

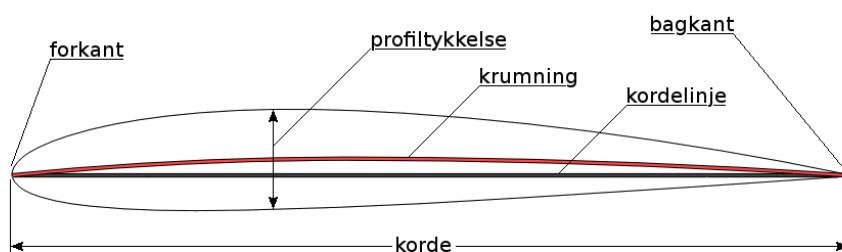
Opdrift og modstand på et vingeprofil

Thor Paulli Andersen

Ingeniørhøjskolen Aarhus Universitet

1 Vingens anatomi

Et vingeprofil er karakteriseret ved følgende bestanddele: forkant, bagkant, korde, krumning og tykkelse. Korden er den linje der går mellem profilets forkant og bagkant. Korden anvendes som referencelinje i flere sammenhænge. Vingeprofiler, der ikke er symmetriske omkring korden, vil have en krumning. Denne krumning illustreres af krumningslinjen, som viser midten af vingeprofilet. For symmetriske vingeprofiler vil krumningslinjen og kordelinjen være sammenfaldende.



Figur 1: Vingeprofilets bestanddele, her vist på et NACA 2412 profil.

2 Hvad giver opdrift?

2.1 Bernoullis ligning

For at forstå hvordan et vingeprofil kan give opdrift, er det nødvendigt at kende til Bernoullis ligning. Bernoullis ligning beskriver friktionsfri strømning, hvor der hverken tilføres eller fjernes energi. Bernoullis ligning indeholder 3 energiformer: statisk tryk, dynamisk tryk og højdetryk. Da der, som nævnt

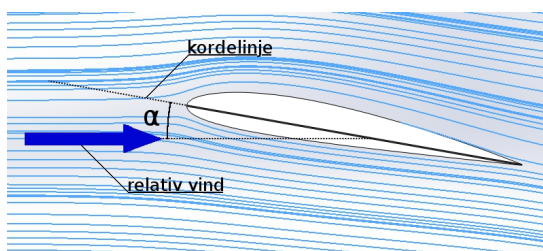
ovenfor, hverken tilføres eller fjernes energi, må summen af de 3 tryk være konstant. Man siger at det totale tryk er konstant. Ved beregning på strømning omkring et vingeprofil vil bidraget fra højde trykket være tilpas lille til, at det kan udelades. Det er derfor kun det statiske og det dynamiske tryk der er relevant i denne sammenhæng. Bernoullis ligning til vores behov kommer derfor til at se således ud:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + p = \textit{konstant} \quad (1)$$

Her er det første led det dynamiske tryk ρ er luftens densitet [kg/m^3] og v er luftens hastighed [m/s]. Andet led er luftens statiske tryk [Pa]. Bemærk, at det dynamiske tryk stiger med hastigheden i anden potens.

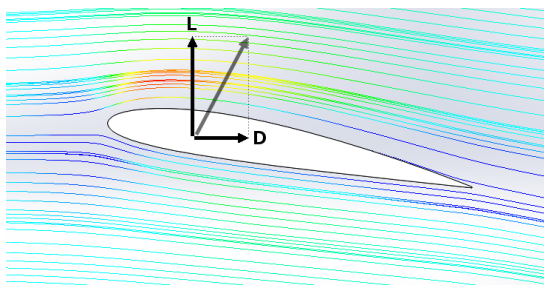
2.2 Indfaldsvinklen

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.



Figur 2: Indfaldsvinklen illustreret.

2.3 Strømning omkring et vingeprofil



Figur 3: Hastighedsfordeling ved strømning omkring et vingeprofil. Den resulterende aerodynamiske kraft består af opdrift (L) og modstand (D).

Når et vingeprofil bevæger sig gennem luften, vil profilet dele luftstrømmen. Profilets form vil 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. Ifølge Bernoullis ligning vil denne hastighedsforskel medføre en trykforskel på vingens over- og underside. Denne trykforskel vil give en kraft, der virker i retning af den side af vingen, hvor trykket er lavest. Den samlede kraft, der påvirker vingeprofilet 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) (se figur 3).

Både vingeprofilets krumning og vingens indfaldsvinkel har indflydelse på, hvor meget opdrift vingen giver. Opdriften fra krumningen er uafhængig af indfaldsvinklen.

3 Opdrifts- og modstandsformlen

3.1 Opdrift

Opdriften (også kaldet lift) afhænger, som beskrevet ovenfor, 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:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot C_L \quad (2)$$

Her er L opdriftskraften (lift) i Newton, ρ er luftens densitet [kg/m^3], v er vindhastigheden [m/s], A er vingens planforme vingereale [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 vingeprofilets 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° indfaldsvinkel¹. Dette fænomen kaldes *stall* og skyldes, at luftstrømmen ikke længere kan følge profilets krumning på oversiden og løsriveres. Den indfaldsvinkel, hvor stall indtræder, er meget afhængig af vingeprofilet. Bemærk desuden, at liftkurven er tilnærmelsesvis lineær op til stallet.

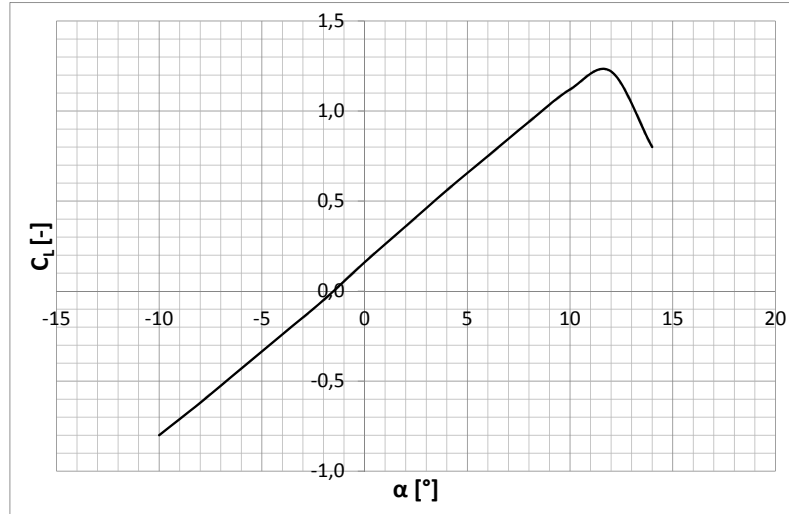
Prøv selv at justere indfaldsvinkel og krumning på et vingeprofil og se konsekvenserne på liftkurven med programmet *FoilSim* fra NASA².

3.2 Modstand

Ligesom lift, kan en vinges luftmodstand, eller drag, beskrives med en enhedsløs faktor kaldet *dragkoefficienten*. Denne faktor afhænger, ligesom liftkoefficienten, af profilets form og indfaldsvinklen. I praksis er man interesseret i sam-

¹Denne vinkel er afhængig af Reynolds tal (se afsnit 4) og varierer typisk mellem 12° og 16°

²Hent programmet her: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/foil3.html>



Figur 4: Liftkurve. Her vist for NACA 23012 profil.

menhængen mellem lift og drag, så man ved hvor meget luftmodstand man skal betale for en given opdrift. Dragkoefficienten er derfor beskrevet som funktion af liftkoefficienten ved følgende formel:

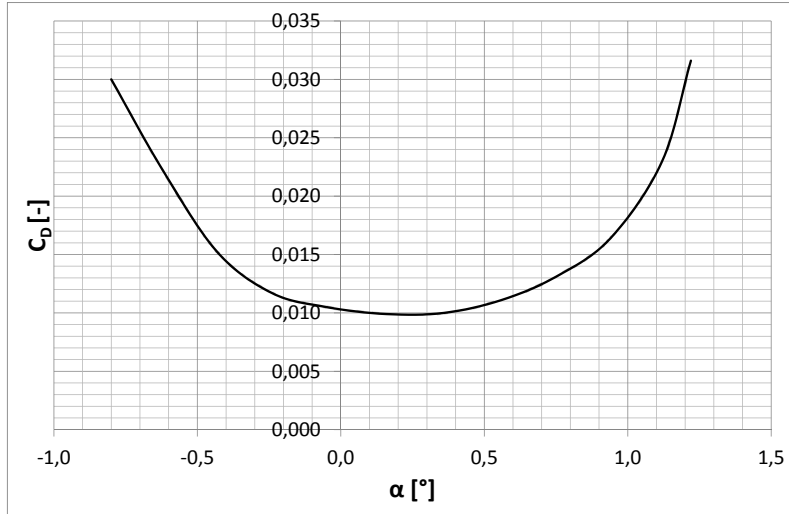
$$C_D = C_{D0} + k \cdot C_L^2 \quad (3)$$

Her er første led selve profilets formmodstand. Dette kaldes for *profilmodstand*. Andet led indeholder faktoren k , som varierer fra profil til profil. Dette andet led kaldes for den *liftinducerede modstand* eller blot den *inducerede modstand*. Bemærk, at dragkoefficienten stiger med liftkoefficienten i anden potens. For at anskueliggøre sammenhængen mellem lift og drag, anvendes dragkurven (se figur 5).

Bemærk, at dragkurvens minimum ikke skærer y-aksen. Dette er på grund af profilets krumning. For et symmetrisk vingeprofil ville dragkurvens minimum skære y-aksen. For at finde den egentlige luftmodstandskraft, anvendes en formel der ligner liftformlen, nemlig, dragformlen:

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot C_D \quad (4)$$

Her er D luftmodstandskraften (drag) i Newton. Bemærk: både lift og drag stiger med vindhastigheden i anden potens.



Figur 5: Dragkurve som funktion af liftkoefficienten. Her vist for et NACA 23012 profil.

4 Reynolds tal

Reynolds tal er et tal, der beskriver forholdet mellem inertikræfterne og de viskose kræfter i en gasart eller en væske. Høje værdier for Reynolds tal indikerer en turbulent strømning mens lave værdier (< 10.000) angiver en pæn, laminar strømning. Reynolds tal kan beregnes ved følgende formel:

$$Re = \frac{v \cdot L \cdot \rho}{\mu} \quad (5)$$

Her er v vindhastigheden [m/s], L er en længde [m] kaldet den karakteristiske længde og μ (kaldet "my") er en egenskab for luften kaldet den dynamiske viskositet. Den karakteristiske længde for en vinge er kordelængden. Den dynamiske viskositet for tør luft har værdien $\mu = 1.81 \cdot 10^{-5}$ ved $15^\circ C$ og har enheden [$Pa \cdot s$].

Både værdierne for liftkoefficienten og dragkoefficienten varierer ved forskellige Reynolds tal. Lift- og dragkurven for et vingeprofil vil derfor se forskellige ud for forskellige Reynolds tal. Det er derfor vigtigt at man sammenligner data med samme Reynolds tal. Det kan imidlertid være vanskeligt at opnå høje Reynolds tal i vindtunneler og det kan derfor være nødvendigt at sammenligne data med forskellige Reynolds tal.