



2021

FLYVEPRINCIPPER

Kompendie til undervisning til UL-teori

1. udgave

DANSK UL-FLYVER UNION

Indhold

Forord	3
Faget ”Flyveprincipper”	4
Aerodynamik	4
Luftens kræfter	4
Indfaldsvinkel.....	5
Strømning omkring bæreplanet	5
Dannelse af opdrift	5
Grænselaget	6
Indfaldsvinklens betydning for opdriften	6
Modstand	7
Profiltyper	9
Kræfter på flyet.....	10
Flyets design i forhold til præstationer.....	12
Afbalancering af ror	13
Vingens vridning	13
Luftbremser	14
Flaps.....	14
Flyets hastighedspolar	14
Stabilitet	15
Stabilitet omkring tværaksen (længdestabilitet)	16
Stabilitet omkring højaksen (kursstabilitet)	16
Stabilitet omkring længdeaksen (Tværstabilitet)	16
Statisk stabilitet	17
Dynamisk stabilitet	17
Tyngdepunktsberegning	18
Styring af flyet.....	19
Ror og akser	19
Rorenes virkning	20
Højderorets virkning	20
Siderorets virkning.....	20
Krængerorets virkning	20
Brugen af flyets ror	20
Trim.....	21
Flutter	21
PIO (Pilot Induced Oscillations)	22

Begrænsninger i vægt og manøvrer	22
Vægtbegrænsninger	22
Flyets maksimale vægt	22
Tyngdepunktsberegning før start.....	22
Maksimum last	22
Mulig brændstofmængde.....	23
Hastighedsbegrænsninger og begrænsninger i G-påvirkning	23
Vindbegrænsninger/sidevind	24
Begrænsninger i tilladte manøvrer.....	24
Styrtspiral.....	24
Stall og spind.....	24
Sammenhængen mellem indfaldsvinkel og stall	24
Vingens stallegenskaber	25
Highspeed stall	25
Asymmetrisk stall og begyndende spind	26
Stall advarsel (warning)	26
"Power-on" stall	26
Spind	27
Fladspind.....	27
Ground effekt	27
Definition	27
Aerodynamisk teori - fast vinge.....	27
Effekten	28
Isdannelse.....	28

Forord

Dette kompendium er en omskrivning af Dansk Svæveflyver Unions (DSvU) kompendie, som nu udgør grundlaget for teoriundervisningen i "FLYVEPRINCIPPER" til UL-certifikatet.

I kompendiet omtales Trafik-, Bygge-, og Boligstyrelsen for nemheds skyld som "Styrelsen".

Kompendiet henvender sig til lærere og elever, som fremover skal gennemgå faget FLYVEPRINCIPPER til UL-certifikat.

DULFU vil være taknemmelig, hvis læsere af kompendiet måtte opdage forhold, der ikke er i overensstemmelse med gældende regler eller god praksis og meddele dette til sekretariatet, der så vil foranledige kompendiet rettet til.

Kompendiet vil løbende blive opdateret i det omfang der måtte ske ændringer i gældende bestemmelser eller der er forhold der i øvrigt tilsiger en opdatering.

Tak til Dansk Svæveflyver Union, der velvilligt har ladet os omskrive deres kompendium til brug i undervisningen til UL-teoriprøven.

Redaktionen er afsluttet i november 2020.

Dansk UL-Flyver Union.

Faget "Flyveprincipper"

Teorien bag det at kunne flyve ligger i faget "Flyveprincipper".

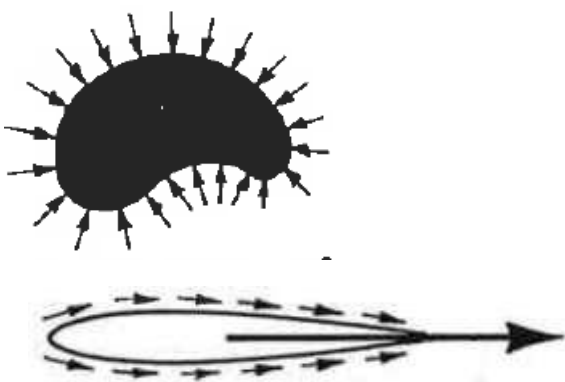
Fly er konstrueret således, at de flyver godt og sikkert, men hvis flyvningen kommer uden for grænserne for sikker flyvning, er det den viden man får i "Flyveprincipper", som sætter piloten i stand til at håndtere en potentiel farlig situation. Teorien gør yderligere det, at piloten altid ved, hvilke grænser han skal holde flyvningen inden for, for at flyet ikke tager skade eller i værste fald ikke kan holde til påvirkningerne under flyvningen.

Faget er også en vigtig ballast for instruktører, når de skal træne eleverne og – ikke mindst – efter flyvningen gennemgå, hvad der gik godt, og hvad der kan forbedres og herunder, hvorfor flyet gjorde noget andet, end det som eleven ville have det til at gøre.

Aerodynamik

Luftens kræfter

Et fly er, ligesom ethvert legeme, påvirket af luftens kræfter. Trykkræfterne (statisk tryk) virker altid vinkelret ind på fly og er upåvirket af, om det bevæger sig. Hvis flyet bevæger sig, er det påvirket af friktions- eller gnidningskræfter, og disse virker til gengæld parallelt med flyet og går i modsat retning som bevægelsen. Når noget bevæger sig fremad, virker friktionskræfterne bagud. Trykket som opstår ved bevægelse, kaldes det dynamiske tryk. Dynamiske kræfter kan også opstå, medens flyet står stille, hvis vinden påvirker flyet.

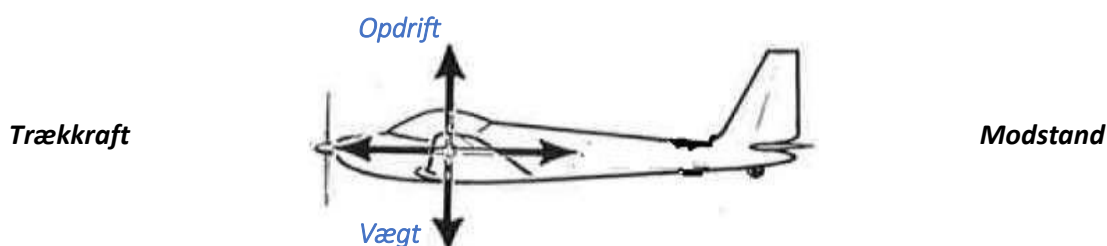


Trykkræfterne virker altid vinkelret ind på et legeme – herunder et fly. Det statiske tryk er der, selv om legemet er i ro

Friktionskræfterne virker parallelt med bevægelsen og i modsat retning. Disse kræfter er en del af det dynamiske tryk og kræver bevægelse

Opdriften på en vinge er resultatet af, at trykkræfterne er mindre på vingens overside end på vingens underside. Opdriften er hele baggrunden for, at vi overhovedet kan flyve, og derfor skal vi beskæftige os en del med den i faget "Flyveprincipper". Vi vil komme til at se, at profilet på en vinge og vingens overflade har stor betydning for dannelsen af opdrift og for flyets præstationer i det hele taget.

Udover trykkræfter og friktionskræfter er flyet naturligvis også påvirket af tyngdekraften, og det er påvirket af den opdrift, som opstår på vingen. Et motorfly med er tillige påvirket af en trækraft, som kommer fra motoren via propellen.

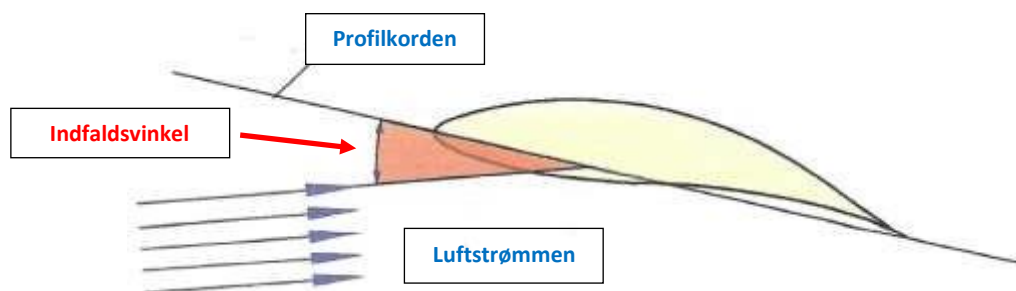


Udover propeller der udøver trækraft, findes der også fly, hvor propellen er anbragt bag cockpittet og fungerer ved ligesom at skubbe flyet, men det ændrer ikke noget på forholdet mellem "skubbekraft", modstand, opdrift og vægt.

Med en kraftig motor kan flyet have tendens til at rotere om sin længdeakse på grund af propellens modstand, hvis der gives for meget og for pludseligt gas, f.eks. i forbindelse med en afbrudt landing. Her kommer flyet jo ind med relativ lav hastighed og meget reducerede omdrejninger. Hvis man så vil lave en overskydning, skal der gives gas med en vis varsomhed for ikke at flyet roterer om sin længdeakse.

Indfaldsvinkel

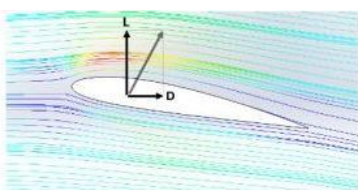
Vinklen mellem vingeprofilets korde og den indkommende vind kaldes for indfaldsvinklen og betegnes med bogstavet α . Indfaldsvinklen har indflydelse på, hvor meget opdrift vingen giver.



Strømning omkring bæreplanet

Når et vingeprofil bevæger sig gennem luften, vil profilets form tvinge luftstrømmen omkring sig og dermed forårsage hastighedsændringer i luften på vingens over- og underside.

Ved positive indfaldsvinkler ($\alpha > 0^\circ$) vil hastigheden på oversiden af vingen øges mens hastigheden på undersiden af vingen vil mindskes. Denne hastighedsforskel vil, ifølge Bernoullis ligning medføre en tryk-



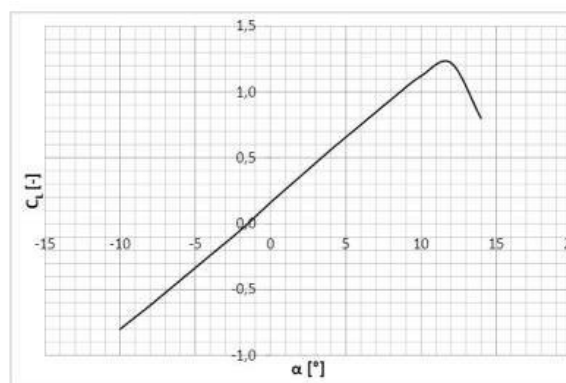
forskel på vingens over- og underside, hvor trykket på vingens overside vil være mindre end på undersiden, og "løfte" vingen og dermed også flyet. Den samlede kraft, der påvirker vingeprofilet kan deles op i to komponenter: den del, der virker vinkelret på den relative vind er opdriften(L), mens den del der virker langs med den relative vind er luftmodstanden(D). Både vingeprofilets krumning og vingens indfaldsvinkel har indflydelse på, hvor meget opdrift

vingen giver. Opdriften fra krumningen er uafhængig af indfaldsvinklen.

Dannelse af opdrift

Opdriften på en flyvinge opstår ved, at vingen bevæger sig gennem luften, og på grund af vingens udformning OG indfaldsvinkel passerer luftstrømmen over vingen med højere hastighed end den tilsvarende luftstrøm under vingen. Derved opstår der et lavere tryk på oversiden af vingen i forhold til trykket på undersiden af vingen. Langt den største del af opdriften kommer dermed fra oversiden af vingen, hvor der er undertryk. Dog bidrager flyets haleplan og kroppen også i mere eller mindre grad til opdriften.

Generelt gælder det, at opdriften på en vinge stiger med kvadratet af stigningen i hastigheden. Det



Liftkurve for vingeprofil

betyder, at en fordobling af hastigheden giver en firdobling af opdriften. Anderledes er det med vingearialet. Her gælder reglen, at en fordobling af vingearialet betyder en fordobling af opdriften.

Opdriften (også kaldet lift) afhænger af vingeprofilets krumning og vingens indfaldsvinkel. Disse to egenskaber kan beskrives i en faktor kaldet liftkoefficienten. Liftkoefficienten er en enhedsløs faktor der beskriver hvor meget opdrift en vinge kan give ved en bestemt konfiguration. For at finde den egentlige opdriftskraft kan liftformlen anvendes: $L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot C_L$. Her er L opdriftskraften (lift) i Newton, ρ er luftens densitet [kg/m^3], v er vindhastigheden [m/s], A er vingens planforme vingearial [m^2] og C_L er den enhedsløse liftkoefficient. I denne formel beskriver ρ og v de ydre faktorer der påvirker vingen, mens A og C_L beskriver vingens egne egenskaber. En meget anvendt, grafisk måde at illustrere et vingeprofiles egenskaber på, er at tegne liftkurven for vingeprofilet. Denne kurve beskriver liftkoefficienten som funktion af indfaldsvinklen. Læg mærke til, at liftkurven ikke skærer (0,0). Der, hvor indfaldsvinklen er 0, vil der stadig være lift pga. vingeprofilets krumning. Hvis vingeprofilet ingen krumning har, vil liftkurven skære i (0,0). Bemærk også, at liftkoefficienten aftager pludseligt omkring 12° indfaldsvinkel. Dette fænomen kan, afhængig af vingeprofilet, indtræffe mellem 12° og 16° indfaldsvinkel. Det kaldes *stall* og skyldes, at luftstrømmen ikke længere kan følge profilets krumning på vingens overside og løsriveres. Den indfaldsvinkel, hvor *stall* indtræder, er som nævnt afhængig af vingeprofilet. Bemærk desuden, at liftkurven er tilnærmelsesvis lineær op til stallet.

Dannelse af opdrift har gennem mange år været genstand for videnskabsmændenes forskning, og ovennævnte forklaring af opdriften er nem at forstå, men retfærdighedsvis skal det nævnes, at der også er en opfattelse af dannelsen af opdrift med udgangspunkt i Newtons 3. lov, som siger, at luftstrømmens retning ændrer sig ved passage af vingen, således at den er rettet nedad, når den har passeret. Denne nedadrettede kraft giver en modsat rettet kraft, der løfter vingen og dermed skaber opdriften.

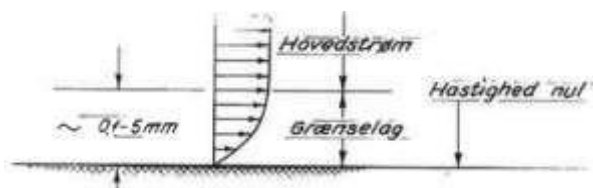
Grænselaget

Vingens grænselag er overgangen fra vingens overflade til luftstrømmen henover vingen. Helt nede ved vingens overflade er luften i fuldstændig ro, medens den en lille smule højere har en høj hastighed.

Grænselaget har stor betydning for friktionsmodstanden på vingen. Modstanden er mindre, så længe luftstrømmen bevæger sig jævnt henover vingen (laminar strømning), men hvis luftstrømmen slår fra og ikke længere kan følge vingens overflade (turbulent strømning) stiger modstanden væsentligt.

Omslagspunktet på et profil er det sted, hvor luftstrømme skifter fra at være laminar til at være turbulent, og separationspunktet er det sted, hvor luftstrømmen slår fra profilet.

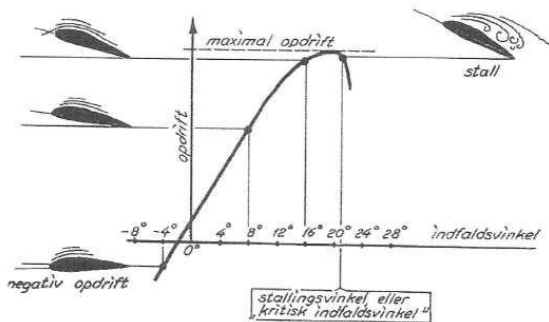
Derfor gælder det om at konstruere profilet således, at luftstrømmen følger profilet længst muligt, og det betyder normalt et tyndt profil. Et tyndt profil giver generelt en dårligere opdrift end et krumt profil. Derfor er konstruktionen af et profil altid et kompromis mellem laminar strømning og dermed dårlige stall-egenskaber og så opdrift med dårlig performance ved høje hastigheder.



Grænselaget påvirkes af vingens overflade, og når svæveflyvere altid vasker deres fly, skyldes det netop, at en god overflade giver bedre præstationer

Indfaldsvinklens betydning for opdriften

FLYVEPRINCIPPER



Sammenhængen mellem opdrift og indfaldsvinkel er således, at opdriften stiger med indfaldsvinklen, indtil indfaldsvinklen bliver så stor, at luftstrømmen slår fra vingens overflade, hvorefter vingen staller. Indfaldsvinklen kaldes "kritisk", når den når punktet lige før flyet staller.

Flyet staller ikke ved samme hastighed, men altid ved samme

indfaldsvin-

Jo større indfaldsvinklen er – desto større er opdriften, men kun indtil et vist niveau, hvor vingen staller.

Stallingshastigheden vil være påvirket af indfaldsvinklen, når vingen både skal bære flyet og ændre flyveretningen – uanset om det er ud af et dyk eller i et drej.

kel. Når flyets håndbog (AFM/POH) for et fly taler om flyets stallingshastighed, er det stallingshastigheden ved 1 G – dvs. under ligeudflyvning uden yderligere G-påvirkning. Hvorfor stiger stallingshastigheden så ved højere G-påvirkning? Det gør den, fordi vingen her skal præstere mere end blot at bære flyet. Hvis det sker i et dyk, stiger stallingshastigheden under opretning, fordi vingen – udover at skulle bære flyet – også skal skabe den opdrift, der skal trække flyet op.

Når stallingshastigheden stiger i et drej, skyldes det at vingen – udover at bære flyet – skal trække flyet rundt i et drej, hvor vingens opdrift har en væsentlig rolle i at dreje flyet, når det ligger under krængning. Der er en bestemt sammenhæng mellem krængning i drej og forøgelse af stallingshastigheden. Den kan opgøres således:

Krængning i grader	0	25	35	45	55	60	70
Ekstra hastighed i %	0	5	10	20	30	40	70
ift. 80 km/t	80	84	88	95	105	114	137

Modstand

Når et fly bevæger sig gennem luften påvirkes det af forskellige former for modstand, og vi skal i dette kompendie se på:

- Formmodstand
- Gnidningsmodstand
- Profilmodstand
- Induceret modstand
- Interferensmodstand



SAVANNAH VG

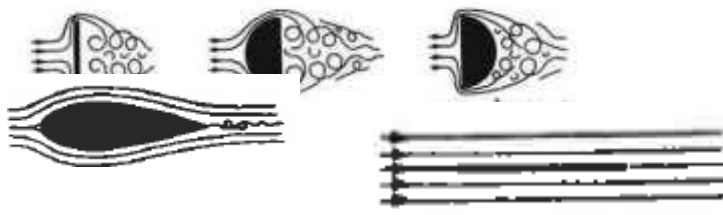
Formmodstand

Formmodstand har som navnet siger sammenhæng med den form, som et legeme har. Vi kan intuitivt nok regne ud, at et relativt slankt kompositfly som en 321 ATEC Faeta har en mindre formmodstand end en ældre mere kantet Savannah, der er bygget af aluminium



321 ATEC Faeta

Gnidningsmodstand



På figurerne til venstre kan man tydeligt se, at hvirvlerne er store bag de øverste figurer, men meget mindre bag den dråbeformede figur og helt væk ved nederste figur til højre

Vi så allerede på grænselaget under luftens strømning omkring et bæreplan, og også her opstår der modstand, fordi luftens hastighed hen over overfladen er forskellig. På den første del af bæreplanet er strømmingen laminar – dvs. parallel med overfladen, men på et tidspunkt slår luftstrømmen fra og bliver turbulent, hvilket vil sige at luftstrømme danner lufthvirvler, og luftens hastighed falder.

Overfladens beskaffenhed har stor betydning for omslagspunktet, der er det punkt, hvor luftens strømning overgår fra laminar til turbulent. Moderne laminarprofiler er netop konstrueret for at trække omslagspunktet så langt bagud som muligt. Vi kan også gøre noget selv. Jo renere vingens forkant er, desto bedre bliver luftstrømmen, og samme virkning har det, når vi polerer vingerne godt, så de bliver helt glatte.

Profilmodstand

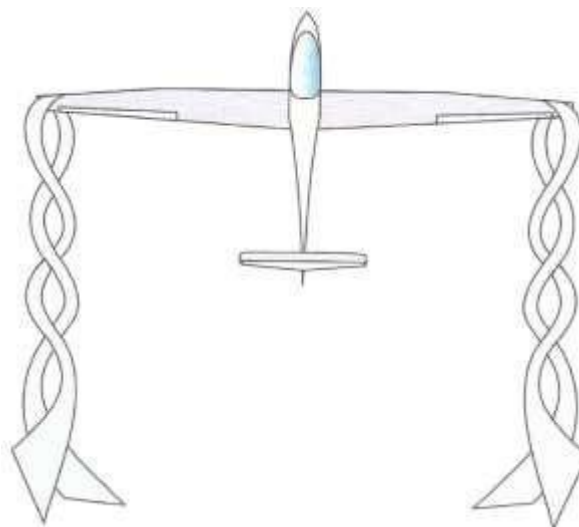
Summen af formmodstand og gnidningsmodstand kaldes for profilmodstand, og profilmodstanden er proportional med luftens vægtfylde (luftens tæthed) og med tværsnitsarealet, medens det er proportionalt med kvadratet af hastigheden. Hvis hastigheden fordobles, firedobles profilmodstanden.

Induceret modstand

Induceret modstand opstår ved at overtrykket på undersiden af vingen udlignes med undertrykket på oversiden af vingen ude ved vingetipperne som vist på tegningerne af et svævefly. Herved dannes der randhvirvler, som fra UL-fly og andre mindre fly er helt ufarlige, men som kan være voldsomme og særdeles farlige, hvis de kommer fra større fly. For at reducere den inducerede modstand forsynes flyene i større og større grad med små *winglets*, der reducerer tipomstrømningen.



Overtrykket under vingen løber rundt om vingetippen og op på oversiden, hvor det udligner undertrykket. Når flyet bevæger sig fremad, dannes der randhvirvler



Interferensmodstand

Interferensmodstand opstår langs skarpe overgange – f.eks. mellem vingerod og kroppen på et fly samt i langsgående samlinger – f.eks. ved cockpitkanten og i samlingen mellem vinge og krop. En omhyggelig afdækning af samlinger med f.eks. fearings, vil reducere interferensmodstanden, men den vil ikke helt forsvinde, idet de overgange mellem vinge og krop og evt. mellem haleplan og halefinne fortsat vil danne lidt modstand.

Moderne fly er i dag konstrueret således, at disse skarpe overgange bliver rundet af for at reducere denne type modstand.

Sammenhæng mellem opdrift og modstand

Størrelsen på opdriften og den dermed forbundne modstand afhænger af flere faktorer:

Hastigheden

Luftens tæthed (lufttryk) og temperatur

Vingearreal og -form

Vingeprofilets egenskaber

Heraf følger nogle regler om opdrift og modstand:

Opdrift og modstand ændrer sig med kvadratet af hastighedsændringen

Opdrift og modstand ændrer sig lineært med luftens tæthed (lufttryk) og temperatur

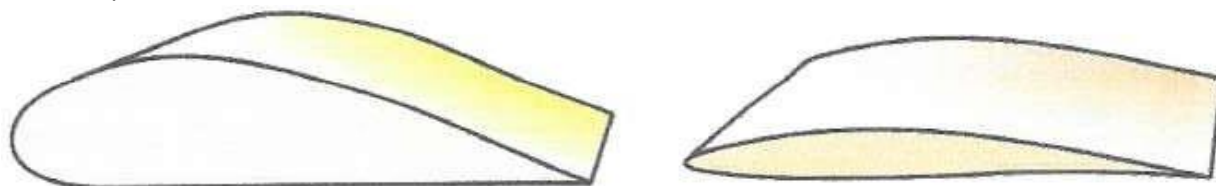
Opdrift og modstand ændrer sig lineært med vingeararealet

Opdrift og modstand ændrer sig i forhold til profilformen

Hvor der er en direkte sammenhæng i a) – c), er der ikke nogen sammenhæng, der kan beregnes for d), men der er alligevel en stor sammenhæng, som vi vil se på i afsnittet om profiltyper.

Profiltyper

Som allerede nævnt ovenfor har formen på profilet stor betydning for både opdrift og modstand. Her er to eksempler:

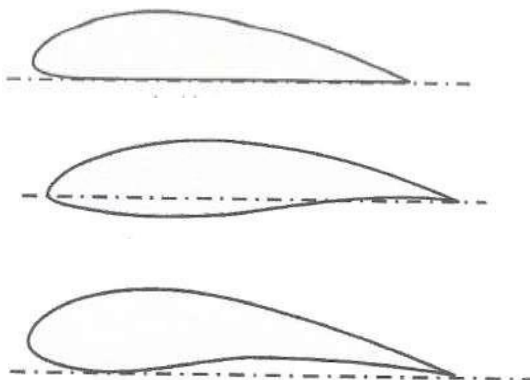


Profilet til venstre er ret tykt og krumt, og et sådant profil giver en god opdrift og gode langsomflyveegenskaber, men profilmodstanden er til gengæld også høj. Profilet til højre er meget tyndere og dermed langt bedre egnet til høje hastigheder. Og modstanden er naturligvis noget mindre end hos det krumme profil. Til gengæld kan et sådan profil være kritisk og have dårlige langsomflyveegenskaber.

Vi skelner mellem følgende hovedtyper af vingeprofiler:



Symmetrisk profil der ikke har noget opdrift, hvis indfaldsvinklen = 0. Krumningen er ens på begge sider, og det symmetriske profil anvendes især til halefinne på et fly



Profil med lige underside anvendes til bærende profiler, hvor flyveegenskaberne er harmoniske og ufarlige

Laminarprofilet, som i dag er standard ved bygning af fly. Det tykkeste punkt ligger langt tilbage for at flytte omslagspunktet for luftstrømme så langt bagud som muligt

Profiler med hvælvet underside har en god aerodynamik og giver en god opdrift – selv ved en lille indfaldsvinkel, men dette profil har ikke så gode hurtigflyvningsegenskaber som laminarprofilet.

Kræfter på flyet

Flyet er påvirket af fire kræfter under flyvning:

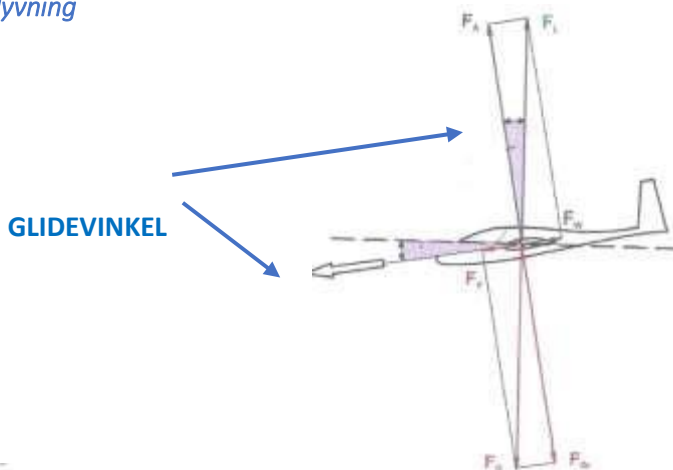
- Tyngdekraften
- Opdriften, som modvirker tyngdekraften
- Modstanden
- Fremdriften fra propellen

Et fly uden motorkraft (feks. med standset motor eller et svævefly) har ikke nogen selvstændig fremdrift, og må i så fald bruge lidt af sin tyngdekraft til at komme frem. Dermed befinder flyet sig i et dyk under ligeud flyvning. Vinklen mellem det vandrette plan og flyets bane kaldes for glidevinklen. Jo mindre denne er, jo længere kan flyet flyve. Dette kommer til udtryk flyets hastighedspolar, som bliver behandlet senere og i faget Flyvepræstationer- og planlægning.

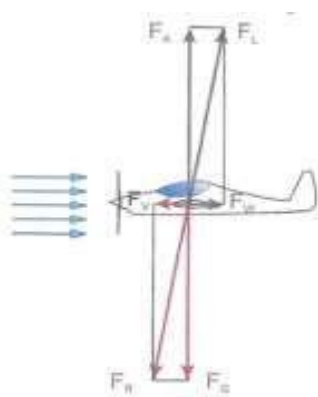
Det teoretiske punkt i profilet, hvor alle luftkræfter fra opdrift og modstand samles, kaldes for profilets trykcenter.

Kræfter under ligeudflyvning

Ved svæveflyvning:



Ved motorflyvning:



Ved motordrevne fly opnås en modsatrettet kraft med propellen i forhold til modstanden, der virker i den modsatte retning, og som har den samme størrelse som modstanden ved konstant højde og hastighed. Dermed kan vingen producere så megen opdrift, at det modsvarer den samlede vægt.

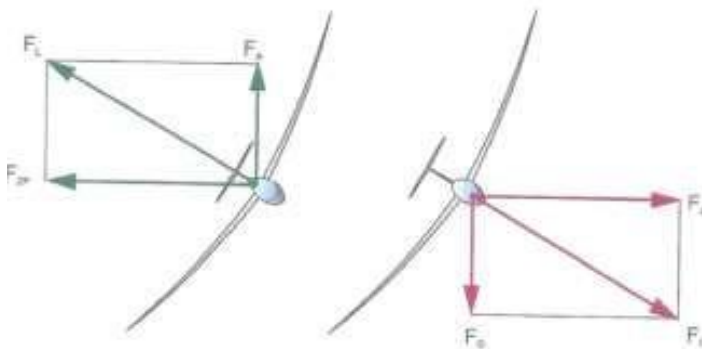
Kræfter under drej

Under det stationære drej er flyet udsat for yderligere en kraft – nemlig centrifugalkraften. Den virker ud ad i det horisontale plan og må ligeledes udlignes med en modsatrettet kraft, som hedder centripetalkraften.

Under kurveflyvning skal vingen præstere en opdrift, der svarer til flyets vægt med tillæg af den kraft, der skal til for at dreje flyet.

Jfr. tidligere er det nødvendigt at øge indfaldsvinklen og dermed opdriften for at kunne præstere denne

større opdrift. En større indfaldsvinkel bringer vingen tættere på stall, og dermed kan vi konkludere, at stallingshastigheden er højere under drej end under ligeudflyvning.



Trykcentervandring

Når indfaldsvinklen øges rykker trykcentret (opdriftscentret) fremad, medens det rykker bagud, når indfaldsvinklen bliver mindre.



Kurveradius

En kurve kan flyves med en ubegrænset stor radius, men der er til gengæld grænser for, hvor lille en radius en kurve kan flyves med. Hvis kurveradius skal holdes konstant, er der to variabler, som kan bruges:

- Hastigheden
- Krængningen

Vi kan herefter konkludere:

- Jo højere hastighed, desto større krængning skal der til for at holde samme radius
- Jo mindre krængning, desto større kurveradius ved samme hastighed
- Jo snævrere kurven er, desto større skal krængningen være ved samme hastighed.

Planbelastningen:

Ved planbelastning forstås forholdet mellem flyets samlede vægt og planarealet. Hvis flyet f.eks. vejer 350 kg og planarealet er 10 m², er planbelastningen 35 kg/m², og hvis det samme fly vejer 425 kg, fordi flyet nu er tanket op, og piloten har bagage med, vil planbelastningen være 42,5 kg/m².

Den normale planbelastning for et UL-fly med max. MTOM på 450 kg. ligger mellem 35 og 40 kg/m².

G-påvirkninger

Når et fly flyver lige ud i en glideflyvning, er det påvirket med en belastning på 1 G – svarende til flyets samlede vægt. Hvis flyet dykker og skal rette op fra et sådan dyk, vil flyet være påvirket af mere end 1 G, måske 2 G, fordi flyets vinger skal kunne både bære flyets vægt og præstere den yderligere opdrift, der får flyet til at rette op igen.

Når flyet flyver ind i kurven – uanset om det er en opretning fra et dyk eller det er under drej – taler vi om positive G. Det betyder, at G-kræfterne virker modsat som flyets flyvebane, og piloten mærker det ved, at han bliver presset ned i sædet.

Hvis flyet flyver den modsatte vej – f.eks. hvis piloten skubber styrepinden frem, mens flyet er under stigning med tilstrækkelig hastighed – vil G-påvirkningerne være rettet den modsatte vej – dvs. ud af kurven, og i det pågældende tilfælde ville piloten mærke, at han løftes op i sædet, og kun hans seler forhindrer ham i at forlade sædet.

UL-fly kan holde til G-påvirkninger inden for visse grænser, og de må f.eks. trække op til positiv 4g og negativ 2g uden flaps uden at strukturen derved tager skade. Med fulde flaps falder værdierne til positiv 2g og 0g.

G-påvirkningen er årsagen til, at stall-hastigheden i drej og under opretning fra dyk er højere end under normal ligeud flyvning, og sammenhængen ses i følgende skema:

Krængning i grader	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
G-påvirkning	1,00	1,02	1,06	1,15	1,31	1,56	2,00	2,92	5,76	∞
Faktor stall-hastighed*	1,00	1,01	1,03	1,07	1,14	1,25	1,42	1,71	2,40	∞
Stall-hastighed km/t	70	71	72	75	80	87	99	120	168	∞

*) Væksten i faktoren for stigningen i stall-hastigheden svarer til kvadratroden af G-påvirkningen

Flyets design i forhold til præstationer

Et fly er konstrueret således, at det så vidt muligt lever op til de krav, som køberen af flyet forventer. Hvis en flyveklub ønsker et skolefly til grunduddannelse i klubben, vil den formentlig efterspørge et fly, hvor en elev har nemt ved at lære de grundlæggende principper ved flyvningen, og klubben vil helt sikkert undgå kritiske egenskaber, som kunne bringe en elev – og instruktøren – i en situation, hvor han ikke længere er i stand til at styre flyet, eller hvor han får behov for at bringe flyet ud af en flyvetilstand, som hverken han eller instruktøren har ønsket, at flyet skulle komme i.

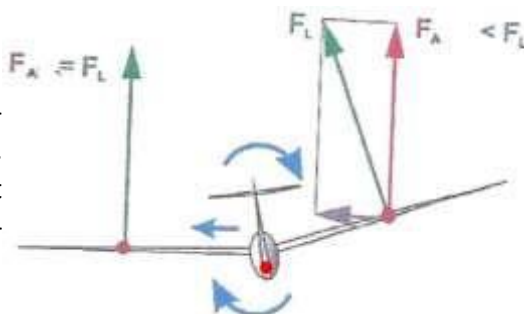
Hvis en meget rutineret pilot ønsker at købe sit eget fly, som han skal kunne bruge til lange rejseflyvninger, vil han efterspørge andre egenskaber end dem, som gælder for flyveklubbens skolefly. At et sådant fly så er noget sværere at lande end et skolefly og måske har mere kritiske stall-egenskaber, accepterer køberen, fordi han har den rutine og erfaring, der skal til for at flyve i netop sådan et fly.

Det evige dilemma vil altid være, at man ikke kan få alt i samme fly. Derfor er f.eks. en Savannah ikke det hurtigste fly til langfart, ligesom f.eks. en Shark slet ikke egner sig til at grunduddanne nye piloter i.

I dette kompendie beskæftiger vi os med de egenskaber, som er væsentlige for eleven, der skal uddannes til at få et flyvecertifikat.

V-form

Stabilitet omkring længdeaksen (Tværstabilitet eller rullestabilitet) er nødvendig for, at flyet trods turbulens m.v. søger tilbage til ligeud flyvning med vandrette vinger. Det er årsagen til, at langt de fleste fly er bygget med en V-form, således vingerne set forfra danner et meget fladt V.



Denne stabilitet efterspørges i alle fly – uanset om det er skolefly eller fly til rejsebrug. Kun fly, som er

særligt bygget til kunstflyvning, har en opbygning, hvor vingerne ikke har V-form, men går fuldstændig vinkelret ind på flyets krop.

V-formen gør, at højre vinge, der går op i krængningen, laver en mindre opdrift end venstre vinge, der i dette tilfælde ligger vandret. Derfor vil venstre vinge alt andet lige producere en højere opdrift og dermed rette flyet op til højre, så det igen flyver vandret.

Hvis flyets tyngdepunkt ligger lavere end flyets længdeakse, vil denne placering også medvirke til at flyet rettes op i vandret stilling.

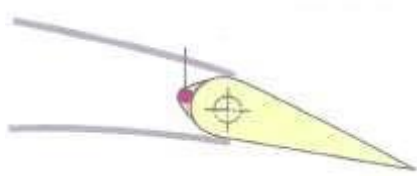
Afbalancering af ror

Afbalancering af rorene – især krængeror og højderor – har to formål:

→ Undgå egensvingninger i rorene (flutter)

→ Lette rortrykket ved betjening af rorene

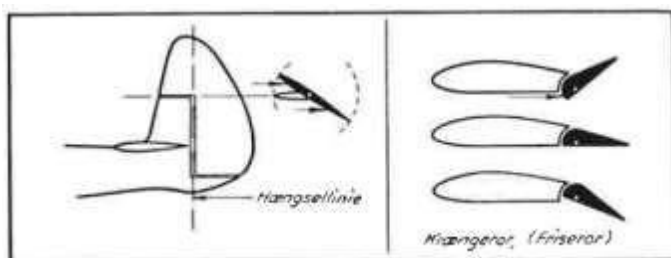
Flutter i krængerorene er en særdeles farlig tilstand, som i værste fald kan få flyet til at bryde sammen i luften. Derfor skal dette for enhver pris undgås. Det sker ved at masseafbalancere krængerorene med blyvægte, så rorene er neutrale omkring den akse, de bevæger sig om.



Masseafbalancering sker ved, at der på forsiden af roret placeres en blystang eller anden vægt langs med forkanten på roret. Dermed trækkes tyngdepunktet på roret frem mod den akse, som roret bevæger sig omkring. Alternativet er, at roret konstrueres således, at der er mere gods på forsiden af akse.

Masseafbalancering af krængeror hjælper også med at lette rortrykket ved betjening af roret, men hvis der er behov for en yderligere lettelse ud over masseafbalanceringen, skal der ske en aerodynamisk afbalancering af rorfladerne. Aerodynamisk afbalancering mindsker rortrykket. Det sker ved:

- En del af rorfladen sidder på den modsatte side af akse end selve rorfladen
- Roret er forskudt således, at det regulerer luftmodstanden ved brug.



På figuren til venstre ser vi et sideror, hvis top slår ud til den modsatte side som siderorets udslag.

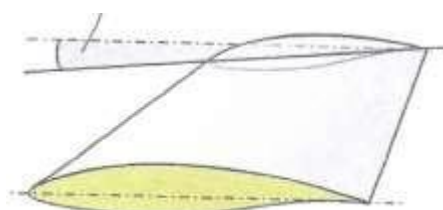
På figuren til højre ser vi et krængeror, som skaber større modstand, når krængeroret går op og dermed mindsker den kraft der skal bruges.

Vingens vridning

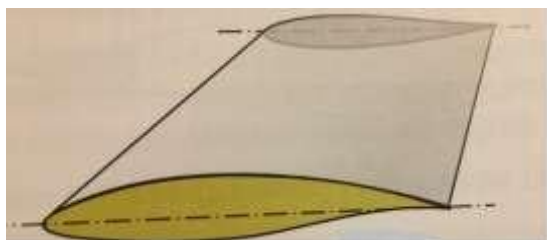
Spørgsmålet om vingens vridning drejer sig om, at vingen – i tilfælde af stall – staller inde fra roden og ud mod vingetippen, så piloten bevarer krængerorsvirkningen så længe som muligt for dermed at kunne styre flyet ud af en stallet tilstand og evt. et begyndende spind.

Vingen kan vrides på to måder:

- Geometrisk vridning
- Aerodynamisk vridning



Geometrisk vridning betyder, at indfaldsvinklen i vingetippen er mindre end indfaldsvinklen ved vingeroden. Det vil betyde, at vingen staller sidst i vingetippen, og dermed bevarer piloten styringen af flyet længst muligt.



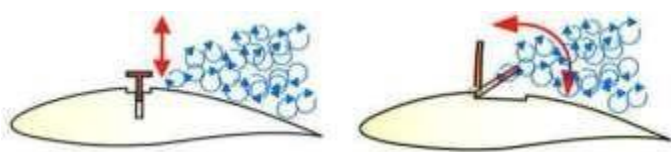
Aerodynamisk vridning betyder, at vingens profil i vingetippen er mere krum end inde ved vingeroden. Jfr. ovenfor er et krumt profil mindre stall-villigt end et profil, der er tyndt og slankt. Hvis vingen er konstrueret således, at vingeprofilet er mere krumt i vingetippen, vil vingen få samme stall-egenskaber, som hvis vingen havde været geometrisk vredet.

Luftbremser

Luftbremser findes kun på ganske få UL-fly. Luftbremserne har til opgave at reducere vingens opdrift samt skabe modstand. Jo større fladen er, som slås ud i luftstrømme, desto større bliver modstanden og dermed forøges synkehastigheden.

Luftbremser, som slås ud på oversiden af vingen, har den ulempe, at de reducerer den maksimale opdrift. Derved forøges mindsteflyvehastigheden, og landingshastigheden med luftbremser ude skal dermed være større, og landingen skal flyves med en tilstrækkelig fartreserve.

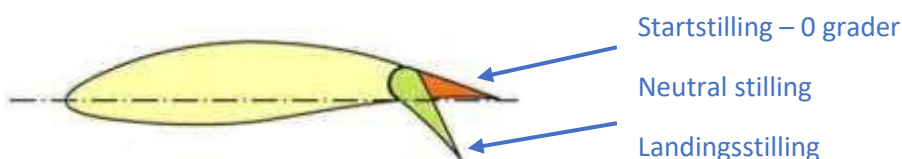
Omvendt har tabet af opdrift med aktiverede luftbremser så den fordel, at flyet kan landes helt præcist, hvor det svæver tæt hen over jorden med noget, der ligner mindste flyvehastighed.



Luftbremser findes i forskellige udformninger. Den mest almindelige slås ud på oversiden vinkelret på vingens overside. Andre luftbremser vippes ud i luftstrømmen – f.eks. på en Rotax-Falke

Flaps

Flaps ændrer vingens indfaldsvinkel og giver en større opdrift, men skaber også større modstand jo længere de kommer ud. Virkningen af flaps er en følge af en ændring af profilets krumning og den deraf følgende ændring af indfaldsvinklen.



beskeden forøgelse af modstanden.

I forbindelse med start sættes flapsene i en stilling, der giver større opdrift men kun en

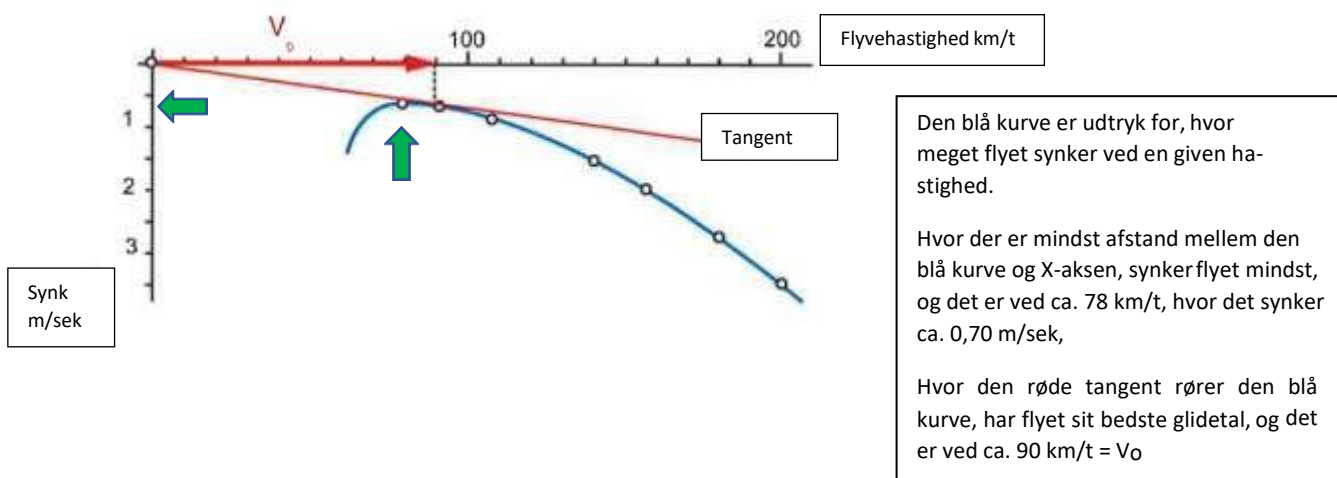
Under landingen sættes flaps i positiv stilling, således at flyet kan flyves ind til landing med en lavere hastighed, og så flyet kan svæves ud ved en relativ lav hastighed. I kraftig vind, og især i sidevind, kan det være lettere at styre flyet uden brug af flaps, idet man derved kan lande med en højere hastighed.

Flyets hastighedspolar

Optimering af brugen af flyet i forskellige luftmasser vil blive nærmere behandlet i faget "Flyvepræstationer og -planlægning", men vi skal også kort ind på flyets hastighedspolar i dette fag – Flyveprincipper –

fordi flyets design, profiler og modstand har afgørende betydning for, hvor godt flyet flyver, og dette kommer netop til udtryk i flyets hastighedspolar, som er flyets synkehastighed som en funktion af flyets vandrette flyvehastighed. Hastighedspolaren er en kurve, som viser hvor meget flyet synker ved en given hastighed, og dermed kan man på kurven se, hvor hastigheden for flyets bedste glidetal ligger.

Både modvind og medvind, stig og synk har indflydelse på, hvor flyets bedste præstationer ligger, og arbejdet med dette vil ske i "Flyvepræstationer og -planlægning", men her vil vi se på hastighedspolaren i sin grundform: Flyets flyvning i rolig luft og uden brug af motorkraft. Illustrationen viser en graf for et typisk svævefly, men der er i princippet ingen forskel mellem et svævefly og et motorfly, bortset fra svæveflyets bedre præstationer:

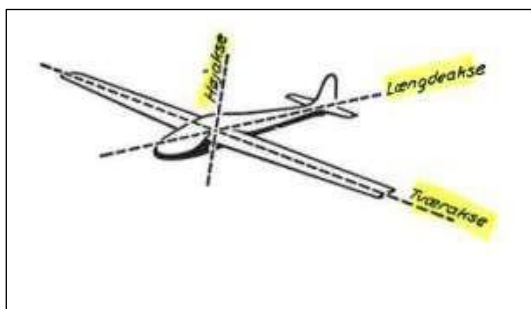


Mindste synk får flyet ved en hastighed på ca. 78 km/t, og det betyder, at flyet skal flyves ved en lav hastighed, når flyet flyver i termik og dermed får det mest mulige ud af den opstigende luft i form af brændstofbesparelse. Den lave hastighed gør til gengæld, at flyet vil være tættere på et stall, så det skal piloten naturligvis også være opmærksom på.

Hvis flyet skal nå så langt som muligt, skal det flyves med sit bedste glidetal, og det får dette fly ved en hastighed på ca. 90 km/t. Her når flyet længst, og det betyder så også, at flyet skal flyves med hastigheden for bedste glidetal, når piloten f.eks. skal finde en nødlandingsplads. Med det bedste glidetal kan han nå at afsøge det størst mulige område. Glidetallet er udtryk for hvor mange meter flyet kan flyve pr. meter højde det taber.

Jo tungere flyet er – desto højere hastighed for bedste glidetal. Flyets glidetal ændres ikke ved at gøre flyet tungere, det er alene hastigheden for glidetallet, som bliver bedre.

Stabilitet



Tværakse:	Længdestabilitet
Højakse:	Kurstabilitet
Længdeakse:	Tværstabilitet

Stabilitet omkring tværaksen (længdestabilitet)

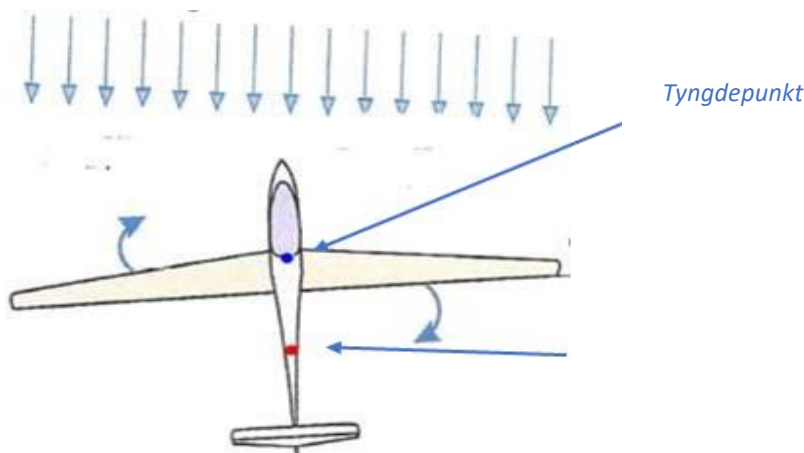
Flyet bevæger sig omkring tre akser, og disse tre akser mødes i flyets tyngdepunkt:

Flyets længdestabilitet er et udtryk for dets evne til at vende tilbage til den oprindelige stilling, efter at det har været udsat for en påvirkning. Længdestabiliteten er den vigtigste af flyets stabiliteter.

Et fly skal have en vis grad af egenstabilitet, og det skal kunne styres omkring de tre akser ved alle hastigheder, som flyet må flyves med. Generelt skelner vi mellem statisk stabilitet og dynamisk stabilitet. Et fly SKAL være statisk stabilt – dvs. have evnen til selv at finde tilbage til udgangspunktet, men flyet må dog ikke være så stabilt, at det er svært at styre.

Stabilitet omkring højaksen (kursstabilitet)

Hvis flyet drejes omkring højaksen vil flyets næse pege i en anden retning end den, som flyet bevæger sig. Kuglen vil stå ude til den ene side, og piloten vil føle en sideværts påvirkning. I denne situation vil flyet selv forsøge at komme ind på plads igen, fordi de kræfter, der virker sideværts på flyet, vil forsøge at dreje det på plads igen. Det vil det, fordi flyets halefinne med sideror udgør en stor flade, der vil trække de sideværts kræfter bagud, så lateralcenteret (de sideværtskræfters samlede angrebepunkt) ligger bag ved tyngdepunktet.



I figuren har vi to elementer, som har indvirkning på kursstabiliteten

Lateralcenter bag tyngdepunkt: Flyets bagkrop trækkes ind vha. halefinnen, som trækker lateralcenteret bagud

Let pilform på vingerne:

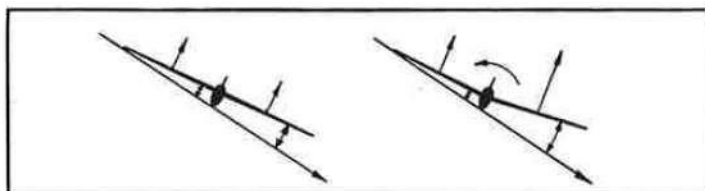
Vingen, der er længst fremme i luftstrømmen, får luftstrømmen direkte ind og får dermed en højere opdrift.

Stabilitet omkring længdeaksen (Tværstabilitet)

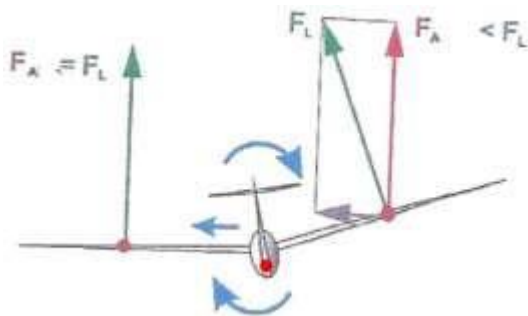
Tværstabiliteten kaldes også for rullestabiliteten, og begreberne dækker over flyets tendens til at vende tilbage til vandret flyvning, efter at den ene vinge har løftet sig. Vingernes V-form er den helt afgørende årsag til, at flyet selv søger tilbage til en vandret flyvestilling, og det skyldes to forhold:

Hvis flyet skrider sidelæns ind mod vandret stilling, får inderste vinge en større sideværts indfaldsvinkel og dermed større opdrift end den modsatte vinge

Den vandrette vinge i V-formen har større reel opdrift end den vinge, der peger op som følge af V-formen.

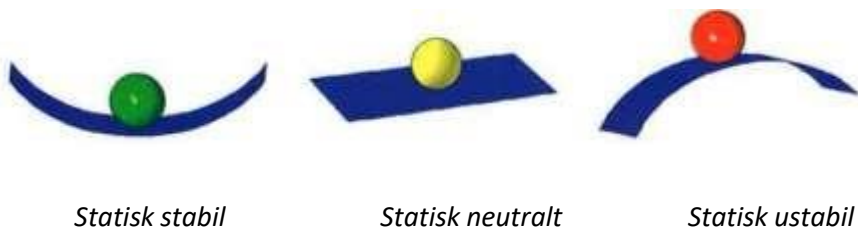


Når flyet skrider sidelæns, vil den vinge, der vender indad, have en større sideværts indfaldsvinkel og dermed skabe en større opdrift end den anden vinge. Dermed tvinges flyet på plads i vandret stilling



Opdriften virker vinkelret opad på vingen. Dermed vil den vinge, der har en skrå stilling som følge af V-formen, reelt få en lavere reel opdrift end den modsatte vinge, der på denne figur er vandret. Dermed vil den vandrette vinge tvinge flyet op i vandret flyvestilling

Statisk stabilitet



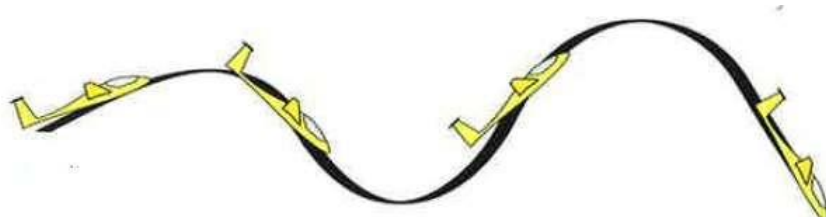
Et legeme er i ligevægt, når det er i ro eller bevæger sig med en konstant hastighed. Af figuren fremgår det, at den grønne kugle vil søge tilbage til bunden af kurven, hvis den bringes i bevægelse. Til gengæld vil den gule kugle også falde til ro efter at være sat i bevægelse, men det bliver et andet sted, end hvor den lå. Den røde kugle ligger på toppen af en bue, og sættes den i bevægelse, vil den accelerere og løbe væk – i princippet uendeligt.

Dynamisk stabilitet



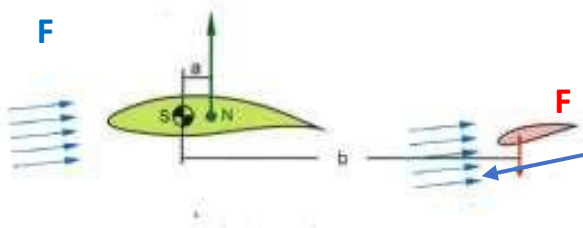
Figuren herover viser et fly, der både er statisk stabilt (forsøger at vende tilbage til udgangspunktet) **OG** dynamisk stabilt, fordi flyets udsving reduceres for helt at forsvinde. Hvis udsvingene for at søge tilbage fortsætter med samme udsving, kaldes flyet dynamisk neutralt

Figuren herunder er et eksempel på, at flyet er statisk stabilt, men dynamisk ustabil. Flyet søger at vende tilbage til udgangspunktet, men bevægelserne bliver større og større.



Ved ændringer i indfaldsvinklen ændrer størrelsen af luftkræfterne sig, og samtidig flytter det punkt sig, hvor opdriftskræfterne på vingen samles. Dette punkt kaldes for opdriftscentret. Med disse ændringer ændrer drejningsmomentet omkring tyngdepunktet sig også, og dermed får haleplanet en rolle i at holde flyet stabilt.

Når opdriftskræfterne samles bag tyngdepunktet, vil flyet dykke, og dermed skal haleplanet producere en negativ opdrift, så det udligner drejningen omkring vingen, men opdriftscentret skal ligge bag flyets tyngdepunkt for at sikre stabilitet. Opdriftscentret bevæger sig bagud, når indfaldsvinklen bliver mindre og hastigheden højere, og fremad når indfaldsvinklen øges, og hastigheden falder.



$$(F_{\text{vinge}} * a) + (F_{\text{haleplan}} * b) = 0$$

.. og hermed skabes længdestabiliteten

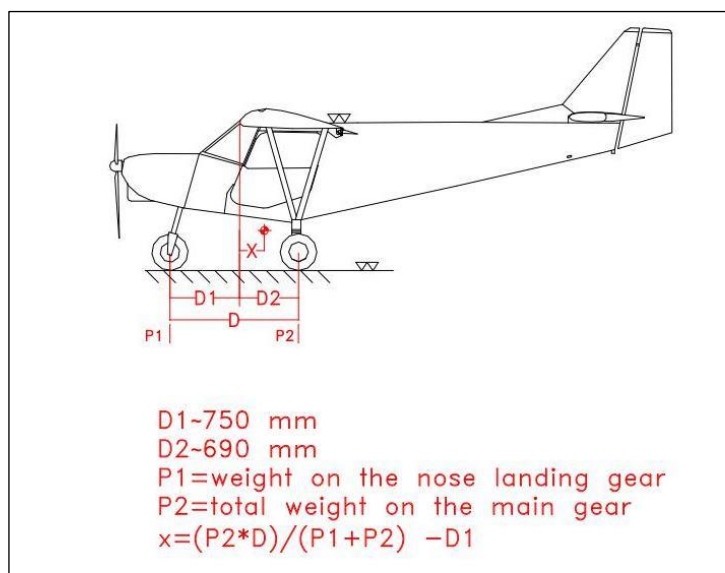
Tyngdepunktsberegning

Tyngdepunktet må flytte sig så meget, som flyets håndbog tillader.

På tegningen til højre er vist beregning af tyngdepunktet på en VTC SAVANNAH.

Flyet skal vejes på et plant underlag og total vindstille, kun påfyldt motorolie (ingen brændstof), kølevæske og med nødvendigt udstyr i cockpittet. Endvidere skal flyet nivel-leres ud som beskrevet i AFM/POH. Referen-cepunktet **D** er et punkt på underlaget, som kan være bestemt som det lodrette punkt un-der forkanten af vingen ud for rodrippen.

D1 og **D2** er mål fra **D** til akslen i næsehjul hhv. linjen mellem de to aksler i hovedhjulene. **P1** er vægten på næsehjulet, og **P2** er den samlede vægt på hovedhjulene.



Tyngdepunktet $x = (P2 * D) / (P1 + P2) - D1$.

Hvis vi forudsætter at vægten på næsehjulet er 76 kg og vægten på hovedhjulene samlet er 250,95 kg, findes x således: $(250,95 * (750 + 690)) / (76 + 250,95) - 750 = 355,27 \text{ mm}$

Af POH fremgår:

Forward C of G limit: 25% +/- 0.9 % MAC

Rear C of G limit: 38.5% +/- 0.9 % MAC

MAC: 1320mm

Tyngdepunktet skal altså ligge mellem 25% +/- og 38,5% +/- af 1320 mm.

25,0% = 330,0mm

38,5% = 508,2mm

Vi kan hermed konstatere, at tomvægtstyngdepunktet, 355,27mm, ligger indenfor det tilladte område.

Så langt, så godt. Nu begynder vi så at læsse flyet med brændstof, pilot og bagage, og det vil jo flytte rundt på tyngdepunktet og det kræver så en beregning for at konstatere, hvorvidt flyet herefter stadig holder sig indenfor begrænsningerne.

Det kræver nogle oplysninger om momentarme, som evt. kan findes i AFM/POH eller man kan måle sig frem til dem med udgangspunkt i referencepunktet. Desuden skal man have vægt på de enkelte dele, og det hele kan sættes ind i en tabel, f.eks. således:

Emne	Vægt/kg	Momentarm/mm	Moment
Fly-tomvægt	327	355	80585
Pilot	75	550	41250
Passager	0	550	0
Fuel	30	495	14850
Bagage	10	1320	13200
TOTAL	442	XXXXXXXXXXXX	149885

Det ses nu, at $x=149885/442 = 339,10\text{mm}$ og altså holder sig inden for de 330mm og 508mm.

Hvad sker der mon, hvis der medtages en passager på 65 kg?

Tyngdepunktet må aldrig kunne rykke så langt bagud, at haleplanet får en større indfaldsvinkel end bæreplanet. Det ville i værste fald betyde, at haleplanet ville stalle under udfladning uden at bæreplanet var stallet. Og på den anden side må tyngdepunktet aldrig ligge så langt fremme, at flyet ikke kan flades ud i landingen. Hertil kommer at flyets maksimale vægt incl. piloten aldrig må overskrides, da det kan medføre strukturelle skader på flyet og i værste fald sammenbrud.

Hvis der monteres yderligere udstyr i flyet, eller der sker en udskiftning, skal der tillige foretages en beregning, der føres ind i en Vægt- og Balance opfølgningsskema som findes i AIC-B 09/12.

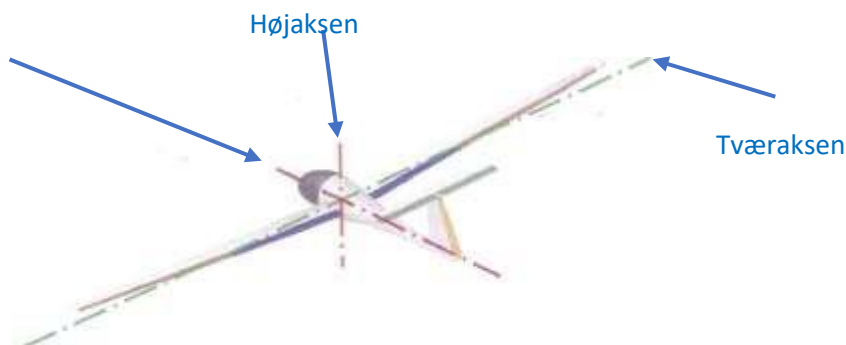
Styring af flyet

Ror og akser

Et fly bevæger sig i det tredimensionale rum og bevæger sig omkring tre akser med de tilhørende ror. De tre akser går alle gennem flyets tyngdepunkt.

Akse	Tilsvarende ror	Bevægelse
Højaksen	Sideror	Drejning
Længdeaksen	Krængeror	Krængning (rulning)
Tværsaksen	Højderor	Ændring af næsestilling (pitch)

Længdeaksen



Rorenes virkning

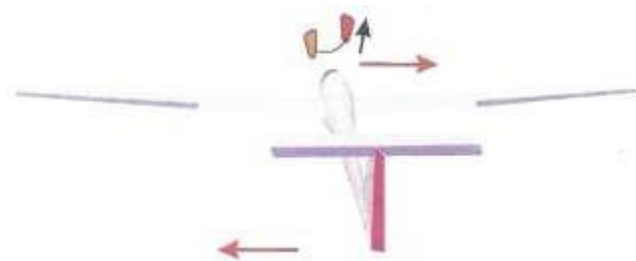
Ethvert rorudslag medfører en profilændring og dermed en ændring af luftstrømmene. Der vil således opstå områder med overtryk og undertryk på samme måde, som når opdriften opstår.

Højderorets virkning



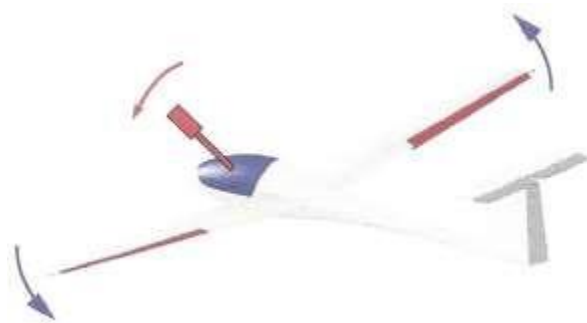
Trækker man i styrepinden, vil højderoret bevæge sig opad og danner et krumt profil. Luftens strømning drejes opad, og der skabes undertryk på undersiden. Dermed trykkes bagkroppen nedad, og flyet drejer sig omkring tværaksen, og flyets næse løftes, indfaldsvinklen øges, og opdriften stiger. Flyet vil stige, så længe det har tilstrækkelige fart.

Siderorets virkning



Hvis der gives højre ben, slår sideroret ud til højre, og trykkraftene i halen trykker halen mod venstre. Flyet drejer omkring højaksen, og næsen drejer mod højre. På denne måde skubbes flyet lidt sidelæns i flyveretningen, men begynder derefter at krænge omkring længeaksen, fordi den vinge, der drejes længst frem, giver mere opdrift end den anden vinge.

Krængerorets virkning



Hvis styrepinden føres til venstre, drejer det højre krængeror nedad, og det venstre drejer opad. På den måde øges opdriften på den højre vinge, og den reduceres tilsvarende på den venstre vinge. Flyet krænger omkring længdeaksen til venstre.

Den – uønskede – sekundære virkning er, at flyet begynder at dreje til højre, fordi det nedadgående krængeror skaber større modstand end det opadgående, der kommer til at ligge i skygge af det krumme profil.

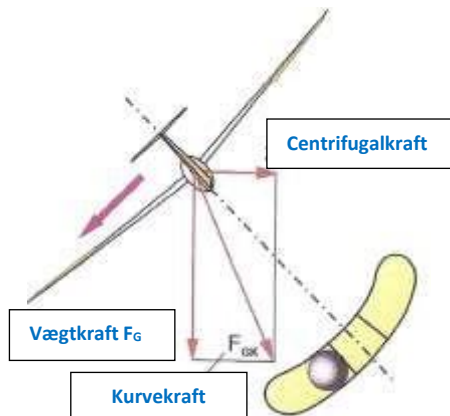
Brugen af flyets ror

Flyets ror skal sjældent bruges alene – der er næsten altid tale om en kombination af rorene. Et koordineret drej udføres ved at give både krængeror og sideror ind i drejet, og når den ønskede krængning er nået, neutraliseres krængeroret, og siderorsudslaget reduceres. Samtidig skal piloten måske trække lidt i styrepinden, fordi flyet stilling i luften har gjort, at højderoret nu får lidt siderorsvirkning, og sideroret lidt højderorsvirkning.

Flyet skal flyves "rent" hvilket vil sige, at det skal flyve lige gennem luftstrømmen – også under et drej, da modstanden så bliver så lille som muligt. Om flyet flyves rent, kan ses på kuglelibellen.

Som huskeregel kan vi bruge:

"Vi skal træde på kuglen"



Flyet i figuren til venstre skrider ind i drejet til venstre, og kuglen hænger ind i drejet.

Hvis piloten giver lidt sideror til venstre, vil kuglen komme ind på plads.

Trim

På rorene kan der være anbragt små trimanordninger, der blot kan være en stationær plade, der hjælper til at holde et rør i en bestemt stilling, så der ikke skal bruges så mange kræfter på at justere for en evt. skævhed.

Det almindeligste er at et trim påvirker højderoret, der ofte kræver en del kraft at påvirke gennem styrepinden/rattet. Da netop dette rør skal kunne holdes i en fast position over længere tid, er det vigtigt, at piloten ikke trættes i armen. Trimmet til højderoret kan ændre udslag via et wiretræk eller en lille elmotor. Begge systemer betjenes af piloten fra førersædet.

Flutter

Teorien bag begrebet "flutter" (egensvingninger) er meget kompliceret og skal ikke gennemgås her, men flutter er meget farlig og skal derfor undgås. Flutter kan opstå både som svingninger op og ned i bærepplanerne, og her er der en tendens til, at de forstærkes, når først de er kommet i gang. Ud over de lodrette bevægelser kan der også komme vridninger i vingerne, og kræfterne kan være så voldsomme, at de river flyet fra hinanden.

Et fly er dog konstrueret således, at flutter ikke kan opstå, hvis hastighederne holdes indenfor flyets tilladte grænser – især max. hastighed – V_{ne} . Der kan dog være forhold som gør, at flutter kan opstå på et tidligere tidspunkt. Her er nogle eksempler:

- Svagheder i strukturen (skjulte skader og dårlige reparationer)
- Slid eller slør i styresystemerne
- Ændringer i rorenes afbalancering efter spartling og lakering
- Flyvning i stor højde

Hvis flyet nærmer sig grænsen for flutter, skal der kun små rorbevægelser eller lidt turbulens til for at sætte det i gang. Omvendt opstår der ikke nødvendigvis flutter, hvis hastigheden overskrides i helt rolig luft. Hvis der opstår flutter, er der kun ét at gøre: **Reducér hastigheden!**

PIO (Pilot Induced Oscillations)

PIO er udtryk for bevægelser omkring flyets tværakse, som opstår som følge af pilotens brug af højderoret. Det kan opstå f.eks. hvis piloten konstaterer, at flyets næse peger for meget nedad, og han herefter korrigerer ved at trække i styrepinden for at normalisere flyets stilling i luften. Hvis han i denne situation har korrigeret for meget og derfor skubber styrepinden frem igen, kan der opstå PIO, hvis piloten kommer i modfase med flyets bevægelser.

Jo mindre rortryk, der er på højderoret, jo sværere har PIO ved at opstå, men hvis de opstår, kan piloten gøre to ting:

- Fastholde roret indtil flyet falder til ro
- Slippe styrepinden og lade flyets egenstabilitet løse svingningerne.

Begrænsninger i vægt og manøvrer

Et fly er underkastet en række grænser for vægte og hastigheder, om operation af flyet skal holdes indenfor. De fleste af disse begrænsninger kan læses i flyets håndbog (FHB), men nogle af begrænsningerne kommer også ud fra, hvad det enkelte fly vejer, og derfor kræver vurdering af sådanne begrænsninger indsigt i flyets aktuelle vægt og evt. andre begrænsninger.

Vægtbegrænsninger

Vi skal i dette afsnit se på en række af de begrænsninger, der ligger i vægten og belastningen af det enkelte fly, og hvorfor disse begrænsninger altid skal overholdes. For alle fly findes der i flyets håndbog en oversigt vægtbegrænsningerne, og her er et eksempel:

	Kg
Maksimum totalvægt MTOM	450
Maksimal last i bagagerummet	15
Tomvægt (ved seneste vejning)	260

Flyets maksimale vægt

Flyets maksimale vægt må ikke overskrides af to årsager:

- Tyngdepunktet kommer til at ligge så langt fremme, at flyet ikke flades ud eller får dårlige kurveegenskaber
- Konstruktionen overbelastes med skader eller brud til følge

Tyngdepunktsberegning før start

Før hver start skal der foretages en beregning af tyngdepunktet. Hvis flyet kun anvendes i få konfigurationer (samme personer/bagage) fra gang til gang, kan piloten hurtigt lave sig en tabel, som viser at tyngdepunktet ligger indenfor begrænsningerne, men de gange hvor flyet lastes udover hvad der er sædvanligt, f.eks. på ferieture o.lign., skal der laves en egentlig tyngdepunktsberegning jfr. ULHB gr. 410.

Maksimum last

Så længe tyngdepunktet ligger indenfor begrænsningerne, og MTOM ikke er overskredet, er der ingen krav til vægtfordelingen af besætning, brændstof og bagage.

Med henvisning til afsnittet om længdestabilitet vil bæreplanerne skulle producere så meget opdrift, at haleplanets kompensation for længdestabilitet bliver sådan, at haleplanet ender med at have en så negativ indfaldsvinkel, at det ikke længere er i stand til at give den ekstra kraft, der skal til for at flade flyet ud under landing. Nogle fly kan forsynes med ballast i halen for at trække tyngdepunktet længere bagud, men sådan at tyngdepunktet fortsat ligger inden for det tilladte område. Denne ballast kan være ballastklodser, som kan lægges ind i et særligt rum.

Mulig brændstofmængde

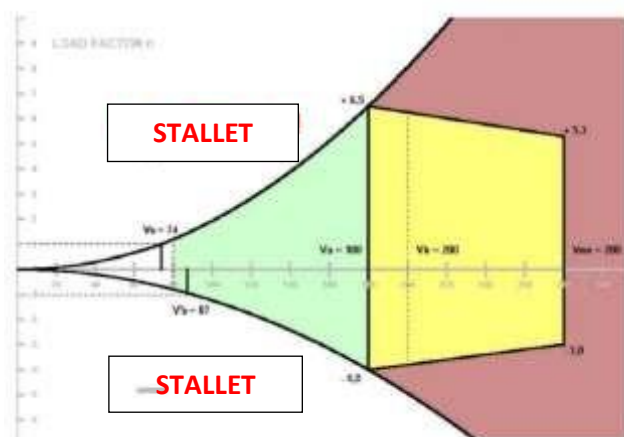
I nogle tilfælde kan det være svært at overholde MTOM når der både skal passager og bagage med på en længere tur, hvor piloten også gerne vil have tanket flyet helt op for at opnå størst mulig rækkevidde. I givet bliver piloten nødt til at fravælge enten bagage, passager eller nøjes med mindre brændstof.

En overskridelse af flyets maksimale vægt giver risiko for overbelastning af strukturen i flyet, og skulle der ske et uheld, og forsikringsselskabet kan påvise, at flyets totalvægt har været overskredet ved starten af flyvningen, er der risiko for, at kaskoforsikringen ikke vil dække.

Hastighedsbegrænsninger og begrænsninger i G-påvirkning

Ethvert fly skal holde sig indenfor nogle angivne hastigheder, og det skal også holde sig indenfor nogle begrænsninger i belastningen – kaldet G-påvirkningen, og hastighed og belastning hænger nøje sammen.

Det kan vises i et belastningsdiagram, kaldet *flight envelope*, som dette, hvor værdierne for et svævefly er indsat, men princippet er ens for såvel svævefly som UL-fly. Dog skal vi være opmærksomme på, at UL-fly ikke kan klare helt så store G-påvirkninger som vist i diagrammet.



xxx

<u>Hvidt område:</u>	STALL
<u>Grønt område:</u>	Normal område
<u>Gult område:</u>	Begrænset område
<u>Rødt område:</u>	Forbudt område

Belastningsdiagrammet sætter G-påvirkningerne i forhold til hastigheden. Området over X-aksen er positive G-påvirkninger, mens området under er negative G-påvirkninger.

Vs – 74 km/t	Stallhastighed ved påvirkning 1 G
V's – 87 km/t	Stallhastighed ved påvirkning -1 G (rygflyvning)
Va – 180 km/t	Maksimale rorudslag forudsat max. belastning + 6,5 G / - 4,0 G
Vb – 200 km/t	Max. hastighed i urolig luft = 15 m/sek vertikal bevægelse – f.eks. i en CB'er.
Vne – 280 km/t	Flyets maksimale hastighed forudsat max. belastning + 5,3 G / -3,0 G.

I **det grønne område** må flyet flyves med fulde rorudslag. I **det gule område** må flyet flyves med 1/3-del rorudslag, og i **det røde område** må flyet ikke befinde sig. I det hvide område kan flyet ikke flyve, idet det er stallet.

Vindbegrænsninger/sidevind

I flyets håndbog er normalt altid angivet en **max. demonstreret sidevind**, som flyets kan flyves i. Det kan f.eks. være 25 km/t svarende til 13 kts sidevind. Det betyder, at fabrikanten under prøveflyvningerne har konstateret, at det er sikkert at lande flyet i en direkte sidevind på 13 kts. Det betyder ikke, at flyet ikke kan landes, hvis sidevinden er stærkere, men i en sådan situation kommer pilotens erfaring og rutine ind som et væsentligt element i håndteringen af landingen.

Flyets sidevindskomponent skal derfor være retningsgivende for, hvornår piloten med en gennemsnitlig erfaring og rutine – herunder en elev - skal stoppe med at flyve. Også her kan det være et element, hvis der sker havari. Vindforholdene i forbindelse med et havari undersøges altid, og det vil også indgå i forsikringsselskabets vurdering af udbetaling af erstatning.

I nogle tilfælde er der også angivet en max. vindkomponent for vind direkte mod flyet. Igen kan der være tale om, at et forsikringsselskab vil foretage en vurdering af, hvorvidt flyet har været ført indenfor de begrænsninger der er angivet i AFM/POH.

Begrænsninger i tilladte manøvrer

Ovenstående belastningsdiagram for et svævefly er udtryk for hvilke belastninger det er tilladt at udsætte flyet for. Mange svævefly må godt lave visse manøvrer indenfor kunstflyvningen, men fabrikanten skal have demonstreret, hvilke manøvrer flyet må lave, og det skal fremgå af flyets håndbog. UL-fly må almindeligvis ikke lave kunstflyvning.

Styrtspiral

En styrtspiral er et drej med meget høj hastighed og stor krængning. Normal vil man trække styrepinden for at reducere farten, men under en styrtspiral vil et træk i styrepinden medføre en mindre kurveradius og en højere G-påvirkning. Udretning fra en styrtspiral skal derfor ske, ved at man først reducerer krængningen vha. krængerorene og først derefter reducere hastigheden med et forsigtigt træk i styrepinden. Der er meget store påvirkninger på flyet under en styrtspiral.

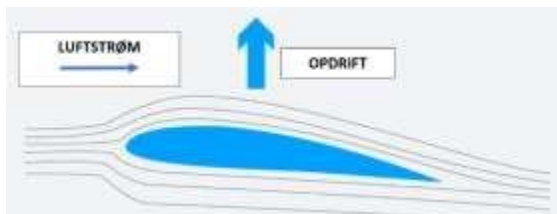
Stall og spind

Sammenhængen mellem indfaldsvinkel og stall

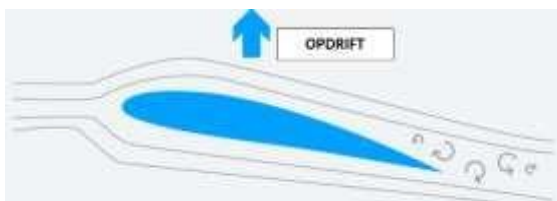
I belastningsdiagrammet for svæveflyet så vi, at stallingshastigheden under ligeudflyvning var 74 km/t, og dermed kunne man få den opfattelse, at stallingshastigheden altid er 74 km/t for det pågældende fly. Men her er forudsætningen, at belastningen på flyet er 1 G. F.eks. under opretning fra et dyk eller under et drej er belastningen mere end 1 G, fordi flyets bæreplaner – udover at bære flyet – skal kunne trække flyet ind i en anden flyvebane. Det kan flyets vinger kun gøre, hvis indfaldsvinklen øges. For når indfaldsvinklen øges, stiger opdriften, og det er opdriften, der skal ændre flyets flyvebane.

Når indfaldsvinklen øges, stiger opdriften, men det samme gør modstanden, og når modstanden bliver for stor, staller vingen, fordi luftstrømmen ikke længere kan følge profilet på vingen, men slår fra og separerer fra vingens overflade. Strømningen går fra at være laminar til at være turbulent. Vi kan derfor konkludere:

Et stall opstår ikke ved samme hastighed, men altid ved samme indfaldsvinkel.

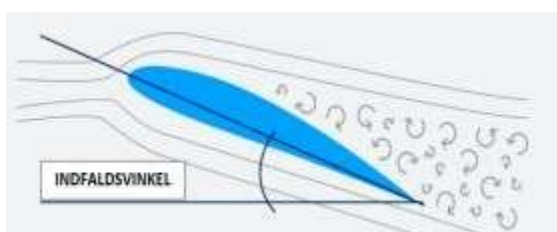


Her ser vi den normale strømning omkring en vinge, hvor luftens hastighed er højere på oversiden af vingen end på undersiden og dermed skaber et undertryk på oversiden og dermed opdrift



Når indfaldsvinklen øges, begynder luftstrømmen på oversiden af vingen at slå fra og bliver turbulent.

Opdriften øges i takt med forøgelsen af indfaldsvinklen, men det samme gør modstanden, som også stiger



Når indfaldsvinklen bliver for stor, slår luftstrømmen helt fra, og vingen staller. Når vingen staller, er der ingen luftstrøm på oversiden af vingen, som kan danne opdrift. Dermed kan vingen ikke bære noget mere. Kun hvis indfaldsvinklen reduceres, kan vingen genoprette evnen til at give opdrift

Vingens stallegenskaber

En vinge siges at have gode stallegenskaber, hvis vingen staller inde fra vingeroden og ud mod vingetippen. Denne egenskab gør, at piloten bevarer styring på krængeror så længe som muligt, og det vil være afgørende, hvis flyet befinder sig på grænsen til et stall.

De gode stallegenskaber opnås ved at vride vingen en smule, så vingen har en mindre indfaldsvinkel ved vingetippen end ved vingeroden. Vridningen kan enten ske som en geometrisk vridning, hvor vingen rent faktisk vrides, eller en aerodynamisk vridning, hvor vingens profil i vingetippen er mere krum end ved vingeroden. Se side 13.

Highspeed stall

For stor G-påvirkning i drej og under opretning fra dyk kan medføre *highspeed stall*. Især G-påvirkningen under drej er interessant, idet mange uøvede piloter under drej fra base til finale ofte laver snævre drej i lav højde for ikke at flyve forbi centerlinjen.

Kombinationen af høj krængning og lav højde er farlig. Den lave højde medfører, at der ikke er ret meget højde til rådighed til en udretning, hvis flyet skulle gå i spind, og derfor er det afgørende at vide, hvor meget hurtigere man skal flyve i et sådant drej.

Om nu piloten er nødt til at dreje med 45 graders krængning eller måske endog helt op til 60 graders krængning, så skal han være bekendt med krængningens betydning for stallingshastigheden i et drej, og vi kigger lige igen på tabellen fra afsnittet om **Aerodynamik – Indfaldsvinklens betydning for opdriften** på side 6:

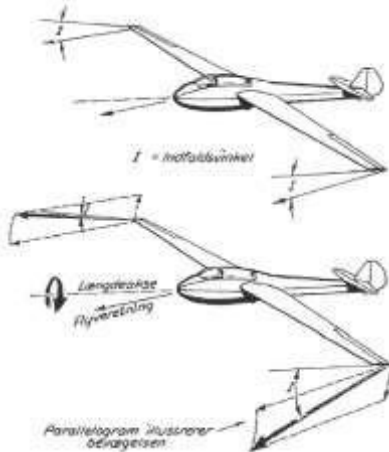
Krængning i grader	0	25	35	45	55	60	70
Ekstra hastighed i %	0	5	10	20	30	40	70
ift. 80 km/t	80	84	88	95	105	114	137

Piloten skal således flyve betydeligt hurtigere i drej med stor krængning for at sikre, at flyet ikke staller.

Asymmetrisk stall og begyndende spind

Når vi taler om stall med eller uden G-påvirkning går vi ud fra, at alt andet er lige. Men alt andet er IKKE lige, og når flyet når stallingsgrænsen, er det ikke lige meget, om vingerne er vandrette eller under drej og dermed ikke-vandrette vinger.

Når stallet opstår, mens vingerne ikke er vandrette, vil den reelle indfaldsvinkel være forskellig på den vinge, der bevæger sig ned ad i forhold til den vinge, der bevæger sig op ad. Denne ubalance forstærkes ved, at den inderste vinge staller før den yderste vinge, fordi den inderste vinge flyver langsommere end den yderste.



Hvis den inderste vinge viser tendenser til at stalle, vil den umiddelbare reaktion fra piloten være at krænge til den modsatte side, men det vil bare forstærke tendensen til at stalle, idet krængerorsudslaget på den inderste vinge i så fald vil bevæge sig ned ad, og dermed vil indfaldsvinklen på den inderste vinge blive endnu større og dermed forstærke stallet.

Proceduren for at komme ud af et sådant begyndende stall er:

- Modsat sideror
- Pinden lidt frem
- Ret ud når flyvefart er opnået og krængerorene igen virker

Nogle ville mene, at det er tilstrækkeligt at følge flyet ind i stall- retningen for på denne måde at få flyvefart på igen. I de fleste situationer ville det også bringe flyet ud af den stallede tilstand, men det vil medføre mere højdetab end standard-proceduren.

Brug derfor standard proceduren, da denne også virker, hvis stallet udvikler sig til et egentligt spind.

Stall advarsel (warning)

De fleste fly giver på en eller anden måde en advarsel når flyet nærmer sig stallhastigheden – enten ved at en lille kontakt på vingens forkant registrerer når indfaldsvinklen bliver kritisk, eller ved at flyet ryster svagt og styregrejerne bliver slatne.

”Power-on” stall

Normalt burde et stall ikke forekomme, når motor og propel snurrer lystigt – og alligevel forekommer de. Ofte sker power-on stall i forbindelse med en overskydning efter afbrudt landing. Der er ret mange forhold der spiller ind, og ofte fordi piloten bliver overbelastet, således der ikke er fuld opmærksomhed på det vigtigste: Flyv flyveren.

På finalen er flyet sat i landingskonfiguration mht. fart, trim, flaps, karburatorforvarme m.v. Når så landingen bliver afbrudt af en eller anden grund og skal gå rundt igen, skal piloten uventet have bragt flyet i take-off konfiguration – luk for karburatorforvarme, giv gas, flaps op, ændre på trim, tale i radio – og så er det lige piloten glemmer at flyve flyet, og der er risiko for at indfaldsvinklen bliver for stor. Der vil også være nogle aerodynamiske påvirkninger, som kan medvirke til at fremprovokere et stall.

Også under stigning og descend samt i drej, kan der opstå der power-on stall. Igen som regel fordi piloten ikke ”flyver flyveren”.

Spind

Hvis det begyndende spind får lov til at udvikle sig til et egentligt spind, vil flyet befinde sig i en tilstand, hvor den inderste vinge vil have en større indfaldsvinkel end den yderste vinge, og dermed vil flyet forblive i en stabil tilstand, som det ikke kommer ud af uden en aktiv indsats fra pilotens side. I så fald er standard proceduren også den, som skal anvendes:

- **Modsat sideror – så rotationen ophører, og den inderste vinge skubbes frem og får opdrift**
- **Pinden lidt frem – så flyet komme ud af den stallede tilstand**
- **Ret ud – når der igen er flyvefart og vingerne kan rettes op med krængeroret**

Under spindet er flyet stallet og ikke påvirket væsentligt af kræfter, men når spindet ophører, får flyet igen meget hurtigt høj hastighed, og derfor skal der udvises forsigtighed, når der rettes ud af det dyk, som opstår efter et spind, der ophører. Hold øje med det gule område på fartmåleren og V_{ne} (den røde streg)

Fladspind

Et spind kan udvikle sig til et faldspind, hvis flyet få lov til at spinde i lang tid, eller hvis tyngdepunktet ligger langt tilbage. Fladspindet adskiller sig fra et traditionel spind ved, at flyets næse er længere oppe, og flyet har dermed ikke den nedadrettede stilling, der skal hjælpe det at få flyvefart på igen, når rotationen er ophørt, og dermed kan flyet være svært eller endog umuligt at få ud af spindet.

Når flyet roterer omkring højaksen i et spind, vil momentet i flyets hale via centrifugalkraften forsøge at trække halen ud ad og dermed rette flyets næsestilling op. Denne tendens har især fly, der har ballast i halen i form af ballastklodser.

Skulle denne situation opstå, skal man prøve at få flyttet tyngdepunktet fremad f.eks. ved at løfte tung bagage fra bagagehylden og flytte det frem i cockpittet. Moderatoren af dette kompendium har den første og eneste gang han har været i et fladspind, fået det bremsed op ved at rykke sig et par centimeter frem i sædet for at åbne canopiet med henblik på at redde sig ud i faldskærm. Det blev så ikke nødvendigt.

Ground effekt

Definition

Ground effekt kaldes den positive indflydelse på opdriften på vingernes overflader, når et fly er tæt på jorden. Denne effekt er en konsekvens af forstyrrelsen af luftstrømmen under sådanne overflader, der kan tilskrives jordens nærhed. Det gælder både faste og roterende vingefly.

Aerodynamisk teori - fast vinge

Forøgelsen af vingernes opdrift skabt af Ground Effect kommer primært fra en reduktion i mængden af genereret induceret modstand, hvilket forbedrer lift /modstand forholdet. Under de fleste omstændigheder suppleres denne øgede opdrift med en direkte stigning i opdriften genereret af vingen.

Reduktionen i induceret modstand - såkaldt fordi det er en funktion af opdriften genereret af vingen - sker ved vingspidsen. Når den genereres i nærheden af jorden, ændres formen af randhvirvlerne, som altid genereres, når en vinge bevæger sig gennem luften, fordi trykket under en vinge altid er højere end

det over den. I stedet for at være cirkulære bliver hvirvler i nærheden af jorden elliptiske, når luftstrømmen skubbes udad. Dette får det effektive sideforhold for vingen til at blive større end det geometriske billedformat og reducerer induceret modstand. Både løft (og lufthastighed for en given motoreffektindstilling) øges.

Den direkte effekt på opdriften opstår, som følge af en reduktion i tip omstrømningen, da luften under en vinge nær jorden komprimeres og skaber en pudeeffekt. Virkningen er proportional med vingekorden, men i hvilket omfang den forekommer, afhænger af profilen på vingens underside. Hvis denne er markant konveks, og indfaldsvinklen er lille, så bliver effekten på opdriften til sidst negativ.

Den samlede effekt af et forbedret forhold mellem opdrifts og modstand når en vinge er nede i ground effekt er, at en given mængde løft vil blive produceret i en lavere angrebsvinkel, end det ville være nødvendigt i fri luft.

Effekten

Ground effekten har betydning både ved start og landing. Under starten vil den forøgede opdrift fra ground effekten medvirke til at flyet letter, måske inden der er egentlig flyvefart. Hvis ikke piloten er opmærksom på dette og flyet ikke har tilstrækkelig motorkraft, risikerer han at rotere flyet for tidligt, med det resultat at det synker igennem med risiko for havari til følge. Derfor skal man holde sig nede i ground effekten indtil den tilstrækkelige flyvefart er indikeret på fartmåleren.

Også under landing har ground effekten betydning, idet flyet kan have tendens til at "flyde" langs ad banen. Under landing på en relativ lille flyveplads med lidt for høj landingshastighed, risikerer man ligeledes et havari, fordi det ikke lykkes at standse flyet inden pladsens begrænsning.

Isdannelse

Under visse meteorologiske forhold kan der danne sig is på flyets overflader. Det er ofte forårsaget af underafkølet regn eller skydråber, der fryser til is når det rammer flyets overflade. Det vil fortrinsvis sætte sig på forkanter af vinger, haleplan og stræbere m.v. Det kan få fatale konsekvenser, idet flyet kan få helt andre flyveegenskaber, og ikke reagerer som forventet i f.eks. stall og under drej, ligesom tyngdepunktet kan forrykke sig. Is vil også have en tendens til lettere at dannes på en uren vingeforkant, end på en renvasket, ligesom det under uheldige omstændigheder vil kunne blokere for de bevægelige rorflader.

Også på propellen kan der dannes is, hvilket naturligvis nedsætter propellens virkningsgrad. På større fly bruges det ofte at indbygge varmetråde i propellens forkanter, for på den måde at undgå isdannelse på propellen.

Hvis et UL-fly bliver udsat for det, gælder det om at søge væk fra området, og hvis man flyver i større højder, skal man søge ned i lavere højde, hvor temperaturen må formodes at være højere. Lykkes det ikke at få smeltet isen ad denne vej, kan en nødlanding vise sig at være den eneste mulighed for at slippe godt fra det.

SLUT