

Vindmøller i Danmark

Elev: Loke Hansen

Vejledere: Bodil Honoré Eriksen & Christoffer Fagerlund Mortensen

Fag: Fysik B, STX & Historie A, STX



Poul la Cour i 1864

Copyright © 2023 [Poul la cour Museet](#).

All Rights Reserved. | Chique by [Catch Themes](#)

Resume:

Dette projekt undersøger blandt andet, hvordan vindenergiteknologi har udviklet sig fra små landlige vindmøller til store vindturbiner og er blevet en vigtig kilde til bæredygtig energi. I projektet kigges på, hvad der motiverede folk til at opfinde og videreudvikle vindteknologien. Herunder belyses Poul La Cour og Mogens Amdi Pedersens roller i forhold til vindmølleindustrien.

Herudover kigger projektet på principperne i en vindmølle og herunder, hvilke kræfter en vindmølle bliver påvirket af. Ved beregninger med Bernoullis ligning kigges der på, hvordan der skabes opdrift på en vinge.

Projektet kan ud fra et eksperiment konkludere, at vingeprofilets angrebsvinkel har en direkte korrelation til mængden af lift, der produceres, og vingeprofilens form bestemmer, ved hvilke vinkler der genereres lift. Derudover spiller vindturbिनprofilernes effektivitet en stor rolle i dimensionerne af vindturbिनblade, som bestemmes af Betz's lov.

Vindenergi har mange fordele, såsom renlighed, bæredygtighed, økonomiske fordele og jobmuligheder. Men der er også ulemper, herunder afhængighed af vindforhold, påvirkning af landskaber og dyreliv samt støj og vibrationer. Vindturbineindustrien arbejder på at blive mere konkurrencedygtig og bæredygtig, men den øgede størrelse af vindturbiner skaber nye udfordringer. Næste skridt for industrien er at opfinde en helt bæredygtig vindturbine, hvor materialet til produktion kan genanvendes.

Indledning

Vindmølleproduktionen i Danmark har en spændende historie, der går helt tilbage til slutningen af det 19. århundrede. Det var i 1891, at Poul la Cour byggede sin første vindmølle til at generere elektricitet, og siden da er teknologien bag vindmøller blevet mere avanceret og effektiv.

Motiverne bag vindmølleproduktion har også ændret sig over tid. I starten blev vindmøller primært brugt til at generere elektricitet i isolerede områder eller som en backup til den eksisterende elforsyning. I dag er vindmøller en vigtig vedvarende energikilde og bidrager til at mindske afhængigheden af fossile brændstoffer.

For at forstå, hvordan en vindmølle fungerer, er det nødvendigt at have en grundlæggende viden om principperne bag aerodynamik, Bernoullis princip og Betz lov. Disse principper spiller en vigtig rolle i, hvordan en vindmølle fungerer, og hvordan den kan omdanne vindenergi til elektrisk energi.

I dette projekt undersøges historien af vindmølleproduktion fra 1891 til 1978 og de motiver, der lå bag udviklingen af vindmøller i denne periode. Indvidere bliver det også belyst, hvordan en vindmølle virker ved hjælp af principperne bag aerodynamik, Bernoullis princip og Betz lov. Herudover gennemføres et forsøg i en vindtunnel, hvor det undersøges, hvordan opdriften afhænger af vingens vinkel i forhold til vindretningen.

Udviklingen af vindmøller i Danmark

Udviklingen af vindmøller har en interessant historie, der spænder over mere end 100 år. I Danmark startede det i 1891, da Poul la Cour designede og byggede Danmarks første vindmølle til at producere elektricitet. Denne tidlige vindmølle var en horisontalakse mølle med fire vinger, der drev en elektrisk generator.

Herefter fortsatte La Cour med at eksperimentere med vindenergi og opførte en række vindmøller i forskellige størrelser og design. Han var en af de første til at indse potentialet i vindenergi og arbejdede hårdt på at forbedre teknologien for at gøre den mere effektiv.

(<https://www.poullacour.dk/vindkraftens-oplagring/>)

I tiden efter blev vindmøller brugt på private ejendomme primært bondegårde. Dette blev ændret i starten af 1900-tallet, hvor vindmøllen også kom til byen. Her blev møllerne blandt andet brugt i elektricitetsværker. Vindmøller havde mange forskellige designs. Der var de ordinære møller med 4 møllevinger, og derudover den hollandske mølle som havde en roterende cirkulær akse, som havde 30-50 små mini vinger.

(<https://www.folkecenter.eu/PDF/Wind-history/Vindkraftens-Historie-I-Danmark-kap.5.pdf> side 7)

Vindmøller i Danmark har altid udgjort en lille del af energiproduktionen, men i 1915 og 1944 øgedes vindmølleproduktionen drastisk. Manglen på energi i disse to årstal

sætter produktionen af vindmøller i gang igen. Dette skyldtes primært energikriser i forbindelse med første og anden verdenskrig.

Vindmøllens design blev i 1944 ændret til en tre-vinget FLS-Aeromoter, som producerede omkring 110.000 kWh. I løbet af dens levetid. Denne type vindmølle blev en vigtig del af energiforsyningen.

(<https://www.folkecenter.eu/PDF/Wind-history/Vindkraftens-Historie-I-Danmark-kap.5.pdf> side 7-8)

I de følgende årtier blev vindmøller brugt i mindre omfang til at producere elektricitet i landdistrikter og i nogle industrier. Det var dog først i 1970'erne, at vindmøller blev en populær kilde til bæredygtig og/eller alternativ energi, og teknologien begyndte at tage fart.

I løbet af denne tid spillede Mogens Amdi Pedersen og Tvind-skolen en vigtig rolle i at udvikle og fremme teknologien. Tvind-skolen var en alternativ skole, der havde en stærk interesse i bæredygtig udvikling og miljøbeskyttelse.

I 1978 opførte Tvind-skolen en stor vindmølle med en vertikal akse og tre vinger, som blev kendt som Tvind-møllen. Møllen var i stand til at producere mere end 2 MW elektricitet, hvilket gjorde den til en af de største vindmøller på det tidspunkt. Tvind-møllen var en milepæl inden for vindenergi og et bevis på, at teknologien kunne være både effektiv og pålidelig.

Mogens Amdi Pedersen og Tvind-skolen fortsatte med at udvikle teknologien og opførte flere vindmøller i forskellige størrelser og design. Deres indsats har bidraget til den fortsatte vækst i vindenergi-sektoren og har hjulpet med at reducere afhængigheden af fossile brændstoffer.

I løbet af 1970'erne og 1980'erne blev der opført en række store vindkraftværker i Danmark. Disse vindkraftværker var imidlertid stadig relativt dyre og ineffektive sammenlignet med traditionelle kraftværker, og deres anvendelse var derfor begrænset. Det var først i de senere år, at vindenergi er blevet en mere konkurrencedygtig og almindelig energikilde. Det skyldes i høj grad teknologiske fremskridt, herunder større og mere effektive vindmøller og bedre lagringsmuligheder for energi samt en øget global efterspørgsel efter ren og bæredygtig energi.

(https://www.youtube.com/watch?v=5SP4bSgg7xo&t=213s&ab_channel=Tvindkraft)

(<http://xn--drmstrre-64ad.dk/lessons/tvindmoellen/>)

Motiver til vindmølleproduktion

Igennem vindmøllens historie har der været mange forskellige motiver til at udvikle og videreudvikle vindmøller. I 1891 lavede Poul la cour Danmarks første vindmølle der kunne producere strøm, med henblik på at finde flere bæredygtige alternativer til fossile brændstoffer. Han var pioner inden for denne tankegang. Hans motivation var en social vision om at bringe elektricitet til landbefolkningen, for at skabe økonomisk vækst og forbedre levevilkårene i landdistrikterne. Han arbejdede på at finde en løsning på problemet med opbevaring af elektriciteten fra de stormfulde dage til brug på de vindstille dage. Han arbejdede endvidere på at gøre vindkraften mere økonomisk rentabel og dermed mere tilgængelig for den almene befolkning. Han eksperimenterede med at bruge vindkraften til autogensvejsning og andre produkter men konkluderede til sidst, at den mest realistiske løsning var et mindre akkumulatorbatteri, der kunne lagre et døgns forbrug af elektricitet.

(<https://www.poullacour.dk/den-sociale-vision-2/>)

Stigningen i oliepriserne i 1973 havde en betydelig indvirkning på udviklingen af vindenergi i Danmark. Oliepriserne steg dramatisk i 1973 som følge af en oliekrise forårsaget af en arabisk olieembargo mod lande, der støttede Israel i Yom Kippur-krigen.

Denne oliekrise fik mange lande, herunder Danmark og USA, til at indse at de var alt for afhængige af fossile brændstoffer i forhold til deres energibehov. De begyndte derfor at undersøge alternative energikilder, der kunne erstatte olie og gas.

Vindenergi var en af de alternative energikilder, som blev betragtet som lovende, da den var ren, vedvarende og tilgængelig på mange steder.

(<https://danmarkshistorien.dk/vis/materiale/oliekriserne-og-deres-betydning-for-dansk-oekonomi-1973-1991>)

Der er flere aviser fra slutningen af 1973 (Bilag 1-4) som viser den afhængighed, som Danmark havde af olie fra Mellemøsten. Der var meget omtale i aviserne om de nye restriktioner som danskerne nu skulle leve med. I november 1973 bekendtgjorde

Handelsministeriet en liste af begrænsninger af elektricitetsforbruget i Danmark (Bilag 5).

Behovet for vedvarende/alternative energikilder, havde tiltrukket mange lande, inklusiv Danmark, og resulterede i vidreudviklingen af vindenergi, så danskerne ikke skulle være afhængig af olie fra Mellemøsten.

Efter olieprisstigningen i 1973 blev der igangsat en række offentlige investeringer i vedvarende energi i USA og andre lande. Disse investeringer blev støttet af en række politiske tiltag, herunder skatteincitamenter og reguleringsmæssige krav til andelen af vedvarende energi i forhold til de samlede energikilder. Desuden var der de klimamæssige problemstillinger som folk stod overfor i 1970'erne. Selvom der ikke var bemærkelsesværdige forandringer i klimaet dengang, var der stadig aktivister der havde hypoteser om miljømæssige forandringer som anvendelsen af fossile brændstoffer kunne føre til. Her kan bogen "The Limits of Growth" eksempelvis nævnes, der blev udgivet i 1972. Den var en af de første bøger, der advarede om de miljømæssige udfordringer, som menneskeheden ville stå overfor i fremtiden. Bogen brugte matematiske modeller til at forudsige, hvordan jordens ressourcer ville blive udnyttet i de efterkommende år, og hvordan dette ville påvirke både økonomien og miljøet.

Selvom bogen ikke direkte forudså klimaforandringerne, indeholdt den alligevel en række prognoser, der var relevante for at forstå den miljømæssige situation fremadrettet. For eksempel forudså bogen en stigning i CO₂-niveauet i atmosfæren, hvilket ville føre til en opvarmning af jorden og klimaændringer. Bogen forudsagde også en stigning i forurening og et fald i biodiversiteten på grund af den øgede menneskelige aktivitet.

Bogen argumenterede for en mere bæredygtig tilgang til økonomisk udvikling, hvor økonomisk vækst blev balanceret med hensyn til miljømæssig bæredygtighed og ressourcebevarelse. Den anbefalede også decentralisering og mindre afhængighed af fossile brændstoffer.

(Bogen "The limits of Growth" udgivet af The Club of Rome i 1972)

Det var bøger og litteratur som ovenstående, der satte en bæredygtig tankegang i gang hos mange aktivister. En af de aktivister som var fascineret af bæredygtighed var Mogens Amdi Pedersen.

Mogens Amdi Pedersen og Tvind-bevægelsen ønskede at vise, at det var muligt at producere energi på en måde, der var både økonomisk og miljømæssigt bæredygtig. Derudover var der også et ønske om at skabe arbejdspladser ved blandt andet at uddanne unge mennesker til at arbejde med teknologi og bæredygtighed.

En del af bevægelsens mål var at skabe en mere bæredygtig og selvforsynende livsstil, og produktionen af vindmøller var en del af denne vision. Tvind-møllen blev endvidere set som en løsning på den globale energikrise i 1970'erne, der jo førte til stigende priser på olie og gas.

Tvind-møllen blev set som et symbol på den alternative livsstil og det samfund, som bevægelsen ønskede at skabe. Møllen var en del af et større projekt, hvor Tvind-bevægelsen blandt andet oprettede et økologisk landbrug og et uddannelsescenter, hvor unge kunne lære om bæredygtighed og teknologi.

Principperne i en vindmølle

De fysiske principper i en vindmølle er baseret på bevarelse af energi og bevægelsesmængde.

Når vinden rammer vindmøllens vinger, overføres en del af vindens kinetiske energi til vingerne, som får vingerne til at rotere omkring rotorakslen. Dette skyldes Bernoullis princip, som siger, at trykket på nedstrømsiden af vingen er lavere end trykket på opstrømsiden, når vingen bevæger sig gennem luften. Dette skaber et løft, der opretholder vingernes rotation.

Når vingerne roterer, produceres der mekanisk energi, som overføres gennem rotorakslen til en generator. Generatoren omdanner den mekaniske energi til elektrisk energi ved hjælp af elektromagnetisk induktion. Elektrisk energi sendes derefter gennem kabler til et elnetværk, hvor den kan bruges til at forsyne husholdninger og industrier med elektricitet.

Effektiviteten af en vindmølle afhænger af flere faktorer, herunder vindhastigheden, vingernes størrelse og form samt tårnets højde. Jo længere vingerne er, jo mere vind kan vingerne fange, og jo højere tårnet er, jo højere er vindhastigheden. Derudover

kan vindmøllen også rotere vinklen på vingerne for at ændre angrebsvinklen på vingen og dermed øge effektiviteten under forskellige vindforhold.

I det store hele fungerer en vindmølle ved at udnytte vindens kinetiske energi og omdanne den til elektrisk energi gennem en kombination af aerodynamik, mekanisk og elektromagnetisk teknologi.

<https://faktalink.dk/titelliste/vindenergi-faktalink-light/vindmoller>

Hvilke kræfter påvirkes møllevingen af?

Når luften strømmer forbi en møllevinge, påvirkes vingen af flere forskellige kræfter. Den mest kendte af disse kræfter er aerodynamisk løft, som er den kraft, der giver vindmøllen sin evne til at rotere og dermed producere energi. Aerodynamisk løft opstår på grund af forskellen i tryk på oversiden (nedstrømningssiden) og undersiden (opstrømningssiden) af vingen. Når luften bevæger sig over vingen, accelererer den og skaber et lavere lufttryk på oversiden af vingen og et højere tryk på undersiden af vingen. Dette resulterer i en opadgående kraft på vingen, som kaldes aerodynamisk lift.

En anden kraft, der påvirker vingen, er vægt. Møllevingen er normalt lavet af et materiale som kulfiber og eller gladsfiber, som bindes sammen med polyester eller epoxy og er derfor relativt tung. Vægten påvirker vingen ved at trække den nedad på grund af tyngdekraften.

En tredje kraft, der påvirker vingen, er centrifugalkraften. Når vingen roterer, skaber den en centrifugalkraft, som er rettet væk fra midten af rotationen. Denne kraft vil normalt trække vingen udad og væk fra midten af rotationen, medmindre den modvirkes af andre kræfter, som for eksempel det aerodynamiske lift.

Vingen påvirkes også af modstandskraften som kaldes aerodynamisk drag, som er en kraft, der opstår på grund af luftmodstanden, når møllevingen bevæger sig gennem luften. Modstandskraften er proportionel med vingens form, overfladeruhed og dens hastighed. Jo mindre aerodynamisk vingen er, jo større er modstandskraften. Jo mere ru vingens overflade er, jo større er modstandskraften. Disse kræfter skalerer proportionalt med vingens hastighed. Modstandskraften

modarbejder vingens rotation og sænker dens hastighed, hvilket reducerer effektiviteten af vingen. Derfor er det vigtigt at reducere modstandskraften for at øge effektiviteten af en vindmølle.

Et vingeprofil, der er designet til at skabe optimal aerodynamisk lift, kan for eksempel være tungere, og derfor kræve mere energi til at rotere, hvilket kan påvirke effektiviteten af vindmøllen som helhed.

Endelig kan der også opstå turbulente kræfter på vingen, som skyldes forstyrrelser i luftstrømmen, for eksempel hvis vingen er udsat for vinden i en vinkel, der ikke er optimal for aerodynamisk lift.

De ovenover beskrevne kræfter påvirker alle møllevingen, og er de vigtigste faktorer at forstå i designet af en effektiv vindmølle.

Basic Rotor Aerodynamics applied to wind turbines, af Martin O.L.Hansen, 1998.(bilag 8 & 11)
Airfoil aerodynamics, af LM Windpower.(billag 6,7)

Hvordan skabes der opdrift på en vinge?

Bernoullis ligning er en fysisk ligning, der beskriver bevarelsen af energi i en strøm af væske eller gas. Ligningen er navngivet efter den schweiziske matematiker og fysiker Daniel Bernoulli, der formulerede den i midten af det 18. århundrede.

Bernoullis ligning viser, at den totale energi i en strøm af væske eller gas forbliver konstant, når strømmen bevæger sig langs en strømlinje. Den totale energi i strømmen er summen af dens kinetiske energi, dens potentielle energi og dens trykenergi.

Matematisk set er Bernoullis ligning:

$$P + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h = \text{konstant}$$

Her er P trykket, ρ er luftens densitet, v er hastigheden, g er tyngdekraften, og h er højden over en referencehøjde. Den konstante værdi i ligningen kaldes Bernoullis konstant.

Bernoullis ligning forklarer, hvordan der skabes opdrift på en vinge. Når en vinge bevæger sig gennem luften, skaber den en strøm af luft, der passerer over og under vingen. På grund af vingens form bøjes vindens strømlinjer nedad bag vingen og resulterer i en højere hastighed hen over vingens overside end på undersiden. Ifølge Bernoullis ligning betyder dette, at trykket på oversiden af vingen er lavere end trykket på undersiden af vingen.

Det lavere tryk på oversiden af vingen skaber en opdrift, der løfter vingen opad.

Dette kan sættes op sådan:

$$P_{\text{overside}} + 0,5 \cdot \rho \cdot V_{\text{overside}}^2 = P_{\text{underside}} + 0,5 \cdot \rho \cdot V_{\text{underside}}^2$$

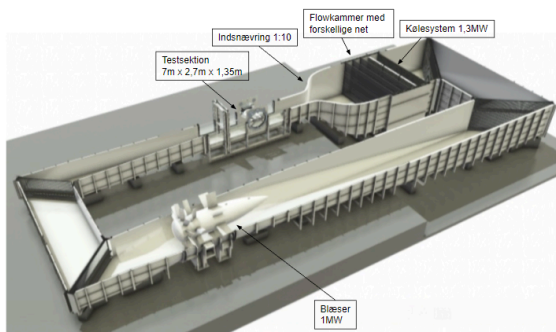
Hvis $V_{\text{overside}} > V_{\text{underside}}$, så må P_{overside} være lavere end $P_{\text{underside}}$. Hvis V_{overside} er større end $V_{\text{underside}}$, så er $P_{\text{underside}}$ større end P_{overside} , det er så dette der skaber lyftkraften

Målinger på en modelvinge i en vindtunnel og undersøgelse af, hvordan opdriften afhænger af vingens vinkel i forhold til vindretningen.

LM Wind Power Vindtunnelen, der blev brugt i forsøget, bruges til at måle på vingeprofiler. Disse vingeprofiler er todimensionelle geometrier, designet ved hjælp af computersimuleringer. For at kunne måle på en todimensionelt profil bliver der derfor ekstruderet i den tredje dimension så de fylder bredden af test-sektionen. Disse vingeprofiler bruges til at designe den tredimensionelle vinge. Vingens endelige form interpoleres ud fra de valgte vingeprofiler, som starter med en cirkel i roden af vingen og ender ud i en aerodynamisk tip.

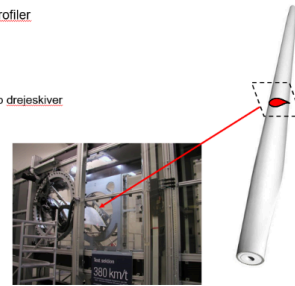
Vindtunnelen fungerer ved at luft bliver flyttet af blæseren som kan levere 1 MW effekt. Luften føres ned forbi de to første hjørner og gennem kølesystemet. Her bliver vinden kølet i en 1,3 MW køler og sendt videre gennem et flowkammer med forskellige net, der fjerner turbulens og ensretter vindens vinkel. Herefter bliver vinden indsnævret for at øge vindhastigheden og sænke turbulensintensiteten ind i test sektionen. I test sektionen sidder vingeprofilet mellem to drejeskiver, hvor angrebsvinklen styres. På vingeprofilets overflade findes et antal trykhuller, fra forkanten hen over oversiden til bagkanten og tilbage hen over undersiden til forkanten. Disse trykhuller er koblet til et trykmodul hvor trykkene aflæses via hardware og computersoftware.

Vindtunnelen er et lukket system, som kan ses på billedet herunder (bilag 9):

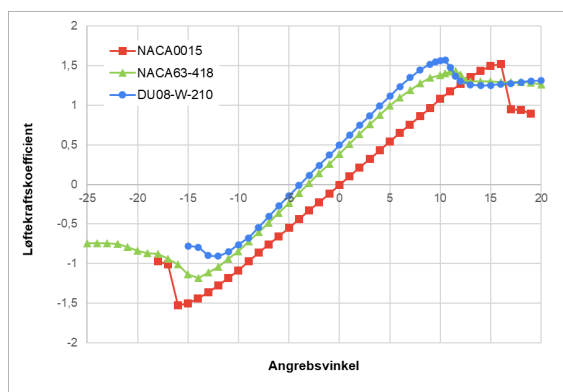


(bilag 9)

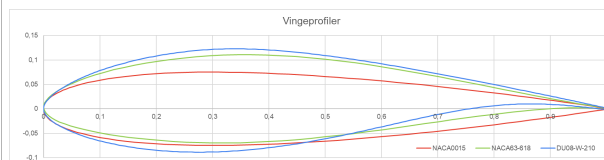
- LM tester 2D vingeprofiler
- Testmodel:
 - Bredde: 1.35 m
 - Korde: 0.90 m
 - Monteres mellem to drejeskiver
- Testsektion:
 - Bredde: 1.35 m
 - Højde: 2.70 m
 - Længde: 7 m
- Tunnel:
 - Bredde: 14 m
 - Længde: 37 m



(bilag 10)



billag 13



billag 14

Der blev målt på 3 forskellige vingeprofiler i vindtunnelen, **NACA0015**, **NACA63-618** og **DU08-W-210**. **NACA0015** er et symmetrisk vingeprofil. NACA profilerne blev designet i 1920'erne og 1930'erne til brug på flyvemaskiner, men blev hyppigt anvendt på de første vindmøllevinger. **DU08-W-210** er et vingeprofil specifikt designet til brug på vindmøllevinger. Det blev designet på Delft Universitet i Holland, hvor mange vingeprofiler til vingemøllevinger er designet og testet i universitetets vindtunnel. Navnet på de moderne vingeprofiler hentyder ofte til det år de blev designet og tykkelsen. For eksempel er DU profilet designet i 2008 og hedder derfor DU08. W hentyder til at det er et vindmølleprofil til vindmøllevinger (**W**ind). 210 hentyder så til tykkelsen, som er 21,0%

På bilag 12 kan man se, hvordan de tre vingeprofilers løftekraftskoefficient påvirkes af angrebsvinklen af vingeprofilen. Løftekraftskoefficienten er dimensionsløs i forhold til vingeprofilets korde(x-aksen).

Det symmetriske vingeprofil har i sagens natur en løftekraftskoefficient på 0 ved 0 grader. Ved negativ vinkler er løftekraftskoefficienten negativ og omvendt for positive vinkler. Dette er fuldstændig analogt med en flad plade, bortset fra at vingeprofilet kan bruges til flyvning. Vingeprofiler designs generelt, så de har en positiv løftekraftskoefficient ved en 0 graders angrebsvinkel. Dette er en fordel, når en flyvemaskine flyver ligeud (0 graders angrebsvinkel), og stadigvæk genererer løft.

Løftekraftskoefficienten bliver ikke ved med at stige med stigende angrebsvinkel. På et tidspunkt når den kritiske angrebsvinkel opnås, vil luften som "suges" fast til oversiden slippe vingeprofilet startende fra bagkanten. Denne vinkel kaldes for stallvinklen og resulterer i et pludseligt fald i løftekraftskoefficienten med en drastisk stigning i modstandskraft til følge.

De tre vingeprofiler udviser også denne adfærd (bilag 14). De tre vingeprofiler har forskellige stallvinkler. Det symmetriske vingeprofil har en stallvinkel på 16 grader, vindmøllevingen har en stallvinkel på 11,5 grader, og flyvingen har en stallvinkel på 10,5 grader. Stallvinklen er direkte korreleret med længden af den nedadgående krumning på oversiden efter den maksimale y værdi på bagkanten. Jo længere krumningen er, jo højere bliver stallvinklen. Faldet i løftkraft ved stall er ikke så vigtig for vindmøllevinger, men er vigtig for flyvinger, da et kraftigt fald i løftkraft kan sende flyet mod jorden.

[DU08-W-210](#) giver højere løftkraft end de andre to profiler ved samme angrebsvinkel. Dette kan skyldes den højere krumning på undersiden ved bagkanten, da afbøjningen af de indkommende strømlinjer er kraftigere på grund af denne forskel i geometrien i forhold til de to andre profiler.

Vindens effekt som funktion af vindmøllens dimensioner og vindhastigheden

Møllevingernes dimensioner spiller en vigtig rolle i vindmøllens ydeevne, da størrelsen og formen af vingerne bestemmer, hvor meget vindenergi der kan udvindes. Længere vinger kan fange mere vind på grund af arealet de passerer, og dermed producere mere energi.

Vindens hastighed spiller også en afgørende rolle. Jo højere vindhastighed, jo mere energi kan vindmøllen udvinde. Vindens hastighed kan være afgørende for, hvorvidt en vindmølle kan starte eller stoppe, da vinden skal have en minimumshastighed for at opretholde vingernes rotation og generere energi.

For at illustrere, hvordan vindens effekt afhænger af møllevingernes dimensioner og vindens hastighed, kan vi opstille et simpelt beregningseksempel.

Vindens effekt P_{vind} kan beregnes ved hjælp af følgende formel:

$$P_{\text{vind}} = 0,5 \cdot \rho \cdot A_{\text{rotor}} \cdot V^3$$

Her er ρ luftens densitet, A_{rotor} er vingearealet, og V er vindhastigheden.

Ved hjælp af ovenstående ligning kan man beregne vindens effekt på forskellige længder af vinger (40 og 80 meter) og forskellige vindhastigheder (5 m/s og 10 m/s). Vi kan antage at luftens densitet er $1,225 \text{ kg/m}^3$ (ved standardforhold).

Vingelængde (m)	Arotor (m ²)	Pvind ved 5 m/s (MW)	Pvind ved 10 m/s (MW)
40	5026	0,385	3,079
80	20106	1,539	12,315

I tabellen kan man tydeligt se at vindens hastighed og vingens størrelse har en påvirkning på vindens effekt. Jo større vinge og/eller vindhastighed, jo mere effekt. Det kan også ses, at en fordobling i vindhastigheden betyder mere end en fordobling af vingelængden med hensyn til den beregnede effekt. Dette skyldes, at vindhastigheden regnes i tredje potens, hvor vingens længde kun regnes i anden potens. Det er derfor vigtigt at installere vindmøllerne på steder med høj vindhastighed.

Nyttevirkning på en vindmølle

Betz' lov, også kendt som Betz' teori, er en fysisk lov, der angiver den maksimale effekt, som en vindmølle kan opnå. Lovens fulde navn er "Betz' lov om grænsen for vindmølleeffektivitet" og blev opstillet af den tyske fysiker Albert Betz i 1919.

Ifølge Betz' lov kan en vindmølle maksimalt opnå en nyttevirkning på 59,3%, hvilket betyder, at maksimalt 59,3% af den kinetiske energi i vinden kan omdannes til elektricitet.

Det giver mening, at man ikke kan udnytte 100% af vindens kinetiske energi, da vinden ellers ville stoppe helt med at bevæge sig efter at have passeret rotorplanet og dermed blokere for den indkommende vind.

Ligning: $P_{mølle}/P_{vind} = 0.593$

Hvis vi anvender samme beregning som i forrige afsnit med en maksimum nytteværdi på 0.593, så fås i stedet følgende tal i nedenstående tabel:

Vingelængde (m)	Arotor (m ²)	Pmølle ved 5 m/s (MW)	Pmølle ved 10 m/s (MW)
40	5026	0,228	1,826
80	20106	0,913	7,303

Disse tal vil ikke forekomme i praksis på grund af effekttab på møllen. Disse tab kan være aerodynamiske problemer som skidt på vingerne, erosion på vingens forkant samt turbulens i luften, som vil forhøje modstandskraften. Andre tab kan være relateret til effekttab i generatoren eller dårlig styring af rotores position i forhold til den indkommende vind.

Diskussion:

Fordele og ulemper ved vindenergi

Vindenergi er en af de mest populære og bæredygtige former for vedvarende energi i dag, men som med enhver anden energikilde har den både fordele og ulemper.

Fordelene ved vindenergi inkluderer dens renhed og bæredygtighed. Vindenergi er en ren energikilde, da det ikke producerer emissioner af drivhusgasser eller andre forurenende stoffer, der kan skade miljøet eller menneskers sundhed. Det er også en bæredygtig energikilde, da det ikke er begrænset af mængden af brændstof, der kan bruges, og det kan være en pålidelig og stabil kilde til energi. FORMULERING

En anden fordel ved vindenergi er dens økonomiske fordele. Selvom omkostningerne ved at opføre vindmølleparker kan være høje, er driftsomkostningerne lave, og prisen på vindenergi har tendens til at falde over tid. Det betyder, at vindenergi på lang sigt kan være en billigere form for energi, der kan reducere energiregningen for både enkeltpersoner og virksomheder.

Vindenergi har endvidere potentiale til at skabe jobmuligheder. Opbygning samt vedligeholdelse af vindmølleparker kan skabe arbejdspladser i og dermed bidrage til den økonomiske vækst.

En af de største ulemper er dog, at vindenergi er afhængig af vindforholdene. Hvis der ikke er nok vind, vil produktionen af energi falde. Det gør vindenergi mindre forudsigelig og dermed stabil end andre former for energi såsom fossile brændstoffer eller atomkraft.

En anden ulempe ved vindenergi er dens påvirkning på landskabet. Store vindmølleparker kan have en visuel påvirkning på landskabet og forårsage støjgener i områder tæt på vindmøllerne. Derudover kræver vindmøller et betydeligt område for at blive installeret, og de kan kræve fjernelse af vegetation og dermed også ødelæggelse af levesteder for dyr for eksempel fugle.

Store vindmøller kan også producere støj og vibrationer, som kan forårsage sundhedsmæssige problemer og forstyrrelser for mennesker, der bor i nærheden.

Vindmøller har de sidste mange år udviklet sig til at være en selvstændig bæredygtig energikilde som kan konkurrere med olie og kulindustrien. Sådan har det dog ikke altid været. Det er ikke mange år siden at vindmøller ikke tjente sig selv hjem.

Vindmøllerne i 1970'erne til 2010 producerede ikke nok energi i deres livsperiode til at kunne lave et profit, og derfor fik vindindustrien mange statstilskud for at kunne overleve. Disse statstilskud gav mulighed for videreudviklingen af vindmøller. En af de faktorer der øgede vindmøllers konkurrencedygtighed var, at man begyndte at lave større vindmøller. Disse vindmøller kunne producere op til dobbelt så meget strøm. Med en bedre forståelse for vindmølleproduktion, kunne de større vindmøller også bliver produceret til ca. samme mængde af materiale som der blev brugt til de små og gamle vindmøller.

Denne nye forståelse for at jo større jo bedre, sætter vindmølleindustrien i et dilemma. Siden vindmøller tager ekseptionel meget plads op, er der ikke plads til de nyere modeller, som rent faktisk giver profit. Derfor tales om, at rive de gamle vindmøller ned, for i stedet at sætte de nye op. Dette har konsekvenser for miljøet idet vindmøller er lavet af materiale som ikke kan genbruges. Derudover er vindmøllen er lavet af forskellige giftige materialer, som ikke udleder farlig gift under vindmøllens levetid, men er meget skadelig for mennesker under produktionen og rustningen.

Konklusion:

I løbet af mere end 100 år har vindenergi-teknologien udviklet sig fra små vindmøller på landdistrikter til store vindkraftværker og en vigtig kilde til bæredygtig energi.

Danmark har spillet en betydelig rolle i udviklingen af teknologien, herunder Tvind-skolens indsats med opførelsen af den store Tvind-mølle. Teknologiske fremskridt og global efterspørgsel har gjort vindenergi mere konkurrencedygtig og almindelig som energikilde.

Poul la Cour, der i 1891 lavede Danmarks første vindmølle til produktion af strøm, havde som motivation at bringe elektricitet til landbefolkningen og dermed skabe økonomisk vækst og forbedre levevilkårene i landdistrikterne. Efter olieprisstigningen i 1973 blev der igangsat en række offentlige investeringer i vedvarende energi i USA og andre lande, herunder i vindenergi, som et alternativ til fossile brændstoffer.

Bogen "The Limits of Growth" fra 1972 var en af de første bøger, der advarede om de miljømæssige udfordringer, som menneskeheden ville stå overfor i fremtiden og forudsagde bl.a. en stigning i CO₂-niveauet i atmosfæren og klimaændringer.

En vindmølle fungerer ved at omdanne vindens kinetiske energi til elektrisk energi gennem aerodynamik, mekanisk og elektromagnetisk teknologi. Vindens kinetiske energi overføres til vingerne, som drejer omkring rotorakslen og producerer mekanisk energi, som omdannes til elektrisk energi af en generator. Effektiviteten af

en vindmølle afhænger af faktorer som vindhastigheden, vingernes størrelse og form, og tårnets højde.

Der er flere kræfter, der påvirker vingens rotation, herunder aerodynamisk lift, vægt, centrifugalkraft, modstandskraft, og turbulente kræfter. For at øge effektiviteten af en vindmølle er det vigtigt at reducere modstandskraften og optimere vingeprofilen for at skabe optimal aerodynamisk lift.

Bernoullis ligning er en del af de grundlæggende principper, der ligger til grund for forståelsen af aerodynamik og skabelsen af designet af forskellige fly, vindmøller og andre lignende teknologier.

I forhold til forsøget i opgaven kan konkluderes, at vingens angrebsvinkel har en direkte korrelation til mængden af lift, der bliver produceret.

På baggrund af forsøget kan endvidere konkluderes, at vingeprofilets form har noget at gøre med i hvilke angrebsvinkler vingeprofilet genererer lift, og hvornår den opnår stall vinklen.

Der kan serudover konkluderes at vindmølleprofilernes effekt har en stor betydning af dimensionerne af en vindmølle vingen, ved at benytte Betz lov.

Vindenergi har mange fordele, herunder renhed, bæredygtighed, økonomiske fordele og potentiale til at skabe jobmuligheder. Der er dog også nogle ulemper, såsom afhængighed af vindforholdene, påvirkning på landskabet og dyreliv samt produktion af støj og vibrationer. Vindmølleindustrien har udviklet sig til at være konkurrencedygtig og bæredygtig, men den øgede størrelse af vindmøller skaber nye udfordringer, da de kræver mere plads og materialer og kan påvirke miljøet negativt. Vindenergi kæmper for at blive en mere konkurrencedygtig og bæredygtig energikilde dagligt. Det næste skridt for vindmølleindustrien er at opfinde en fuldkommen bæredygtig vindmølle, hvor materialet der er blevet brugt til produktionen af vindmøllen kan genbruges.

Litteratur:

<https://www.vestas.com/en>

<https://bu.dk/>

<https://faktalink.dk/titelliste/vindenergi-faktalink-light/vindmoller>

Basic Rotor Aerodynamics applied to wind turbines, af Martin O.L.Hansen, 1998.

Airfoil aerodynamics, af LM Windpower.

<https://tvind.dk/tvindkraft/>

<https://www.poullacour.dk/>

<https://www.folkecenter.eu/PDF/Wind-history/Vindkraftens-Historie-I-Danmark-kap.5.pdf>

https://www.youtube.com/watch?v=AOMbibblbdc&ab_channel=TvindAlert

https://www.youtube.com/watch?v=5SP4bSgg7xo&ab_channel=Tvindkraft

<https://www.information.dk/moti/2022/02/tvind-byggede-verdens-stoerste-vindmoelle-hjaelp-atomkrafttilhaengere-fremskridtsmand-eksnazist>

<https://videnomvind.dk/wiki/effektkoefficienten/>
<https://videnomvind.dk/wiki/betz-lov/>

bilag:

Nordjyske Stiftstidende - 1973-11/10

bilag 1



Nordjyske Stiftstidende - 1973-11/26

bilag 2



Nordjyske Stiftstidende - 1973-11/23

bilag 3

Nordjyske Stiftstidende - 1973-11/25

bilag 4



bilag 5

Handelsministeriets bekendtgørelse
af 19. november 1973.

Bekendtgørelse om begrænsning af elektricitetsforbruget

§ 1. Elektricitet må ikke anvendes til nedennævnte formål:

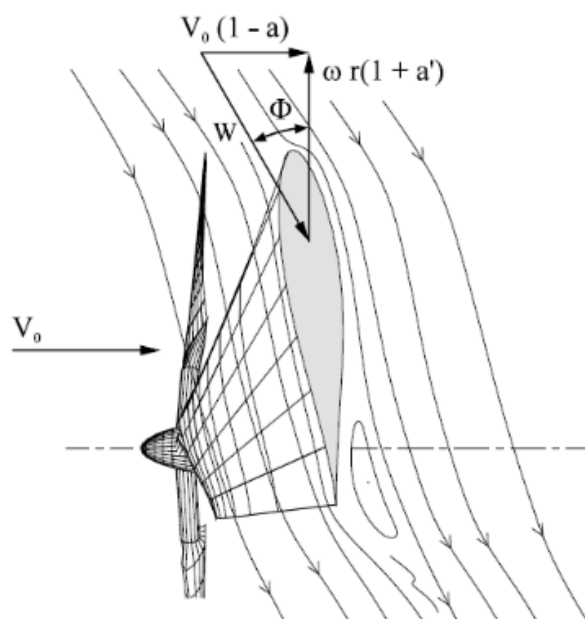
- a) Lysskilte, facadebelysning og reklamebelysning.
- b) Oplysning uden for arbejdstid af kontor-, butiks- og udstillingslokaler, herunder vinduer og udhængsskabe, medmindre sådan belysning er påkrævet af sikkerhedsmæssige hensyn som f. eks. for apoteker, pengeinstitutter, guldsmede- og juvelerbutikker eller andre særligt udsatte forretningslokaler.
- c) Offentlig og privat udendørs udsmykningsbelysning, herunder illumination af bygninger, statuer o. lign., **julebelysning** og havebelysning.

§ 2. Det påhviler kommuner, amtskommuner og andre, der er ansvarlig for belysning af pladser, gader og veje, efter forhandling med politi og vejmyndigheder at begrænse sådan belysning til det omfang, der er strengt påkrævet af trafikale og sikkerhedsmæssige grunde.

§ 3. Overtrædelse af bestemmelserne i § 1 straffes med bøde, hæfte eller fængsel i indtil 2 år.
Begås overtrædelsen uagtsomt, er straffen alene bøde.

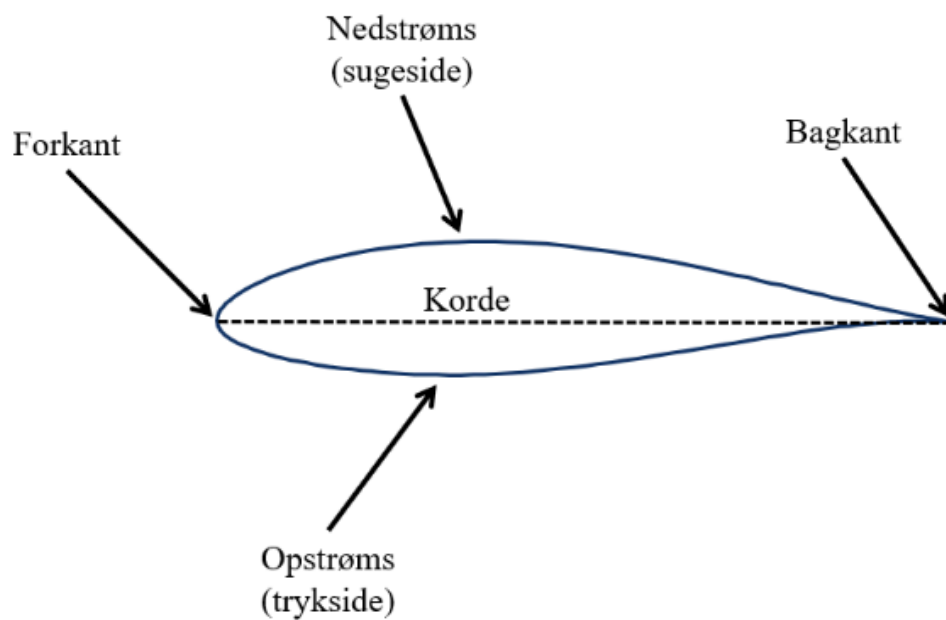
§ 4. Bekendtgørelsen træder i kraft onsdag d. 21. november 1973.

Flow hen over en vinge. Bemærk retningen W er den resulterende hastighedsvektor af V_0 og ω
 Kilde: LM Wind Power

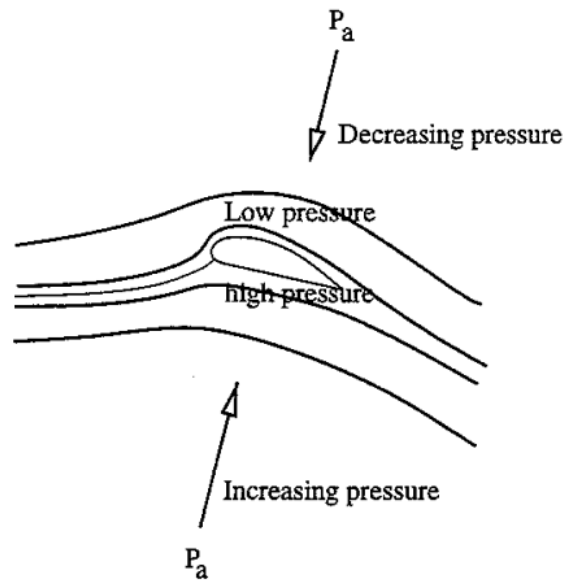


billag 7

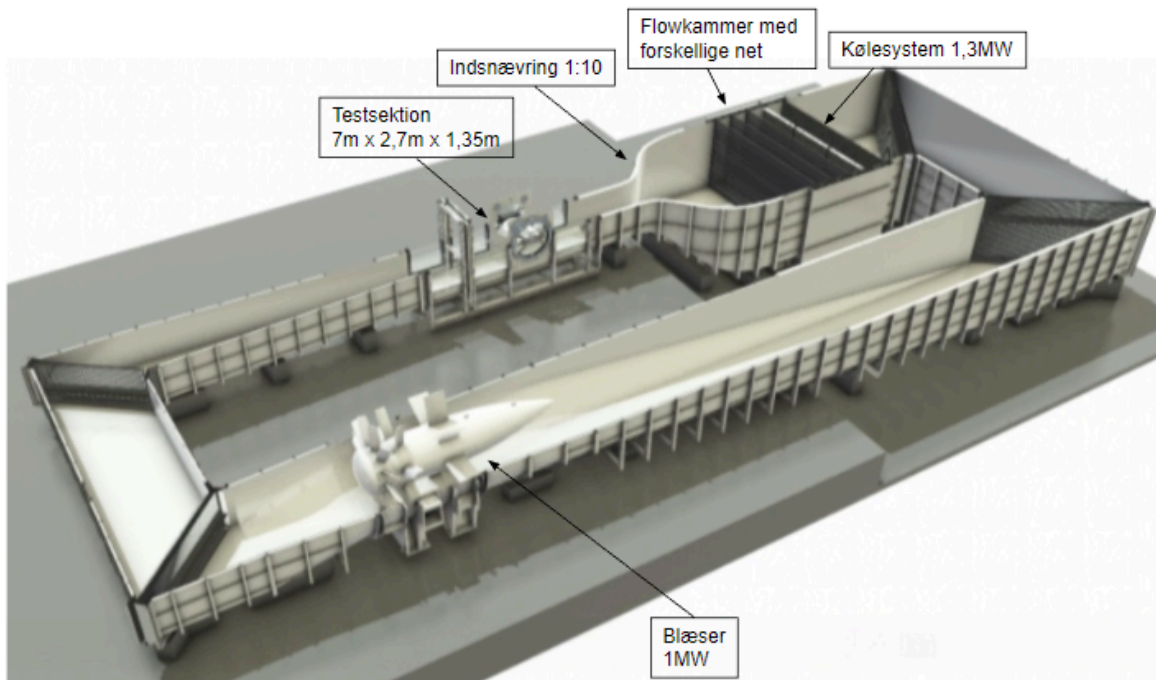
Nomenklatur på vingeprofiler
 Kilde: LM Wind Power



billag 8

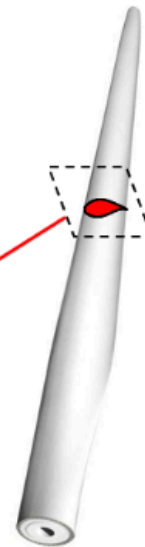
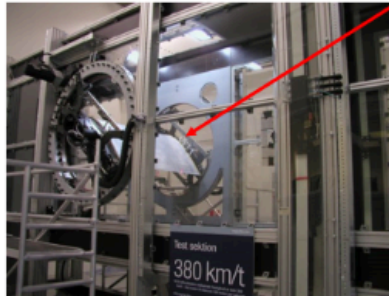


billag 9



billag 10

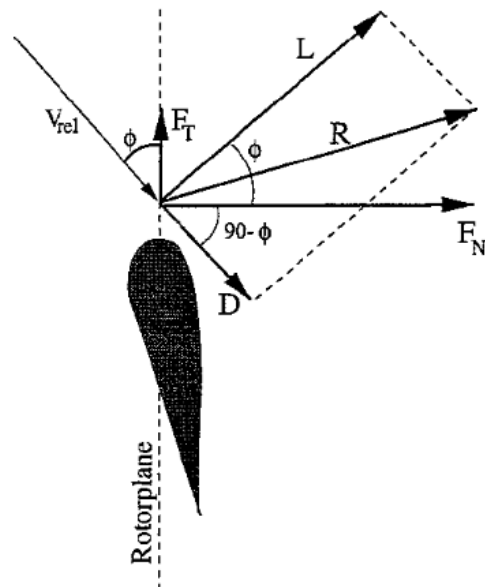
- LM tester 2D vingeprofiler
- Testmodel:
 - Bredde: 1.35 m
 - Korde: 0.90 m
 - Monteres mellem to drejeskiver
- Testsektion:
 - Bredde 1.35 m
 - Højde 2.70 m
 - Længde: 7 m
- Tunnel:
 - Bredde 14 m
 - Længde 37 m



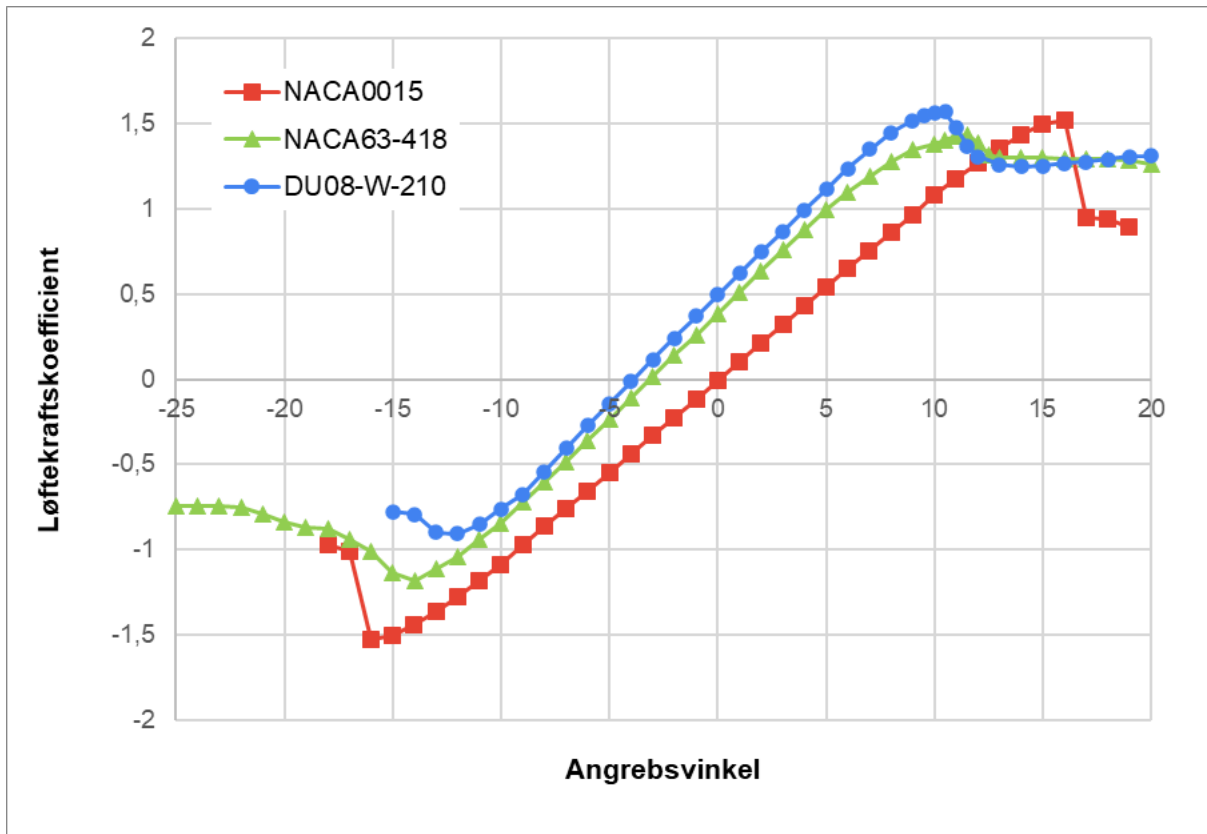
billag 11

L er løft
 D er drag (friktion og form)
 R er resulterende kraft
 F_n er normalkomponenten af den resulterende kraft
 F_t er den tangentielle component af den resulterende kraft
 F_n dikterer hvor strukturel stærk vingen skal være
 F_t dikterer vingens rotation

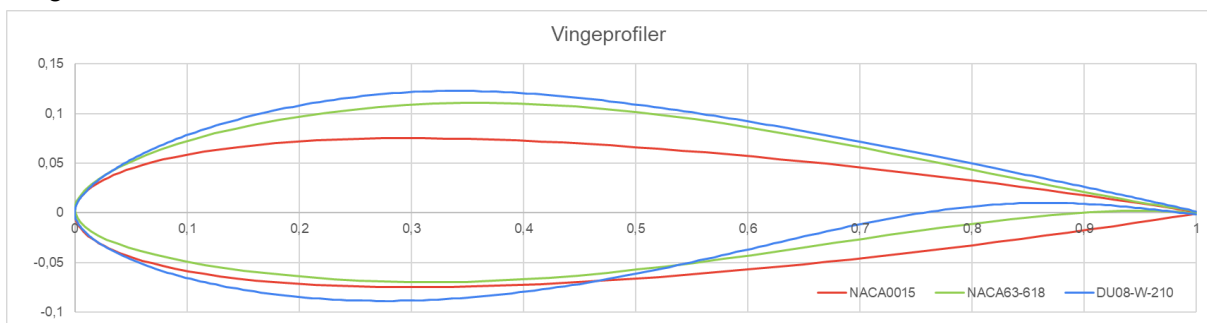
Kilde: MOLH



billag 12



bilag 13



bilag 14

