

Formål: Det er formålet at undersøge om der er en sammenhæng mellem svævetiden for en faldskærm og det antal snore der benyttes til at bære loddet.

(Nogle tips til hvordan man kan bygge sin egen faldskærm findes i appendiks A).

Udførelse: Variér antallet af snore i faldskærmen og mål for hvert antal svævetiden fra en bestemt højde med et stopur. Man kan f.eks. variere antallet af snore fra 3 til 20 i passende skridt.
Højden bør være så stor som det er muligt i laboratoriet.
Lav tre målinger for hver masse og beregn den gennemsnitlige svævetid, t .



Måleresultater:

Antal snore n	1. svævetid (s)	2. svævetid (s)	3. svævetid (s)	Gennemsnit t (s)

Resultat-behandling:

1. Indtegn (f.eks. ved brug af Excel) målepunkterne i et koordinatsystem med antal snore n på 1. aksen og den gennemsnitlige svævetid t på 2. aksen.

2. Kan forsøget afsløre hvilken sammenhæng der er tale om?

3. Hvis man skal lave en faldskærm der skal have den længst mulige svævetid, hvad viser forsøget så, at man skal være opmærksom på ved konstruktion af faldskærmen?

4. Er der væsentlige fejlkilder eller måleusikkerheder knyttet til dette forsøg?

Eksperiment 6: Svævetidens afhængighed af snorlængden

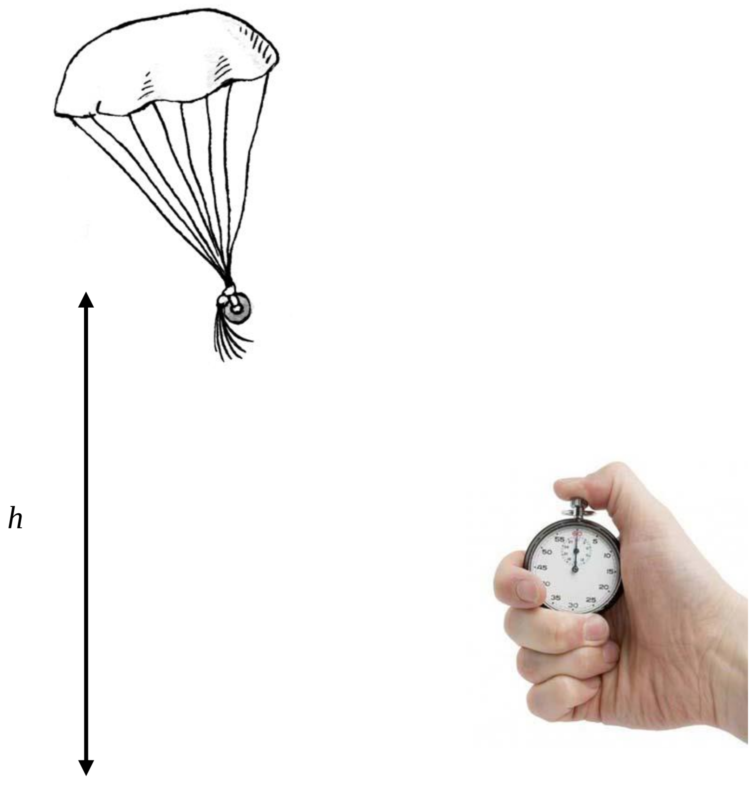
Formål:

Det er formålet at undersøge om der er en sammenhæng mellem svævetiden for en faldskærm og længden af de snore der benyttes til at bære loddet.

(Nogle tips til hvordan man kan bygge sin egen faldskærm findes i appendiks A).

Udførelse:

Variér længden af snorene i faldskærmen og mål for hver længde svævetiden fra en bestemt højde med et stopur. Hvad den mindste snorlængde og største snorlængde bør være afhænger af faldskærmens størrelse.
Højden bør være så stor som det er muligt i laboratoriet.
Lav tre målinger for hver masse og beregn den gennemsnitlige svævetid, t .



Måleresultater:

Snorlængde L (m)	1. svævetid (s)	2. svævetid (s)	3. svævetid (s)	Gennemsnit t (s)

Resultat-behandling:

1. Indtegn (f.eks. ved brug af Excel) målepunkterne i et koordinatsystem med snorlængden L på 1. aksen og den gennemsnitlige svævetid t på 2. aksen.

2. Kan forsøget afsløre hvilken sammenhæng der er tale om?

3. Hvis man skal lave en faldskærm der skal have den længst mulige svævetid, hvad viser forsøget så, at man skal være opmærksom på ved konstruktion af faldskærmen?

4. Er der væsentlige fejlkilder eller måleusikkerheder knyttet til dette forsøg?

Eksperiment 7: Præcision med en faldskærm

Formål:

Det er formålet at undersøge, hvordan man kan få en faldskærm til så vidt muligt at svæve lodret ned, så man kan få den til at lande så tæt ved mål som muligt.

(Nogle tips til hvordan man kan bygge sin egen faldskærm findes i appendiks A).

Teori:

Der er mange faktorer der er afgørende for, hvorledes en faldskærm svæver mod jorden.
En rund faldskærm vil ofte betyde at loddet kommer til at svinge frem og tilbage som et pendul, som derved rykker i faldskærmen.
Enhver asymmetri i konstruktionen vil kunne få faldskærmen til at trække i en bestemt retning.
Turbulens i luften ved faldskærmens kant påvirker retningen.
Sidevinde vil oplagt også have indflydelse!

Udførelse:

I må her prøve jer frem! Hvad kan få jeres faldskærme til at svæve lodret?

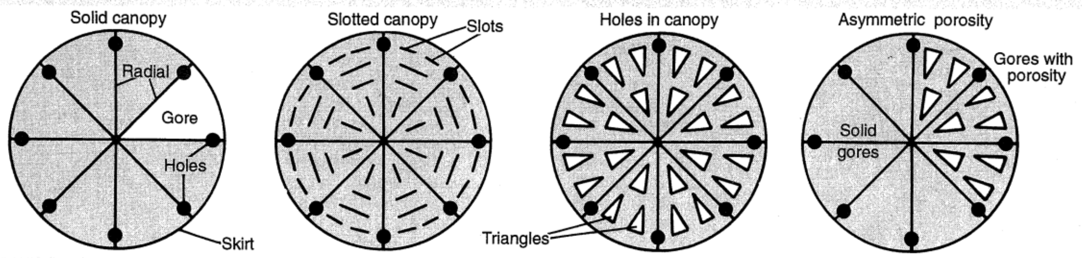
Nogle ideer der kan afprøves:

- Montér en hale, der kan fungere som styrefinne
- Klip et rundt hul midt i faldskærmen
- Andre typer huller kan også testes (se f.eks. næste side)
- Kan faldskærmens kant laves mere ensartet?
- …

Samtidig må I huske på, at det ikke må gå for meget ud over svævetiden, som stadig skal være længst mulig...!

Nogle forslag til huller og slidser i en faldskærm:

Do-It-Yourself Parachute Aerodynamics



You can learn a great deal about parachute aerodynamics by doing experiments that you can conduct in an open field using small parachutes that you can make at home. The experiment described below compares the flight characteristics of identically sized parachutes whose canopies have different configurations of slots or holes. Varying the porosity changes the airflow patterns in and around the parachute, which in turn alter the parachute's flight characteristics.

From an old bedsheet, cut out four circles of material approximately 30 inches in diameter. Use a fine marker to segment each circle into eight equal "pie slices"; these are the "gores" of the parachute. Just inside the circumference of the circle of material, punch a small hole along each radial line that divides the canopy into gores. In parachute terminology, the hole is on the canopy "radial" near the "skirt" of the canopy. These holes will anchor the suspension lines, which you will attach after you design the porosity—slices or holes—into each canopy.

The first canopy will have no geometric porosity. This configuration, called a flat circular canopy, is one of the earliest parachute designs. It is depicted in the first sketch above.

In one gore of the second parachute, cut five "slices" as shown in the second sketch. Choose any spacing between the slices that you wish in the first gore, and then duplicate that slice pattern in each of the remaining seven gores. (The sketch shows what my daughter used in her science project.)

In one gore of the third parachute, cut out three triangles as shown in the third sketch. Each triangle should have a height of about 3 inches and a base of about 2 inches. Repeat the pattern of triangular cutouts in the remaining seven gores.

Use the same pattern of triangles in the fourth parachute, but put them only in three adjacent gores, as shown in the fourth sketch; leave the other five gores with no holes or slots in them.

After preparing each canopy, tie light string through the eight holes in each canopy. Tie the strings together in a knot approximately 35 inches from the skirt of the canopy, and trim off the excess string. The eight strings are the suspension lines that connect the canopy to the payload. The payload can be any *robust* object weighing roughly 5 ounces that can be easily attached to the knot of the suspension lines. My daughter and I used an empty plastic shampoo dispenser, with stones added to bring the weight up to 5 ounces, and looped a string through the pour spout and over the suspension line knot. The same payload can be used with each parachute.

Now comes the flight test phase. Launch the parachutes as high above the ground as possible to maximize the flight time and your opportunity to observe how they fly. Please observe "range safety" rules, however; hanging out of upper-story windows or launching from the top rung of a ladder is not worth the altitude gained! Bundle the parachute with the payload and throw, then observe how each parachute flies. Compare the flight dynamic attributes among the parachutes and see if you can deduce the aerodynamic causes for what you observe. Some questions to ask your research team:

▷ How does each of the parachutes move with respect to the payload during descent? Do you observe any dynamic motion of the canopy?

▷ Are the trajectories the same for each payload–parachute combination?

▷ Do you observe any differences in the time for inflation among the parachutes?

▷ Do some parachutes descend more rapidly than others?

Graduate study: Invent your own canopy configurations to optimize the flight characteristics you think would be important for payloads you envision. Make them glide, spin, descend more slowly and so on as you see fit. Perhaps you will invent a new type of parachute that will better suit the applications described at the beginning of this article!

Fra Physics Today, August 1993

Eksperiment 8: Luftmodstandens afhængighed af hastigheden

Formål: Det er formålet at undersøge, hvorledes luftmodstanden på en faldskærm afhænger af faldskærmens hastighed.

(Nogle tips til hvordan man kan bygge sin egen faldskærm findes i appendiks A).

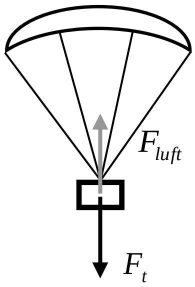
Teori: I en simpel, men brugbar, model af luftmodstanden antager man, at luftmodstanden afhænger af tværsnitsarealet A og hastigheden v på følgende måde:

$$F_{luft} = k \cdot A \cdot v^2 \qquad (1)$$

Her er k en konstant (der i sig selv afhænger af faldskærmens facon og luftens densitet).

Denne model viser, at luftmodstanden på en given genstand er proportional med v^2.

Det betyder at hvis vi fordobler hastigheden, så firdobles luftmodstanden (tænk på at du stikker armen ud af en kørende bil…). Dette gælder også for en faldskærm.



Når en faldskærm svæver nedad, sker det med konstant fart, idet tyngdekraften lige netop modsvares af en lige så stor luftmodstand, altså er

$$F_{luft} = F_t$$

Da eksperiment 1 viste at $F_{tyngde} = g \cdot m$, hvor $g = 9{,}82\,\frac{m}{s^2}$ og m er massen af lod + faldskærm, får vi så, at luftmodstanden for en svævende faldskærm kan beregnes som

$$F_{luft} = g \cdot m \qquad (2)$$

Formel (2) giver altså en mulighed for at bestemme F_{luft}, og formel (1) viser, at vi ønsker at undersøge om F_{luft} er proportional med v^2. (Proportionalitetskonstanten er så $k \cdot A$, idet tværsnitsarealet jo er konstant for en given faldskærm).

Udførelse:

Forsøget udføres som i eksperiment 3. Hvis dette forsøg er udført, kan måleresultaterne benyttes direkte.

Vær opmærksom på, at hvis jeres faldskærm falder et betragteligt stykke, inden den opnår den konstante fart, er det en fejlkilde.
Vurdér selv om det i jeres tilfælde betyder, at I må lave målingerne igen, hvor I nøjes med at tage tid på den sidste del af strækningen, hvor faldskærmen svæver med konstant fart. Det er så også kunne *denne højde*, der skal noteres.

Resultat-Behandling:

1. Beregn for hvert måling luftmodstanden ved hjælp af formel (2).

2. Faldskærmens hastighed findes ved at dividere højden med svævetiden:

$$v = \frac{h}{t}$$

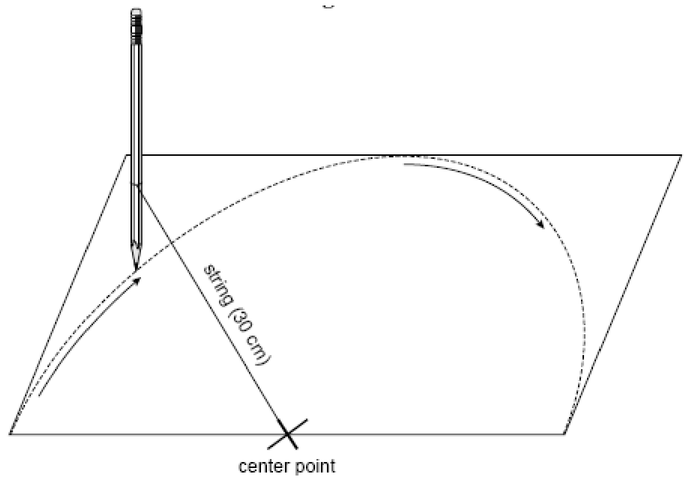
3. Indtegn (f.eks. ved brug af Excel) målepunkterne i et koordinatsystem med kvadratet på hastigheden (v^2) på 1. aksen og luftmodstanden (F_{luft}) på 2. aksen.

4. Hvad viser dette om sammenhængen mellem luftmodstand og hastighed?

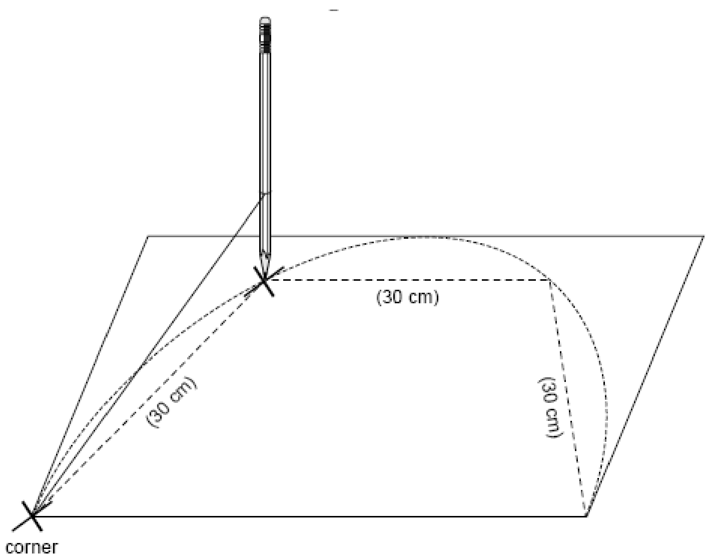
5. Beregn tværsnitsarealet A og bestem deraf konstanten k.

Appendiks A: Byg din egen faldskærm

1. Tag et let stykke stof, silkelommetørklæde, plastikstykke eller lignende.
2. Sørg for at det er kvadratisk, f.eks. 60 x 60 cm.
3. Fold stoffet på midten.
4. Tegn en halvcirkel som vist på figuren herunder:



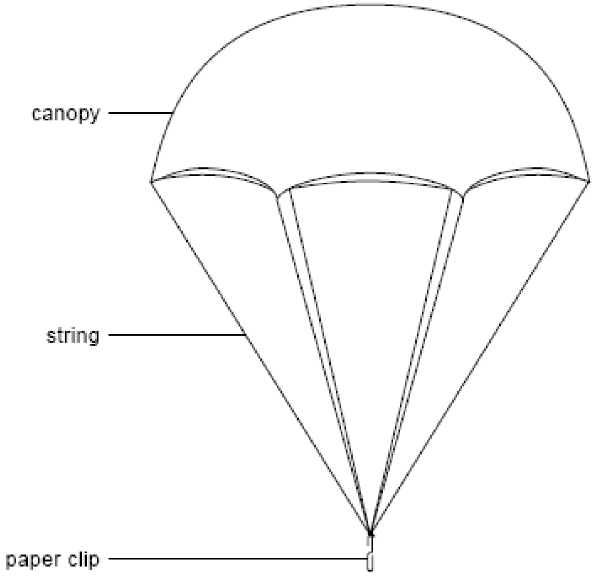
5. Markér punkterne med afstand 30 cm til hvert hjørne som vist herunder. Hjørnerne skal også selv markeres. På denne måde får man fastlagt 6 steder at fastgøre snore i faldskærmen:

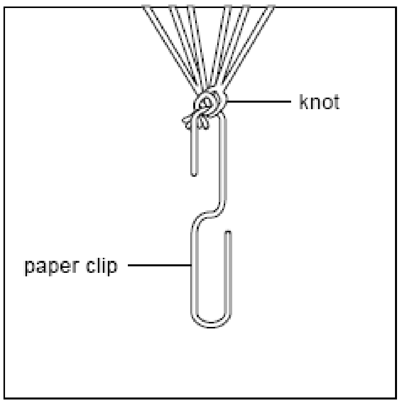


6. Skær eller klip igennem begge lag stof langs de tre rette linjer.

7. Fastgør med tape snore i hvert af de 6 markerede punkter i kanten af stoffet og bind de løse ender sammen, så alle 6 snore er lige lange.

8. Bøj en papirklip i facon som et S og sæt den i knuden:





detail showing knotted ends of strings and placement of paper clip

9. Sæt et passende lod i krogen, og du er klar til at teste din faldskærm!

Der er naturligvis muligheder for alskens variationer i facon, størrelser, materialer osv.

Man kan finde en lille vejledning i at lave en model af Leonardo da Vincis faldskærm i et af links'ene sidst i dette hæfte.

Moderne test af Leonardos faldskærm

Leonardos tegning af en faldskærm

Appendiks B: Introduktion til Excel

Her gennemgås, hvordan man får Excel til at indtegne målepunkter i et koordinatsystem, og hvordan man får lavet tendenslinjen.

Der tages udgangspunkt i eksperiment 1: En simpel model for tyngdekraften.

a) **Start *Excel:*** Vælg *Programmer* og find *Microsoft Office* og herunder *Excel* - vent indtil "timeglasset" er forsvundet.

b) **Skriv dine resultater ind i regnearket:** Lav først skemaets overskrifter i række 1 (med musen kan du trække kolonnerne bredere, så der er plads til overskrifterne). Der skal benyttes **komma** i forbindelse med decimaltal, og man kommer videre til næste *celle* ved at benytte **pilene** eller **Enter-tasten**. Når tallene er indtastet, kan skemaet evt. gemmes ved valg af *Gem som...* i *Filer*-menuen.

c) **Lav et plot over tyngdekraften som funktion af massen i et koordinatsystem:**
• Markér først alle cellerne med masserne.
• Hold Ctrl-tasten nede, mens du markerer alle værdierne for tyngdekraften ved at trække musen henover dem.
• Klik på ”Indsæt” i menulinjen, og under "Diagrammer" i værktøjslinjen vælger du symbolet, der viser nogle punkter i et koordinatsystem. Du får nu et punktplot i dit regneark.
• Du kan nu lave en titel til dit diagram ved at klikke på ”Diagramtitel”. Ved at markere diagrammet fremkommer tre ikoner til højre. Vælger du her ikonet ” + ”, får du mulighed for også at skrive f.eks. ”Masse (kg)” på x- aksen og ”Tyngdekraft (N)” på y-aksen.

f) **Få tegnet den bedste rette linje der passer til målepunkterne:**
• Højreklik på et af målepunkterne i diagrammet.
• Vælg ”Tilføj tendenslinje…”
• Der fremkommer et vindue til højre, hvor du vælger ”Lineær” (det er standardindstillingen).
• Nederst i samme vindue vælges ”Vis ligning i diagram”, således at Excel viser dig ligningen for den bedste rette linje.
• Med musen kan du flytte ligningen i diagrammet, så den bliver placeret bedst muligt.

h) **Udskriv dit flotte arbejde (!):**
• Markér det du ønsker udskrevet.

- Tryk på ”Udskriv” i *Filer*-menuen og dernæst ”Udskriv kun det markerede”.
- Nu kan du lige se, at det hele ser rigtigt ud, inden du endeligt udskriver.

Det er en fordel at gøre noget ud af måleskemaet i Excel (overskrifter, enheder, rammer, midterstil osv.). Så kan dette skema kopieres direkte ind i en rapport skrevet i WORD. Så slipper man for at lave særlige resultatskemaer i WORD. Tilsvarende med selve diagrammet: Det kan også let kopieres ind i din WORD-rapport.

Appendiks C: Modelberegning for en stiv faldskærm

I flere af eksperimenterne i dette hæfte er det en fejlkilde, hvis faldskærmen ikke med det samme er oppe i fart, når den slippes. Da luftmodstanden afhænger af hastigheden (eksperiment 8), går der ganske enkelt et lille stykke tid, inden luftmodstanden bliver lige så stor som tyngdekraften, og faldskærmen dermed har opnået sin konstante hastighed.

Hvis vi har en stiv faldskærm – dvs. en faldskærm, der er foldet helt ud lige fra starten – så kan vi lave en simpel model for, hvorledes også den første del af bevægelsen foregår.

Modellering af hastigheden:

Princippet er, at vi beregner hastigheden i nogle små skridt. Vi skal så lave mange beregninger, men de foregår alle på samme måde, så det er en smal sag for Excel at håndtere.

Hvis hastigheden til tiden t er $v(t)$ vil farten indenfor det næste lille tidsrum Δt øges på grund af tyngdekraften og svækkes på grund af luftmodstanden på det pågældende tidspunkt.

Hastigheden til tidspunktet $t + \Delta t$ bliver så (idet vi naturligvis har at $v(0) = 0$):

$$\boldsymbol{v}(\boldsymbol{t} + \Delta \boldsymbol{t}) = \boldsymbol{v}(\boldsymbol{t}) + \boldsymbol{g} \cdot \Delta \boldsymbol{t} - \boldsymbol{k}/m \cdot \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{v}(\boldsymbol{t})^2 \cdot \Delta \boldsymbol{t} \qquad (1)$$

Hvis $k \cdot A$ er kendt fra eksperiment 8, så kan man lave en ganske realistisk beregning, der viser hvor lang tid der går, før hastigheden bliver konstant.

Har man ikke en talværdi for $k \cdot A$, er det også en udmærket øvelse at prøve sig frem og se hvorledes forskellige værdier påvirker den tid, der går, før hastigheden bliver konstant.

Modellering af højden:

Man kan også modellere videre for at finde den højde, faldskærmen befinder sig i undervejs, idet vi har at

$$h(t + \Delta t) = h(t) - v(t) \cdot \Delta t \qquad (2)$$

Her skal starthøjden naturligvis kendes, og $v(t)$ bestemmes via (1).

Med udgangspunkt i formlerne herover kan Excel beregne, hvad der sker med hastigheden og højden for hvert enkelt lille tidsinterval. Man kan så få en god fornemmelse af, hvor lang tid der går, og hvor langt faldskærmen falder, inden hastigheden er blevet konstant.

Man kan udvide sin modellering til at undersøge, hvad der sker, hvis man ændrer på *k*-værdien eller arealet af faldskærmen.

Apendiks D: Rids af faldskærmens historie

1485
Leonardo da Vinci tegner verdens første skitse af en faldskærm.

1783
Luftballonpionererne Jaques og Joseph Montgolfier bruger faldskærme til at hejse dyr ned fra luftballoner.

1797
André-Jaques Garnerin gennemfører det første vellykkede udspring med faldskærm fra en luftballon. Fordi der ikke er luftkanaler i faldskærmen, svinger den kraftigt i alle retninger, men lander dog sikkert.

1799
Jeanne-Geneviève Garnerin, André-Jaques' kone, bliver den første kvindelige faldskærmsudspringer.

1800-tallet
Faldskærmsudspring bliver vovehalsunderholdning på markeder. Springene bliver foretaget fra høje konstruktioner eller fra luftballoner.

1837
Robert Cocking bliver den første person, der dør i et faldskærmsudspring.

1890
En kvinde, Katchen Paulus, gennemfører den første vovehalspræstation med faldskærm. Hun springer ud med én faldskærm, der skal udløse en anden faldskærm, som så skal bringe hende sikkert ned på jorden. Forsøget lykkes.

1911 eller 1912
Det første faldskærmsudspring fra en flyvemaskine. Grant Morton og kaptajn Albert Berry hævder begge at være den person, der foretager springet.

1930'erne
Hære over hele verden begynder at eksperimentere med tanken om at bruge faldskærmstropper. Dette bliver almindelig praksis under Anden Verdenskrig.

1960
Kaptajn Joseph Kittinger fra US Air Force får rekorden for det længste frie fald (102.800 fod, svarende til ca. 31.000 meter).

1960'erne og 1970'erne
Airfoil- og airwing-faldskærme udvikles – de giver større manøvredygtighed og fordrer en højere hastighed – hvilket er med til at sætte skub i udviklingen af faldskærmsudspring som sportsgren.

1999
Takket være en „vingedragt", designet af Patrick de Gayardon og Katarina Ollikainen, sætter Adrian Nicholas verdensrekord i det længste frie fald (dvs. uden faldskærm). Rekorden er 4 min. og 55 sek.

2000-2001
Adrian Nicholas og Katarina Ollikainen bygger en model og udfører en vellykket test af Leonardo da Vincis faldskærm. Forsøgene foregår i Sydafrika og Californien.

Fra "Adrenalin", Tycho Brahe Planetariets skolemateriale.

Appendiks E: Beskrivelse af "faldbanen"på Alsion

Området hvor "svæveobjekterne"/faldskærmene bliver afprøvet under konkurrencen på Syddansk Universitet i Sønderborg er 8 meter på den lange led og 4,60 meter på den smalle led, der hvor der er smallest. Som det fremgår af billedet herunder er banen lidt bredere øverst og nederst (smallest i højden ved 2. balkon).
Fra det sted, hvor svæveobjekterne slippes og til gulvet, er der 12,5 meter. Målet ligger lodret under dette punkt.

Kilder og links:

Om faldskærme generelt:

- *The Invention of the Parachute*, Julian Trubin:

www.juliantrubin.com/bigten/davinciparachute.html

(Leonardo da Vincis skitse og historiske oplysninger, forslag til små forsøg. Der er links til flere af nedenstående links fra denne hjemmeside)

- *How to Build a Parachute*, Bibiana da Silva:

http://www.ehow.com/how_2272749_make-mini-parachutes.html

(Simpel byggevejledning og en række andre gode links)

- *Science Projekts With Toy Parachutes*, Dr. Jean Potvin:

http://www.pcprg.com/sptp.htm

(Forslag til små forsøg og et par billeder af en hjemmelavet faldskærm).

- *Make A Parachute*, Schlumberger Science Lab.:

http://www.planetseed.com/laboratory/make-parachute

(Hjemmelavet faldskærm af silketørklæde og teori om luftmodstand og forsøgsresultater)

- *Falling From The Sky*, Charlotte Burns:

http://www.fofweb.com/Onfiles/SEOF/Science_Experiments/6-10.pdf

(Vejledning i at lave sin egen faldskærm)

- *Parks College Parachute Research Group:*

http://www.pcprg.com/

(Hjemmeside for forskningsgruppe vedrørende rigtige faldskærme)

- *The Fluid Physics of Parachute Inflation*, Carl W. Peterson, Physics Today, August 1993

(Udover forslagene til huller i en modelfaldskærm (se side 22) er der næppe noget brugbart i denne artikel med mindre man vil fordybe sig i Navier-Stokes-simuleringer o.lign.!)

Specielt om faldskærmen ("balutten") som udvikles af "Copenhagen Suborbitals":

http://ing.dk/blog/yes-we-can-hovedfaldskaermen-er-godkendt-176825

http://ing.dk/blog/ballutten-er-faerdig-173708

http://ing.dk/blog/warp-speed-mr-zulu-173845

(i dette link omtales især luftmodstanden)

http://ing.dk/blog/faldskaermstest-den-83-1100-174540

(test udført i marts 2015)

http://ing.dk/blog/resultater-af-faldskaerms-og-reefingtest-174960

(test udført i marts 2015)

http://copenhagensuborbitals.com/

(generelt om Copenhagen Suborbitals)

http://www.zazzle.co.uk/copsub

(link til Copenhagen Suborbitals merchandise butik!)

Specielt om Leonardo da Vinci og hans skitse af faldskærm:

- *Museo Nazionale della Scienza e della Tecnologia*, Milano:

http://www.museoscienza.org/english/leonardo/

(Meget om Leonardo – på engelsk)

- *Perfect Landing By Da Vinci Code*, The Age:

http://www.theage.com.au/news/world/perfect-landing-by-da-vinci-code/2008/04/27/1209234652925.html

(Nyheden om en schweizers forsøg i april 2008 med Da Vincis faldskærm).

Forsidefoto: Jev Olsen.