

Konstruktion av liten vindtunnel

Vindtunnel för visualisering av flödet kring en vingprofil ämnad att stödja undervisning av grundläggande strömningsmekanik

Kandidatarbete inom Mekanik och Maritima Vetenskaper

HANNES ALBERTSSON
SIMON DINGER
ADAM SKÖLD
KALLE SVENSSON

Institution för Mekanik och maritima vetenskaper

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2022
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2022

Konstruktion av liten vindtunnel

Vindtunnel för visualisering av flödet kring en vingprofil ämnad att stödja undervisning av grundläggande strömningsmekanik

HANNES ALBERTSSON
SIMON DINGER
ADAM SKÖLD
KALLE SVENSSON



CHALMERS

Institution för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Avdelningen för Strömningslära
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2022

Konstruktion av liten vindtunnel

Vindtunnel för visualisering av flödet kring en vingprofil ämnad att stödja undervisning av grundläggande strömningsmekanik

HANNES ALBERTSSON, SIMON DINGER, ADAM SKÖLD, KALLE SVENSSON

© HANNES ALBERTSSON, SIMON DINGER, ADAM SKÖLD, KALLE SVENSSON, 2022.

Handledare: Jonathan Fahlbeck, Doktorand, Mekanik och maritima vetenskaper, avdelningen för strömningslära

Examinator: Niklas Andersson, Biträdande professor, Mekanik och maritima vetenskaper, avdelningen för strömningslära

Kandidatarbete 2022

Institution för Mekanik och Maritima Vetenskaper

Avdelningen för Strömningslära

Chalmers Tekniska Högskola

SE-412 96 Göteborg

Telefon +46 31 772 1000

Omslag: Den tillverkade vindtunneln utrustad med mätinstrument.
Göteborg, Sverige 2022

Abstract

The use of wind tunnels is a vital part of the field of fluid mechanics. This project have aimed to construct a small wind tunnel intended to be used in a laboration for an introduction course in the field of fluid mechanics at Chalmers University of Technology. The laboration aims to demonstrate stall of a wing and measure the resulting forces on the wing depending on its angle of attack. The airflow in the tunnel was set to reach speeds around 10 m/s, and be parallel, with low turbulence intensity. Through the use of design ideas and rules of thumb produced by previous studies, the project resulted in a wind tunnel that is small enough to be fitted upon a normal sized table. Testing showed that the resulting airflow in the tunnel could reach speeds up to 12 m/s, and that the flow was parallel, except for some small variations.

Keywords: wind tunnel design, wing, stall, air flow, pressure, visualization, lift and drag measurements,

Sammandrag

Användningen av vindtunnlar är en vital del inom området strömningslära. Detta projekt ämnade att konstruera en liten vindtunnel avsedd för att användas i en laboration för en grundkurs i strömningsmekanik vid Chalmers Tekniska Högskola. Laborationen ämnar att demonstrera överstegring hos en vinge och mäta de resulterande krafterna på vingen beroende på dess anfallsvinkel. Luftflödet i tunneln skulle uppnå hastigheter runt 10 m/s, och vara parallellt, utan någon större turbulens. Genom användningen av konstruktioner och tumregler framtagna av tidigare studier, resulterade projektet i en vindtunnel som är liten nog att få plats på ett normalstort bord. Testning visade att det resulterade luftflödet i tunneln kunde uppnå hastigheter upp mot 12 m/s och att flödet var parallellt, frånsett vissa små variationer.

Nyckelord: vindtunnelkonstruktion, vinge, överstegring, luftflöde, tryck, visualisering, lyft- och strömningsmotståndsmätning.

Förord

Detta projekt hade inte kunnat genomföras utan den hjälp och handledning som vi fått av flertalet personer som praktiserar på Chalmers Tekniska Högskola. Vi vill speciellt tacka vår handledare Jonathan Fahlbeck, som med sin expertis och ledsagning har hjälpt oss med våra ideér, styrt oss mot våra mål och som får den stora äran att ta emot det resultat vi frambringat.

Ännu ett tack vill vi rikta till Jan Bragee och Reine Nohlborg som med sina stora kunskaper, erfarenheter och praktiska förmågor inom tillverkning och konstruktion har varit oundgängliga i vår tillverkningsprocess.

Ett sista tack vill vi ge till Edward Hadziavdic, Isak Jonsson och Petter Miltén, vars konsultation och expertis inom strömningsmekanik och 3D-skrivning har varit en vital del genom hela vårt projekt.

HANNES ALBERTSSON, SIMON DINGER, ADAM SKÖLD, KALLE SVENSSON, Göteborg, Juni 2022

Akronymlista

Här nedan följer en lista av akronymer som har använts i denna rapport.

| | |
|------|---|
| CFD | Computational fluid dynamics |
| FEA | Finita-Elementanalys |
| KV | Kontrollvolym |
| KY | Kontrollyta |
| NACA | National Advisory Committee for Aeronautics |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| PLA | Polylaktidplast |
| RTT | Reynolds Transportteorem |

Nomenklatur

Här nedan följer nomenklaturen som har använts i denna rapport.

Index

$l, d, f, exp, e, s,$ Index för proportionalitetskonstant för tryckförluster
 $mesh, h, m$

Variabler

| | | |
|--------------|---|----------------------|
| ϵ | Absolut ytfinitet för en yta | [m] |
| f | Darcys friktionsfaktor | [-] |
| D | Diameter | [m] |
| ρ | Densiteten i luft | [kg/m ³] |
| θ | Diffusorvinkeln | [°] |
| C_D | Dragkoefficient | [-] |
| μ | Dynamisk viskositet i en fluid | [-] |
| ϕ | Ekvivalenta kon-expansionsvinkeln | [°] |
| \mathbf{B} | Extensiv storhet i en fluid | [-] |
| g | Gravitationsaccelerationen vid jordytan | [m/s ²] |
| D_H | Hydraulisk diameter | [m] |
| H | Höjd | [m] |
| β | Intensiv storhet i en fluid | [-] |
| A_R | Kvot mellan tvärsnittsarean på komponents utlopp och inlopp | [-] |
| C_L | Lyftkoefficient | [-] |
| L | Längd | [m] |
| m | Massa | [kg] |
| K | Porportionalitetskonstant för tryckförluster | [-] |

| | | |
|--------------------|----------------------------------|---------------------|
| β_s, β_h | Porositet för ett nät och raster | [-] |
| Re | Reynoldstal | [-] |
| S | Sidlängden på en hexagon | [m] A |
| Tvärsnittsarea | [m ²] | |
| p | Tryck | [N/m ²] |
| v | Vindhastigheten | [m/s] |

Innehåll

| | |
|--|-------------|
| Akronymlista | viii |
| Nomenklatur | ix |
| Figurer | xiii |
| Tabeller | xiv |
| 1 Introduktion | 1 |
| 1.1 Bakgrund | 1 |
| 1.2 Syfte | 1 |
| 1.3 Befintlig Laboration | 1 |
| 1.4 Tekniska mål | 2 |
| 1.5 Avgränsningar | 2 |
| 2 Teori | 3 |
| 2.1 Strömningsmekanik | 3 |
| 2.1.1 Bevarandet av massan | 3 |
| 2.1.2 Bernoullis ekvation för inkompressibla fluider | 4 |
| 2.1.3 Lyftkraft och strömningsmotstånd | 5 |
| 2.1.4 Reynoldstal | 6 |
| 2.2 Vindtunnlar | 6 |
| 2.2.1 Hastighetsklassificering | 6 |
| 2.2.2 Geometrisklassificering | 7 |
| 2.2.3 Kontraktionsmunstycke | 8 |
| 2.2.4 Testsektion | 9 |
| 2.2.5 Diffusor | 10 |
| 2.2.6 Raster | 10 |
| 2.2.7 Nät | 13 |
| 2.2.8 Fläkt | 13 |
| 2.3 Tryckförluster | 14 |
| 2.3.1 Darcys friktionsfaktor | 14 |
| 2.3.2 Proportionalitetskonstanter | 14 |
| 3 Metod | 16 |
| 3.1 Konstruktion och tillverkning | 16 |
| 3.2 Tryckförluster | 22 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.3 | Laboration | 23 |
| 4 | Resultat och diskussion | 24 |
| 4.1 | Konstruktion | 24 |
| 4.1.1 | Nuvarande vindtunnel | 24 |
| 4.1.2 | Kontroll av vindtunnelns dimensioner utifrån teori | 25 |
| 4.2 | Luftflöde | 26 |
| 4.3 | Laboration | 27 |
| 5 | Slutsats | 31 |
| 5.1 | Reflektion kring resultatet | 31 |
| 5.2 | Vidareutveckling | 32 |
| | Källförteckning | 33 |
| A | Föregående Laboration | I |
| B | Ny Laboration | V |

Figurer

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Förhållandet mellan tvärsnitt och hastighet. | 4 |
| 2 | NACA 0009 vingprofil. | 5 |
| 3 | Geometrisklassificering för vindtunnlar. | 7 |
| 4 | Skiss av kontraktionsmunstycke. | 8 |
| 5 | Tre profiler föreslagna av Bell och Mehta [9]. | 9 |
| 6 | Skiss av testsektion. | 9 |
| 7 | Skiss av diffusor. | 10 |
| 8 | Raster sett framifrån. | 11 |
| 9 | Raster sett från sidan. | 11 |
| 10 | Definition av raster-parametrar för areaberäkningar. | 11 |
| 11 | Skiss av nät | 13 |
| 12 | Testsektionen. | 17 |
| 13 | Diffusorn. | 17 |
| 14 | Fläkten. | 17 |
| 15 | Kontraktionsmunstycket. | 17 |
| 16 | Grunddesign av tillverkad vindtunnel. | 18 |
| 17 | Ansys-analys av drag- och tryckspänningar i strukturen. | 18 |
| 18 | Skåra och räls på testsektion. | 19 |
| 19 | Mätutrustning. | 19 |
| 20 | Insida av vinge med cylindrar och kopplade stänger. | 20 |
| 21 | Vinge monterad i testsektion. | 20 |
| 22 | Raster. | 21 |
| 23 | Nät, sett från testsektionen, placerad mellan testsektionen och diffusorn. | 21 |
| 24 | Vindhastigheter i vindtunneln. | 22 |
| 25 | Laborationsstationen med all tillhörande utrustning. | 23 |
| 26 | Vinge med tafsar placerade på dess ovansida. | 23 |
| 27 | Vindtunnelns alla moduler placerade i hylla | 25 |
| 28 | Test av parallellt flöde i testsektion. | 27 |
| 29 | Vinge i olika anfallsvinklar. | 28 |
| 30 | $\frac{C_L}{C_D}$ för anfallsvinklarna 5°, 10°, 12.5°, 15° och 20° vid tre separata tillfällen. | 30 |
| 31 | Visualisering av överstegring under laborationen. | 30 |

Tabeller

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Krav på vindtunneln. | 2 |
| 2 | Vindtunnelns dimensioner. | 16 |
| 3 | Dimensioner för raster och nät. | 17 |
| 4 | Utdrag från tekniska mål rörande ving. | 19 |
| 5 | Vindtunnelns tryckförluster. | 22 |
| 6 | Dimensioner och vikter för enskilda moduler. | 24 |
| 7 | Vindtunnelns slut- och riktvärden. | 26 |

1

Introduktion

1.1 Bakgrund

Alla objekt som existerar i jordens atmosfär påverkas på något sätt av det luftflöde som rör sig kring dess kropp. Vid konstruktion av i stort sett allt som ska röra sig i högre hastigheter i atmosfären eller som kan utsättas för starka vindar, så måste hänsyn tas till konstruktionens areodynamik. Det finns idag många sätt att studera luftflöden och dess effekter på olika objekt. En av de historiskt sett vanligaste metoderna är att använda en vindtunnel, där fläktar leder en luftström genom en tunnel där ett eller flera aktuella mätobjekt har placerats. Vid Chalmers Tekniska Högskola hanteras ett flertal avancerade vindtunnlar ämnade för vetenskapliga studier av luftflöden. Dock finns det ingen vindtunnel som är ämnad för användning inom grundkurser i strömningsmekanik.

1.2 Syfte

Detta projekt ämnar att ytterligare förbättra grundkursen *Fluid Mechanics MTF053* genom att tillverka en vindtunnel anpassad för laborationen *Hands-on lab Part 2: Measurements of Forces on a Wing*, som ges i samband med kursen. Vindtunneln har som syfte att visualisera luftflödet kring en flygplansvinge i realtid. Studenter som deltar på laborationen ska själva kunna kontrollera en vinge i vindtunneln samt undersöka de luftströmmar som skapas vid olika anfallsvinklar. Vindtunneln ska komplettera undervisningen genom de praktiska element den tillhandahåller.

1.3 Befintlig Laboration

I den föregående laborationen, vars labb-PM hittas i appendix A, monterades en vinge hängandes i en vagn via två stänger. Vagnen var placerad på en räls och fäst i en kraftmätare för att kunna mäta kraften applicerad på vingen längs med flödesriktningen. Vagnen i sin tur kan mäta krafterna i vertikal led. Vingen placerades sedan framför en fläkt med ett munstycke med en slutdiameter på 18 cm. Genom fläktens arbete kunde vindhastigheter mot vingen på cirka 14 m/s uppnås. Laborantens uppgift var sedan att undersöka lyft- och strömningmotståndskoefficienterna för olika anfallsvinklar på vingen, och utifrån dessa bestämma vilken vinkel som ger högst lyftkraft och lägst strömningsmotstånd, samt vid vilken vinkel överstegringen uppstår. Laboranten ska sedan redogöra för varför överstegringen uppstod.

1.4 Tekniska mål

Målet med detta projekt är att konstruera en småskalig vindtunnel tänkt att användas i kursen *Fluid Mechanics MTF053*, samt att uppdatera instruktionerna för laborationen där den ska användas. Vindtunneln ska kunna uppnå en vindhastighet på minst 10 m/s vid testsektionen med ett parallellt luftflöde. Till laborationen skall det konstrueras en eller flera vingar som ska kunna placeras i testsektionen. Luftflödet kring vingen i testsektionen ska kunna ses med blotta ögat från sidan. De mätvärden som ges från utrustningen skall även vara repeterbara med godtycklig precision. Vidare gäller även kraven ställda i följande tabell:

Tabell 1: Krav på vindtunneln.

| Nr | Krav |
|-----|---|
| 1. | Vindtunnelns totallängd måste vara mindre än 210 cm. |
| 2. | Vindtunnelns moduler måste väga mindre än 10 kg vardera. |
| 3. | Testobjekt med bredd 10 cm ska kunna testas i tunneln. |
| 4. | Den ska vara monterbar av en person. |
| 5. | Alla delar skall gå att placera på ett hyllplan med djup 60 cm. |
| 6. | Den skall vara säker att hanteras av studenter och laborationshandledare. |
| 7. | Vindhastigheten skall vara varierbar. |
| 8. | Vingen ska tydligt kunna ses utan att blockeras från sidan. |
| 9. | Anfallsvinkeln på vingen skall gå att anpassa utan att öppna testsektionen. |
| 10. | Luftflödet skall vara parallellt i testsektionen. |
| 11. | Mätresultat ska vara repeterbara. |
| 12. | Den föregående laborationen ska vara genomförbar. |

1.5 Avgränsningar

Vindtunneln ska möta de krav som ställts på projektet. Laborationensdelen kommer endast konstrueras för att vidareutveckla den föregående laborationen. Projektet avser inte att utveckla en ny typ av vindtunnel utan använder sig av befintliga konstruktioner av vindtunnlar. Vindtunneln ska hantera vindhastigheter upp till 15 m/s. Vindtunneln ska endast vara utrustad för att göra enklare mätningar. Projektet kommer inte att innefatta anpassning till andra kurser utöver *Fluid Mechanics MTF053*.

2

Teori

I följande kapitel presenteras grundläggande teori för fluiders egenskaper i låga hastigheter samt teori för en vindtunnels komponenter och deras konstruktion.

2.1 Strömningsmekanik

Inom strömningsmekanik finns det grundläggande principer som kan användas för att ge samband och ekvationer för hastighet och tryck beroende på tid och position. Principerna beskrivs med fullständiga härledningar utav Frank M.White i [1] men utdrag kommer att användas i kapitel 2.1.1 och 2.1.2 för att ge grund till kommande beräkningar.

2.1.1 Bevarandet av massan

Följande utgår från Reynolds Transportteorem (RTT) som beskrivs av följande uttryck:

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{B}_{\text{system}}) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{\text{KV}} \beta \rho dV \right) + \int_{\text{KY}} \beta \rho (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dA \quad (2.1)$$

där \mathbf{B} är den extensiva storheten och väljs till någon av fluidens egenskaper, till exempel vid beräkning av massflödet ansätts $\mathbf{B} = m$. β är den intensiva storheten, mängden av \mathbf{B} per massenhet $\beta = \frac{d\mathbf{B}}{dm}$, β blir därför vid beräkningar av massflöde $\beta = \frac{dm}{dm} = 1$. KY är kontrollytan och KV är kontrollvolymen. RTT för ett system med konstant strömning, fix kontrollvolym, endimensionella inlopp och utlopp med konstanta fluidegenskaper över hela tvärsnittet erhålles för kontrollvolymen följande:

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{B}_{\text{system}}) = \frac{d}{dt} \left(\int_{\text{KV}} \beta dm \right) + \left(\sum_{\text{utlopp}} \beta \dot{m} \right) - \left(\sum_{\text{inlopp}} \beta \dot{m} \right) \quad (2.2)$$

Vid bevarandet av massan fås för systemet massan m med avseende på tiden t

$$\left(\frac{dm}{dt} \right)_{\text{system}} = 0. \quad (2.3)$$

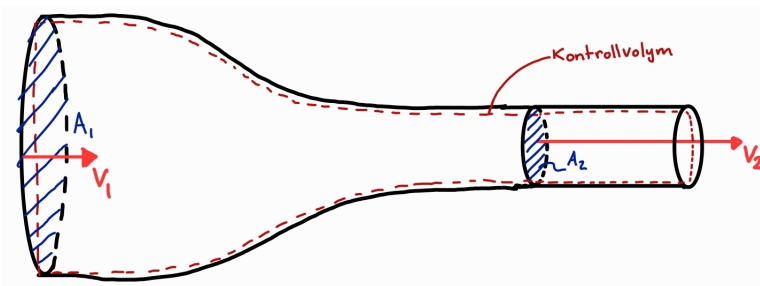
Insatt i RTT med en fix kontrollvolym, ett begränsat antal endimensionella inlopp och utlopp samt ett konstant massflöde kan ett system beskrivas med ekvation 2.2 som ger följande

$$\left(\sum_i \rho_i A_i v_i \right)_{\text{in}} = \left(\sum_i \rho_i A_i v_i \right)_{\text{ut}} \quad (2.4)$$

där $\dot{m} = \rho Av$ är massflödet, ρ är densitet, A är tvärsnittsarean och v är hastigheten. Med en konstant densitet, vilket innebär att fluiden är inkompressibel, så erhålles förhållandet mellan hastighet och area som

$$\left(\sum_i A_i v_i\right)_{\text{in}} = \left(\sum_i A_i v_i\right)_{\text{ut}} \quad (2.5)$$

När en fluid rör sig i hastigheter under 30 % av ljudhastigheten (Mach=0.3) kan inkompressibla egenskaper antas, då densitetsvariationer är försumbara [2]. Förutsatt att effekter av gränsskikt kan försummas och med hastigheter under 0.3 Mach kan de valda förenklingarna som presenterats ovan användas. Ekvation 2.5 ger nu första förhållandet som används vid konstruktion av vindtunnel. Figur 1 illustrerar det som beskrivs i ekvation 2.5 och kan med omskrivning ge hur hastigheten V_1 eller V_2 förändras beroende på hur man väljer A_1 och A_2 , där $V_1 < V_2$ då $A_2 < A_1$. Där A_1 och A_2 är inloppsarea och utloppsarea i den konvergenta sektionen uppströms testsektionen.



Figur 1: Förhållandet mellan tvärsnitt och hastighet.

2.1.2 Bernoullis ekvation för inkompressibla fluider

Bernoullis ekvation kan användas för att beskriva hur hastigheten på en inkompressibel fluid förändras beroende på skillnader i tryck och potentiell energi längs en strömningslinje enligt

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gZ = \text{Konstant} \quad (2.6)$$

där p är det statiska trycket i punkten, ρ är fluidens densitet och Z är punktens höjd i tyngdaccelerationens riktning inom en godtycklig referensram. Om flödet kan betraktas som förlustfritt längs med en strömningslinje kan man ställa upp 2.6 för två punkter längs en strömningslinje vilket resulterar i följande uttryck

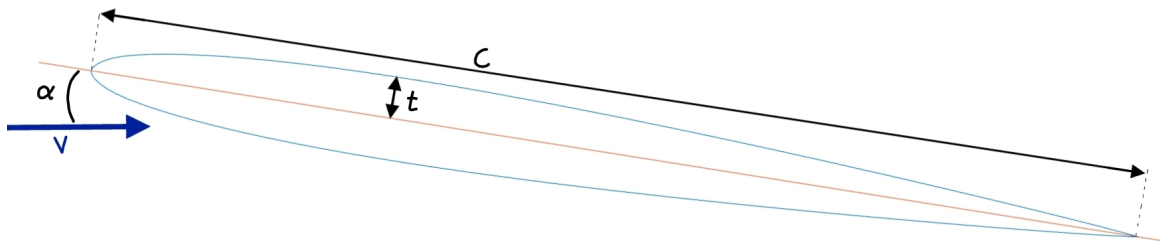
$$p_1 + \frac{1}{2}\rho_1 v_1^2 + \rho_1 gZ_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho_2 v_2^2 + \rho_2 gZ_2 \quad (2.7)$$

där index 1 och 2 indikerar två olika positioner längs med en strömningslinje. Utöver ett inkompressibelt flöde utgår Bernoullis ekvation från antagandet att strömmarna är friktionsfria samt stationära, vilket är en av orsakerna till att verkliga modeller tenderar att skilja sig något från det ideala fallet som beräknas med Bernoullis ekvation [1].

2.1.3 Lyftkraft och strömningsmotstånd

När en ving befinner sig i en fluid i rörelse utsätts den för krafter i tre dimensioner. Dessa krafter skapas då en vingen bromsar upp fluiden, exempelvis som när ett barn leker med handen i vinden genom ett bilfönster. Då handen vrids upp kommer handen blockera en större del av flödet, vilket ökar kraften i strömningsriktningen. När handen vrids lyfts den även uppåt av fluiden. Dessa krafter kallas lyftkraft och strömningsmotstånd och ökar med ökande hastigheter. Förhållandet mellan hastigheten och krafterna påverkas kraftigt av anfallsvinkeln α , vilket är vinkeln mellan mittlinjen av vingen och flödesriktningen \vec{v} , som visas i figur 2. Då anfallsvinkeln ökar kommer även lyftkraft och strömningsmotstånd att öka. Om anfallsvinkeln blir tillräckligt stor, cirka 12-15° beroende på vingprofil, börjar flödet att separera på ovansidan av vingen. När detta sker kommer lyftkraften börja att plana ut för att slutligen börja att minska, vilket kallas överstegring[3].

En lyftkropp kan optimeras för att skapa så mycket lyftkraft som möjligt samtidigt som strömningsmotståndet minimeras. Relation mellan krafterna beskrivs av förhållandet $\frac{C_L}{C_D}$. En vingprofil, likt fågelvingar, används för att skapa dessa förutsättningar. Ett system för att bygga vingprofilen är NACA, utvecklat av NACA vilket är dagens NASA, som underlättar för standardisering av vingprofiler [3]. Exempelvis NACA 0009, som visas i figur 2, är en helt symmetrisk ving, utan böjd mittlinje och med en största tjocklek t som är på 9% av kordan C .



Figur 2: NACA 0009 vingprofil.

Vid experiment är det ofta av stort värde att se hur fluiden rör sig över testobjektet. För att visualisera dessa flöden kan flera olika metoder användas, såsom rök, partiklar eller tunna trådar, så kallade tafsar. Tanken är att visualisera strömlinjer som finns i flödet genom att exempelvis röken lägger sig längs med flödeslinjerna, vilket visar hur fluiden beter sig under experimentet [4].

Vid relativt låga flödes hastigheter är tafsar vanligt förekommande. Ett problem som kan uppstå vid användandet av tafsar är att de är för tjocka och/eller för styva. Detta gör att flödet kan antas vara parallellt när det egentligen inte är det och virvlar som är av intresse inte visas. Dock finns det problem med för tunna trådar ($<0.1\text{mm}$) då dessa blir så små att de är svåra att läsa av. Avläsning sker oftast med hjälp av en kamera som kan påverkas av reflekterat ljus om trådarna är för tunna [5].

2.1.4 Reynoldstal

Reynoldstalet, Re , beskriver förhållandet mellan konvektiva och viskösa krafter hos fluiden. Det beräknas med hjälp av fluidens densitet ρ , dynamiska viskositet μ samt viss sträcka L som fluiden rör sig över med en viss hastighet v , enligt

$$Re = \frac{\rho v L_c}{\mu}. \quad (2.8)$$

Reynoldstal används för att ge en uppskattning om flödet är laminärt eller turbulent, där gränserna för när turbulent flöde inträffar beror på vilken yta som undersöks. Längden L_c är en längdskala som är karaktäristisk för ett specifikt flöde. Denna kan ändras för att bestämma vilket typ av flöde det rör sig om[4]. För att beräkna Reynoldstalet inuti en kanal bör L_c och v ansättas till den hydrauliska diametern D_h för tvärsnittet respektive $v_{\text{friström}}$, hastigheten i mitten av kanalen. Om det är längs en vinge som flödet skall studeras används istället kordans längd C som L_c . Då en vinge förenklas till en platta används samma gränser för att bestämma om flödet är turbulent ($10^6 < Re$) eller laminärt ($10^3 < Re < 10^6$). Den hydrauliska diametern D_h för ett kvadratisk tvärsnitt erhålles enligt [6]

$$D_h = 2\sqrt{A/\pi}. \quad (2.9)$$

2.2 Vindtunnlar

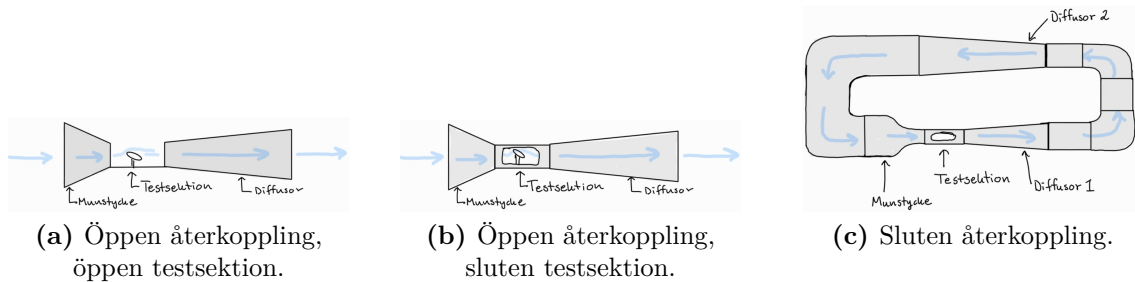
I dagsläget finns ett flertal mjukvaror för numerisk beräkning av strömningsmekaniska problem, detta benämns ofta till engelskans computational fluid dynamics, CFD. CFD används inom både forskning och produktutveckling för att utföra strömningsberäkningar. Dessa beräkningar baseras på modeller och behöver verifieras av experimentell data för att kunna styrka simuleringarna. För att anskaffa data används vindtunnlar då de bidrar med en relativt kontrollerad miljö att utföra experiment i. De experiment som utförs i en vindtunnel ger data som används både självständigt som forskningsunderlag, men även för att validera CFD-modeller. Vindtunnlar kan klassificeras både med avseende på geometrin av tunneln samt hastigheten hos fluiden i tunneln.

2.2.1 Hastighetsklassificering

Det finns flera typer av vindtunnlar med olika ändamål som kräver hastigheter från nära noll till flera gånger ljudetshastighet. Klasserna definieras baserat på Mach-tal enligt följande[7]: låghastighets-subsonisk ($Ma < 0.3$), subsonisk ($0.3 < Ma < 0.8$), transonisk ($0.8 < Ma < 1.2$), supersonisk ($1.2 < Ma < 5.0$) samt hypersonisk ($5.0 < Ma$).

2.2.2 Geometriklassificering

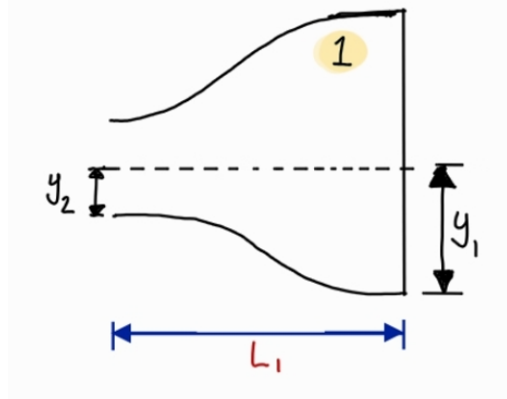
Baserat på geometrin hos en låghastighets-vindtunnel kan de delas in i två olika typer, med öppen eller sluten återkoppling. En sluten vindtunnel är ett slutet system där fluiden i tunneln leds från utloppet tillbaka till inloppet. Detta bibehåller fluidens kinetiska energi, vilket minskar behovet av att accelerera upp ny fluid från stillastående till önskad hastighet. Vidare bidrar en sluten vindtunnel till att minska energiåtgången under drift samt att ge större kontroll av flödet [8]. Denna typ av tunnel kräver dock mer plats då återkopplingen tar upp ytterligare plats jämfört med en öppet återkopplad vindtunnel. En vindtunnel kan även ha två olika konfigurationer av testsektioner [8], öppen eller stängd. Med en öppen testsektion finns inga väggar som styr fluiden, detta leder dock till att tunneln suger in luft genom testsektionen istället för genom munstycket. Vilken typ av tunnel och testsektion som är bäst handlar om, precis som i många andra val av konstruktion, vad som är tunnelns ändamål. Figur 3 visar olika typer av vindtunnlar och testsektioner.



Figur 3: Geometriklassificering för vindtunnlar.

2.2.3 Kontraktionsmunstycke

Kontraktionsmunstyckets primära syfte är att accelerera luftströmmen strax före testsektionen genom en areaövergång, beskrivet i ekvation 2.5 för att ge ett parallellt luftflöde. I allmänhet bestämmer munstyckets geometri luftflödet genom densamma, figur 4 illustrerar areaövergången i ett kontraktionsmunstycke.



Figur 4: Skiss av kontraktionsmunstycke.

Ett kort munstycke ger mindre risk för bildandet av tjocka gränsskikt som ökar mängden arbete som krävs av fläkten. En för brant lutning ökar risken för separation vilket i sin tur ger ökad turbulensintensitet i testsektionen. Detta ger utrymme för att utforska och ta fram en optimal profil för munstycket. Det finns flera förslag på vad som är den optimala profilen. Bell och Mehta [9] föreslog tre profiler redan 1988. De tre profilerna bestäms av polynomen i ekvationerna 2.10 - 2.12.

$$y(x) = H_{in} - (H_{in} - H_{ut})(-20x^7 + 70x^6 - 84x^5 + 35x^4), \quad (2.10)$$

$$y(x) = H_{in} - (H_{in} - H_{ut})(6x^5 - 15x^4 + 10x^3), \quad (2.11)$$

$$y(x) = H_{in} - (H_{in} - H_{ut})(-2x^3 + 3x^2), \quad (2.12)$$

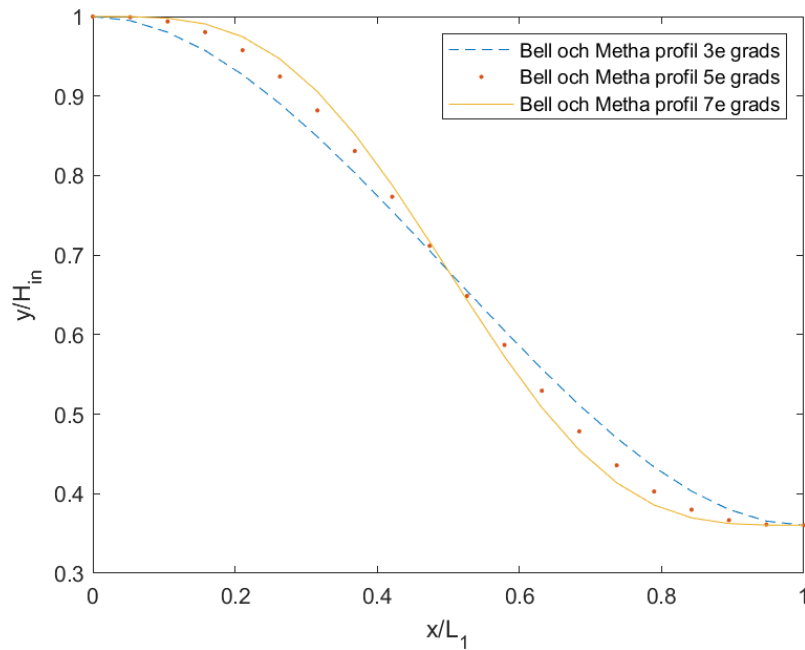
där H_{in} och H_{ut} är höjden vid inloppet respektive utloppet av munstycket. Variabeln x utgör positionen i längdriktningen och variabeln y utgör position i höjdriktning. Dessa profiler, som visas i figur 5, testades sedan experimentellt.

Deras studie visade på att 5e-gradspolynomet i ekvation 2.11 gav bäst resultat med avseende på mängden separation, uniformt flöde och minimering av Reynoldstal [9]. Vidare är det visat att munstyckets inlopp bör förhålla sig till sitt utlopp enligt

$$6 \leq \frac{A_{inlopp}}{A_{utlopp}} \leq 10 \quad (2.13)$$

och att längden L bör förhålla sig till inloppsradien y_1 [9] enligt

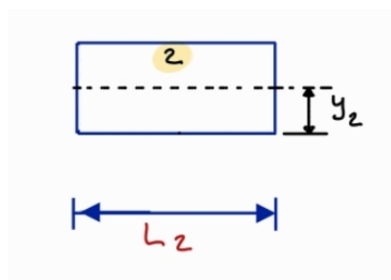
$$\frac{L_1}{2y_1} \approx 1 \quad (2.14)$$



Figur 5: Tre profiler föreslagna av Bell och Mehta [9].

2.2.4 Testsektion

Testsektionen är den del av vindtunneln där testobjektet placeras. Testsektionens dimensioner bestäms av de objekt och flöden som skall användas för mätning eller visualisering. Det är testsektionen som bestäms först när en ny vindtunnel utformas, då den till stor del bestämmer användningsområdet för tunneln. Hur lång, bred och hög testsektionen bör vara varierar beroende på om det är en racerbil som är lång i förhållande till höjd och bredd, ett flygplan som kräver mer bredd eller en byggnad som kräver höjd. Figur 6 visar en skiss över hur testsektionen kan utformas, sett från sidan i två dimensioner.



Figur 6: Skiss av testsektion.

Vindtunnelns tvärsnittsarea påverkar tryckfallet genom tunneln, utformningen av testsektionens tvärsnitt har däremot försumbar inverkan på tryckfallet [10]. Det som är styrande är syftet med vindtunneln samt storlek och utformning på de testobjekt som ska testas. Det är viktigt att från början veta vilka hastigheter som fluiden ska uppnå i testsektionen så att tvärsnittsarea och fläkt kan väljas efter det. Med hjälp av ekvation 2.5 kan en uppskattning av förhållandet för både testsektion-munstycke samt testsektion-fläkt ges.

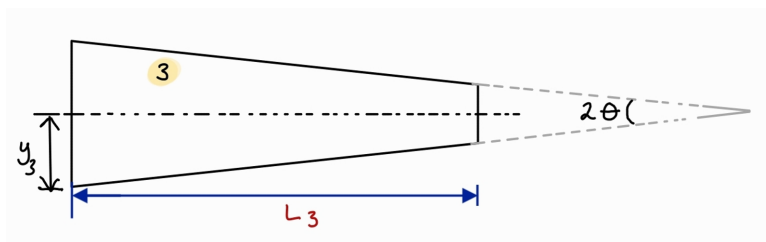
Det finns riktlinjer för testsektionens längd som säger att testsektionens längd ska vara mellan hälften av den hydrauliska diametern D_h och maximalt tre gånger D_h ,

$$0.5 \leq \frac{L_{\text{testsektion}}}{D_h} \leq 3 \quad (2.15)$$

detta eftersom att det tar ungefär halva D_h för att luftströmmen ska hinna bli uniform och för en testsektion på mer än tre gånger D_h så riskerar det att uppstå separation i slutet på sektionen [8].

2.2.5 Diffusor

I diffusorn retarderar luftströmmen nedströms testsektionen och minskar det statiska trycket som byggs upp i kontraktionsmunstycket. Den ökade fluidenarean i diffusorn gör också att fläkten behöver jobba mindre då den större arean gör det lättare för fläkten att transportera luften [11]. Det finns flera teorier kring hur diffusorn ska konstrueras. Enligt Mehta [12] får diffusorns vinkel vara maximalt $2\theta = 4.3^\circ$ för att det ska gå att upprätthålla ett fullt utvecklade flöde utan att behöva någon form utav gränsskiktsskontroll, ofta bestående av nät som förebygger separation från väggarna vid expansionen. Diffusorns längd avgörs sedan av lutningen av väggarna för övergången mellan inlopp och utlopp. Figur 7 visar en skiss över en diffusor.



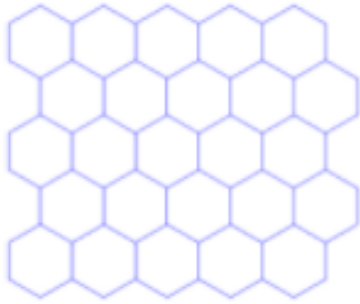
Figur 7: Skiss av diffusor.

2.2.6 Raster

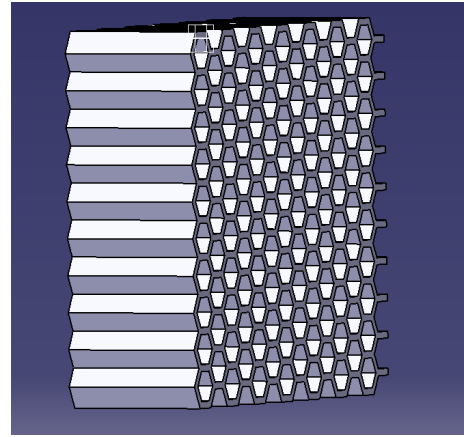
När luft rör sig in till och igenom testsektionen tenderar det att uppstå turbulens i luftströmmarna. För att motverka turbulensen och göra strömmarna mer parallella så används ett så kallat raster. Figur 8 visar tvärsnittet på ett raster med väggar i ett hexagonalt mönster och figur 9 visar en sido-vy. Ett raster används för att minska strömmarnas hastighetsgradienter i radiell-led och istället göra att flödet ut ur rastret är parallellt med vindtunneln [13]. Rastret bör positioneras i början av kontraktionsmunstycket där hastigheterna är lägre, vilket ger lägre förluster jämfört med om det positioneras längre nedströms [9].

Vid konstruktion av ett raster finns det främst tre parametrar som är styrande, längden på filtret L_h , den hydrauliska diametern D_h för varje cell i filtret samt filtrets porositet β_h [6]. β_h definieras enligt

$$\beta_h = \frac{A_{\text{flow}}}{A_{\text{tot}}} \quad (2.16)$$



Figur 8: Raster sett framifrån.



Figur 9: Raster sett från sidan.

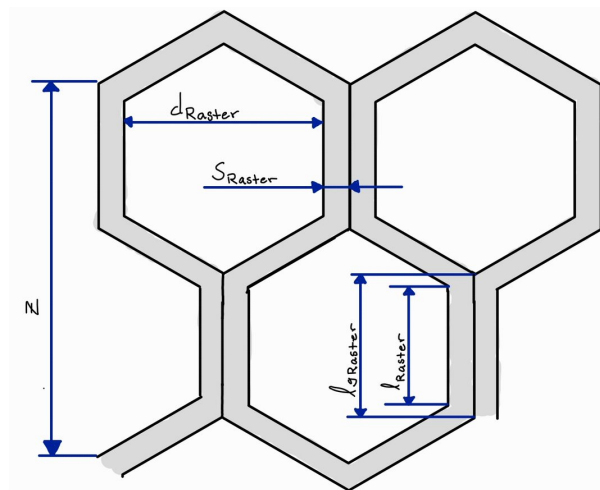
Filtrets porositet är ett mått på hur lätt ett luftflöde tar sig igenom rastret och genom det hur stort tryckfall som bildas. A_{flow} betecknar cellarean, där luftströmmen rör sig fritt, och A_{tot} är den totala arean vid inloppet av munstycket. För ett raster bör porositeten förhålla sig enligt

$$\beta_h \geq 0.8, \quad (2.17)$$

samtidigt som förhållandet mellan cellernas djup och deras hydrauliska diametern bör förhålla sig enligt [14]

$$6 \leq \frac{L_h}{D_h} \leq 8. \quad (2.18)$$

När $\frac{L_h}{D_h} > 8$ ökar turbulensen i rastret. Om istället $\frac{L_h}{D_h} < 6$ minskar rastrets effekt på flödet. Härledningen gjord av Brusca, Lanzafame och Messina [6] används för att beräkna porositeten. Figur 10 visar de olika måtten som behövs för beräkningen av porositet.



Figur 10: Definition av raster-parametrar för areaberäkningar.

Den hydrauliska diametern beräknas med arean för den hexagonala cellen erhållen enligt

$$A_{\text{hex}} = \frac{\sqrt{3}}{2} D^2. \quad (2.19)$$

För att beräkna hur mycket av den totala tvärsnittsarean som blockeras av rasters väggar beräknas tvärsnittsarean för hålet i en cell och divideras med cellens totala tvärsnitt inklusive väggar. Den inre cellväggen ges av

$$l_{\text{raster}} = \frac{d_{\text{raster}}}{2 \sin 60^\circ} \quad (2.20)$$

och den yttre cellväggen ges av

$$l_{\text{g-raster}} = 2 \frac{S_{\text{raster}}}{\tan 60^\circ}. \quad (2.21)$$

Med detta beräknas hela arean som tas upp av rastret genom att sätta in l_{raster} , $l_{\text{g-raster}}$, S_{raster} för att beräkna arean av en cell med hjälp av

$$A_{\text{parallelogram}} = l_{\text{raster}} S_{\text{raster}} \quad (2.22)$$

$$A_{\text{trapets}} = \frac{(l_{\text{raster}} + l_{\text{g-raster}}) S_{\text{raster}}}{2} \quad (2.23)$$

Antalet celler i höjdd n_z ges av

$$n_z = \frac{2y_1}{z} \quad (2.24)$$

och antalet celler i bredd n_b ges av

$$n_b = \frac{2y_1}{\frac{d_{\text{raster}}}{2} + S_{\text{raster}}}. \quad (2.25)$$

Arean som rastret blir då

$$A_{\text{raster}} = 2(A_{\text{parallelogram}} + A_{\text{trapets}}) n_z n_b. \quad (2.26)$$

Den fria arean A_{flow} är den area som rastret inte blockerar, alltså:

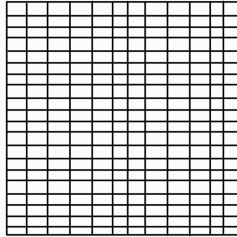
$$A_{\text{flow}} = A_{\text{tot}} - A_{\text{raster}}. \quad (2.27)$$

Slår man ihop ekvation 2.27 med ekvation 2.16 erhålles att

$$\beta_h = \frac{A_{\text{tot}} - A_{\text{raster}}}{A_{\text{tot}}}. \quad (2.28)$$

2.2.7 Nät

Ett raster gör att luftströmmen rör sig parallellt, men det finns troligtvis fortfarande små virvlar kvar efter det att luftströmmen passerat rastret, både på grund av kvarstående virvlar men rastret kommer även generera ytterligare virvlar av mindre storlek. På grund av dessa små virvlarna brukar nät installeras nedströms från rastret. En vanlig konstruktion av nät för vindtunnlar består av ett metallnät, som är flätat till kvadrater eller rektanglar, likt exemplet i figur 11.



Figur 11: Skiss av nät

Nätet används för att göra strömmen mer uniform genom att tillföra en statisk tryckförlust [14]. Analogt med rastret så finns det även riktlinjer för porositet för nät, som säger att β_s ska vara inom spannet givet av ekvation 2.29

$$0.58 \leq \beta_s \leq 0.8 \quad (2.29)$$

där porositet över 0.8 inte ger en väsentligt minskad turbulens och en porositet under 0.58 ger instabila luftströmmar [14]. Nät kan förutom i kontraktionsmunstycket även placeras i diffusorn. För nät i diffusorn rekommenderas det att åtminstone ett nät placeras vid plötsliga vinkeländringar då risken för separation är störst. I de fall som diffusorn har samma vinkel genom hela komponenten så placeras nät med fördel i början av diffusorn [14]. Vid användning av flera nät är det viktigt att avståndet mellan näten är stor nog för att det statistiska trycket ska kunna återhämta sig, vilket visat sig vara ungefär vid $L_{\text{avstånd}} = 2D_{\text{diffusor}}$ [14].

2.2.8 Fläkt

För att skapa ett luftflöde i vindtunneln behövs en tryckskillnad som driver luften genom tunneln. För att skapa denna tryckskillnad kan en fläkt användas. Precis som för de andra ingående delarna till en vindtunnel finns det experimentellt framtagna riktlinjer för fläktens dimensioner. Fläktens area bör förhålla sig till testsektionens area enligt [9]

$$2 \leq \frac{A_{\text{fläkt}}}{A_{\text{testsektion}}} \leq 3. \quad (2.30)$$

För en kvot större än 3 så finns det risk för att det bildas ett oregelbundet luftflöde samtidigt som en kvot mindre än 2 riskerar att förstora vindtunnelns resterande dimensioner vilket resulterar i högre byggkostnader. Fläkten ska även kunna skapa ett tryck som kan kompensera vindtunnelns totala tryckförluster.

2.3 Tryckförluster

I alla reella strömningsmekaniska system uppstår tryckförluster genom olika friktionskrafter och flödesdynamiska effekter, till exempel separation. Vindtunnelns tryckförluster kan beräknas approximativt för varje komponent. Dessa tryckförluster adderas sedan till vindtunnelns totala tryckförluster som är lika med det tryck som fläkten skapar. Vid varje komponent kan tryckförlusten Δp beräknas som det dynamiska trycket vid komponentens inlopp multiplicerat med proportionalitetskonstanten K som är unik för varje komponent [6] enligt

$$K = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho v^2}, \quad (2.31)$$

där ρ är densiteten hos luft och v är vindhastigheten vid komponentens inlopp.

2.3.1 Darcys friktionsfaktor

Vid beräkning av proportionalitetskonstanten K behövs många gånger *Darcys friktionsfaktor* f , som är ett mått på friktionen i en specifik komponent med en specifik yta. *Colebrook-White ekvationen* (2.32) definierar f för turbulenta flöden [15] enligt

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon}{3.7 D_h} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (2.32)$$

där ϵ är den absoluta ytfinheten hos komponentens yta. Approximativa värden för ϵ är 0.05 mm för metall, 0.5 mm för trä och 0.0015 mm för plast [16].

2.3.2 Proportionalitetskonstanter

För komponenter med konstant tvärsnittsarea så som testsektionen ges proportionalitetskonstanten av [17]

$$K_l = f \frac{L}{D_h} \quad (2.33)$$

där L är längden på tunneln. Proportionalitetskonstanten för diffusorn ges av

$$K_d = K_f + K_{\text{exp}}, \quad (2.34)$$

där K_f är proportionalitetskonstanten för tryckförlusten från friktion i diffusorn och K_{exp} är proportionalitetskonstanten för tryckförlusten från expansion i diffusorn [17]. K_f definieras enligt

$$K_f = \left(1 - \frac{1}{A_R^2} \right) \frac{f}{8 \sin(\phi)} \quad (2.35)$$

där $A_R = A_{\text{utlopp}}/A_{\text{inlopp}}$. K_{exp} definieras enligt

$$K_{\text{exp}} = K_e(\phi) \left(\frac{A_R - 1}{A_R} \right), \quad (2.36)$$

och K_e definieras som

$$K_e = 0.1222 + 0.0459\phi + 0.02203\phi^2 + 0.003269\phi^3 - 0.0006145\phi^4 - 0.0000280\phi^5 + 0.00002337\phi^6, \quad (2.37)$$

där ϕ är den ekvivalenta kon-expansionsvinkeln vid övergången mellan testsektionen och diffusorn som definieras

$$\phi = \arctan\left(\frac{1}{2} \frac{\sqrt{A_R - 1}}{L/D_h}\right) \quad (2.38)$$

där L är diffusorns längd [18]. Proportionalitetskonstanten för ett nät ges av

$$K_s = K_{\text{mesh}}(1 - \beta_s) + \frac{(1 - \beta_s)^2}{\beta_s^2}, \quad (2.39)$$

där $K_{\text{mesh}} \approx 1.3$ [18], [19]. Proportionalitetskonstanten för ett raster ges av

$$K_h = \lambda_h \left(\frac{L_h}{D_h} + 3\right) \left(\frac{1}{\beta_h}\right)^2 + \left(\frac{1}{\beta_h} - 1\right)^2 \quad (2.40)$$

där L_h är rasterts djup och λ_h definieras enligt

$$\lambda_h = 0.214 \left(\frac{\epsilon}{D_h}\right)^{0.4}, \quad (2.41)$$

där ϵ återigen är den absoluta ytfinheten hos komponenten. Proportionalitetskonstanten för munstycket ges av

$$K_m = 0.32 f_{\text{av}} \left(\frac{L_m}{D_h}\right), \quad (2.42)$$

där L_m är munstyckets längd och D_h är munstyckets hydrauliska diameter [17]. f_{av} definieras som Darcys friktionsfaktor där Reynoldstalet sätts som medelvärdet mellan dess värde vid inloppet och dess värde vid utloppet enligt

$$Re_{\text{medel}} = \frac{Re_{\text{in}} + Re_{\text{ut}}}{2}, \quad (2.43)$$

där Re_{in} och Re_{ut} är reynoldstalen för munstyckets in- respektive utlopp. Tryckförluster vid vindtunnelns inlopp leder till en proportionalitetskonstant $K_{\text{inlopp}} \approx 0.5$. Vid vindtunnelns utlopp består tryckförlusten av hela det dynamiska trycket vid fläktens utlopp, vilket resulterar i proportionalitetskonstanten $K_{\text{utlopp}} = 1$ [16].

3

Metod

I följande kapitel beskrivs hur vindtunneln med dess komponenter utformades utifrån de experimentellt framtagna data som presenterades under teoriavsnittet. Det beskrivs även hur laborationen tillhörande vindtunnel utformades.

3.1 Konstruktion och tillverkning

Vindtunneln konstruerades enligt de riktlinjer som beskrivs i sektion 2.2 samt de tekniska målen kopplat till vindtunnelns storlek och prestanda. Där påvisades det att vindtunnelns dimensioner i huvudsak styrs av testsektionens tvärsnittsarea, som i sin tur bestämdes av de mätobjekt som undersöks i testsektionen. Ett tekniskt mål för vindtunneln var att testobjekten måste kunna vara 10 cm i bredd, därför valdes höjd och bredd på testsektionens tvärsnitt till 20 cm. Utifrån tumreglerna i sektion 2.2 valdes resterande värden på vindtunnelns dimensioner. Slutligen valdes en fläkt som hade rätt specifikationer för att skapa ett tryck som var högre än vindtunnelns teoretiska tryckförluster. Vindtunnelns inre dimensioner visas i tabell 2. Rastrets och nätens dimensioner visas i tabell 3.

Tabell 2: Vindtunnelns dimensioner.

| Dimension | Längd [m] |
|------------|-----------|
| L_1 | 0.566 |
| L_2 | 0.4 |
| L_3 | 0.822 |
| L | 1.782 |
| y_1 | 0.2828 |
| y_2 | 0.1 |
| y_3 | 0.158 |
| Fläktradie | 0.155 |

3. Metod

Tabell 3: Dimensioner för raster och nät.

| Raster | | Nät | |
|-------------|------------|--------------|------------|
| Dimension | Längd [mm] | Dimension | Längd [mm] |
| Diameter | 4 | Hålbredd | 1.2 |
| Väggjocklek | 0.1 | Hålhöjd | 1.3 |
| Djup | 25 | Tråddiameter | 0.2 |

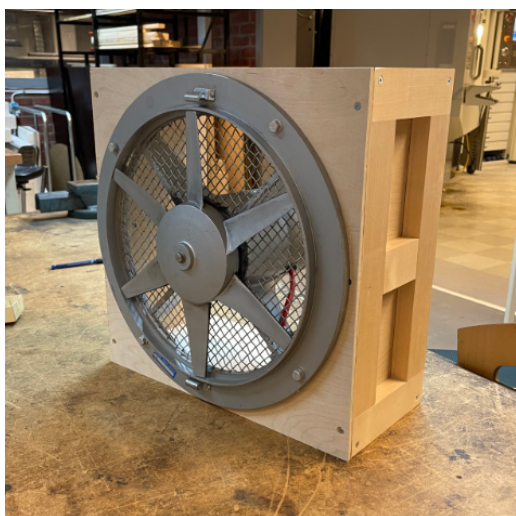
Testsektionen, diffusorn och fläktanordningen, som visas i figur 12, 13 respektive 14, är byggd med björkplywood som väggar och regler av björkträ. Kontraktionsmunstycket i figur 15 3D-printades i tre sektioner i polylaktid (PLA) med en Modix Big-60 V2-V3 3D-skrivare och förstärktes med ramar av björkträ. Samtliga moduler är sammakopplade med excenterlås och gummi-lister för att säkerställa att det sluter tätt i skarvarna mellan modulerna. För att underlätta förvaring av modulerna delades diffusorn på mitten till två separata mindre delar, se figur 13. Hela grunddesignen av vindtunneln visas i figur 16.



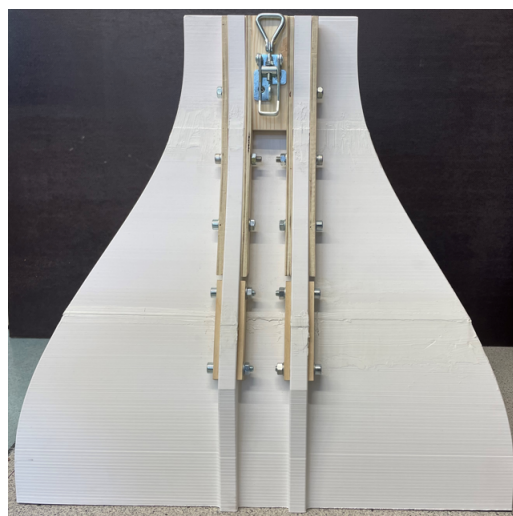
Figur 12: Testsektionen.



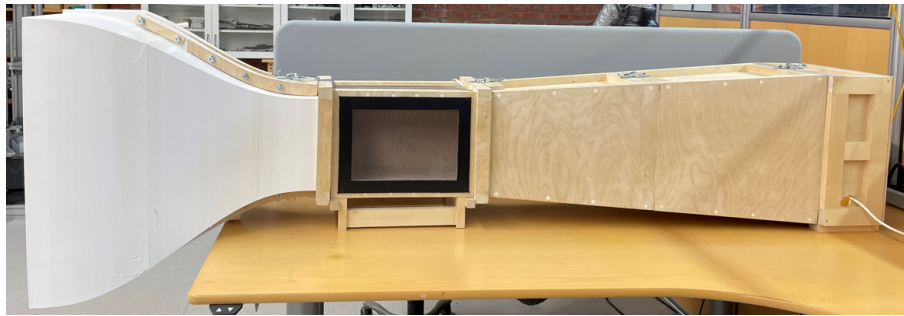
Figur 13: Diffusorn.



Figur 14: Fläkten.

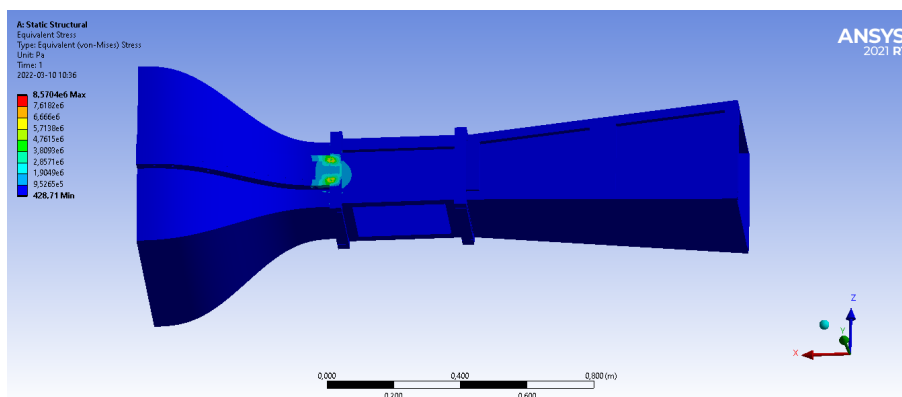


Figur 15: Kontraktionsmunstycket.



Figur 16: Grunddesign av tillverkad vindtunnel.

Innan tillverkningen startades, genomfördes en finitelement-analys (FEA) med programvaran Ansys static-structural, vars resultat visas i figur 17. Detta gjordes för att kontrollera att valda dimensioner för regler och ram var tillräckligt starka för att klara den statiska belastning som uppstår i kopplingarna mellan vindtunnelns komponenter. FEA visar att i detta fall är det vid infästningen mellan kontraktionsmunstycket och testsektionen som den största lasten inträder. Det visades att det inte krävdes en förstärkande ram på fler ställen.



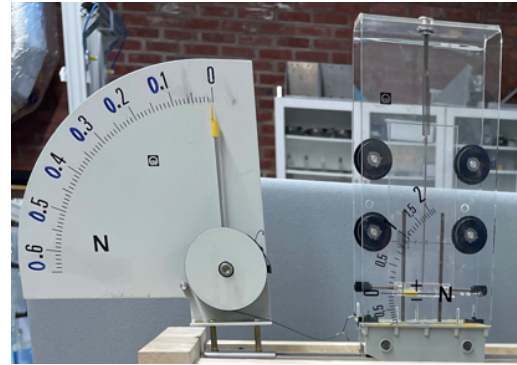
Figur 17: Ansys-analys av drag- och tryckspänningar i strukturen.

Tidigt i byggprocessen prioriterades testsektionen då diffusor, kontraktionsmunstycke samt mätinstrument fästs i denna. Med detta i åtanke var det viktigt att börja med att bygga testsektionen, då de modifieringar som behövde göras kunde hinnas med samtidigt som ett parallellt arbete med övriga delar kunde påbörjas.

På testsektionens ena långsida placerades ett avtagbart fönster i polykarbonat för att kunna observera vingen. Vagnen från föregående laboration återanvändes, vilket krävde att en ny räls till testsektionens ovansida. Rälsen konstruerades av plåt som bockades och fästes i taket på testsektionen. I rälsen fästes även en skiva för avläsning av strömningsmotståndet, vilket visas tillsammans med vagnen i figur 19. Då vagnen skall kunna röra sig i flödesriktningen, i högerled i figur 19, frästes en skåra i taket av testsektionen, som visas med rälsen i figur 18.



Figur 18: Skåra och räls på testsektion.



Figur 19: Mätutrustning.

Mätutrustning för vindhastighet samt kraftverkan på mätobjektet återanvändes från föregående laboration, *Hands-on lab Part 2: Measurements of Forces on a Wing*. En ny ving konstruerades utifrån de tre punkter från projektets tekniska mål som visas i tabell 4.

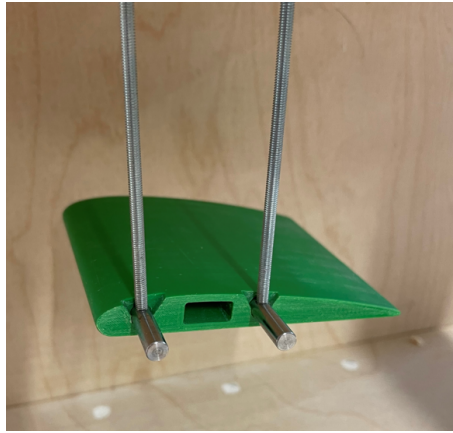
Tabell 4: Utdrag från tekniska mål rörande ving.

| Nr | Tekniska mål |
|----|---|
| 3. | Testobjekt med bredd 10 cm ska kunna testas i tunneln. |
| 8. | Vingen ska tydligt kunna ses utan att blockeras från sidan. |
| 9. | Anfallsvinkeln på vingen skall gå att anpassa utan att öppna testsektionen. |

Först bestämdes vingens dimensioner efter testsektionens storlek. Vingens profil utformas därför till en bredd på 15 cm och en korda på 8.3 cm samt en profil som följer en NACA0015 på ovansidan med en helt platt undersida för att skapa bättre förutsättningar för att öka lyftkraft och minska strömningsmotstånd. Därefter bestämdes hur vingen skulle monteras på mätsystemet. Då mätvagnen har två stänger för att fästa testobjekten, utnyttjas detta genom att låta stängerna kopplas direkt till vingen för att minimera visuella hinder.

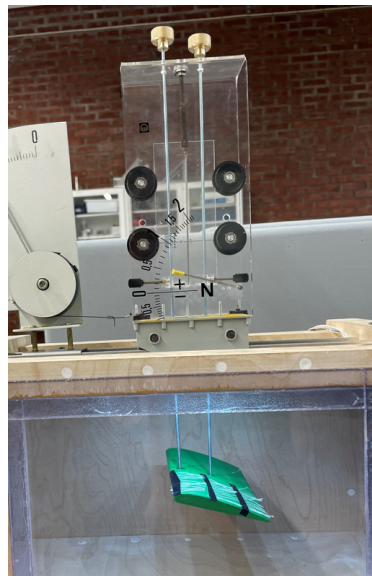
För att kunna reglera vingens anfallsvinkel utformades vingens inre struktur så att två cylindrar kan integreras. Cylindrarna fästs i två stänger, som kopplas till vagnen och möjliggör för att ändra vingens anfallsvinkel. Vingen 3D-printades för att möjliggöra exakt måttsättning av vingens inre och yttre profil. Vingen gjordes i två halvor för att möjliggöra montering av cylindrarna, vilket visas i figur 20. Anfallsvinkeln på vingen justeras genom att den bakre stängen fixeras och samtidigt som den främre stängen justeras i vertikalled. Då stängen höjs ändras även anfallsvinkeln. Anfallsvinkeln indikeras på stängerna med hjälp av märken som motsvarar 5° , 10° , 12.5° , 15° och 20° .

3. Metod



Figur 20: Insida av vinge med cylindrar och kopplade stänger.

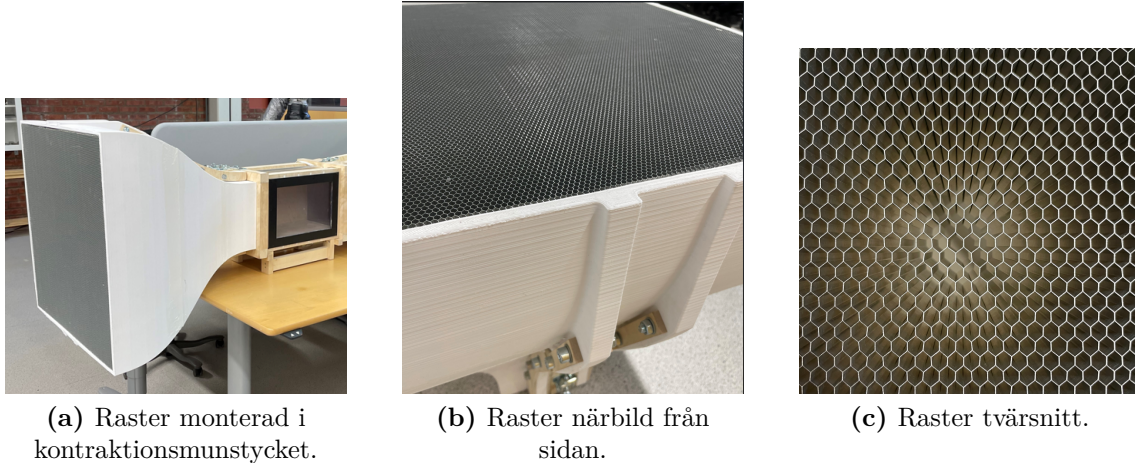
Mätvagnen modifierades för att anfallsvinkeln ska kunna regleras utan att testsektionen öppnas. Stängerna, som fästs i vingen, valdes till en längre typ och två hål borrades i behållarens tak för stängerna att löpa genom till behållarens ovasida. Knoppar i mässing placerades på toppen av stängerna då mätinstrumentet behövde kalibreras med vikter, samt för att ge något att hålla i vid justeringar. I figur 21 visas hur vingen är kopplad till behållaren via stängerna samt hur alla delar förhåller sig till varandra. De svarta skruvar, som går in mot stängerna från sidan, möjliggör fixering av en stång i olika lägen.



Figur 21: Vinge monterad i testsektion.

Ett raster av aluminium placerades i inloppet till kontraktionsmunstycket för att reducera turbulens och öka chansen för ett parallellt luftflöde. Kontraktionsmunstycket utformades med hjälp av det 5:e gradpolynom som är beskrivet i teori under 2.2.3.

Då munstycket 3D-printades i PLA behövdes någon typ av förstärkning för de fästen som skulle fästa till testsektionen. Förstärkning krävs då 3D-printning medför att infästning inte bör göras direkt i plasten. Reglar utformades för att ligga jämt med ytan av munstycket och samtidigt kunna ta upp de krafter som uppkommer.



Figur 22: Raster.

För att förbättra flödeskvaliteten ytterligare placerades ett nät nedströms från testsektionen. Då diffusorvinkeln skapar en tydlig geometriändring placerades nätet i skarven mellan testsektion och diffusorn, enligt figur 23. Diffusorn konstruerades enligt de innermått som presenteras i tabell 2. För att stärka upp konstruktionen fästes balkar längs sidorna. De excenterlås som användes för infästning mellan modulerna fästes i de tvärgående reglarna, visade i figur 13.

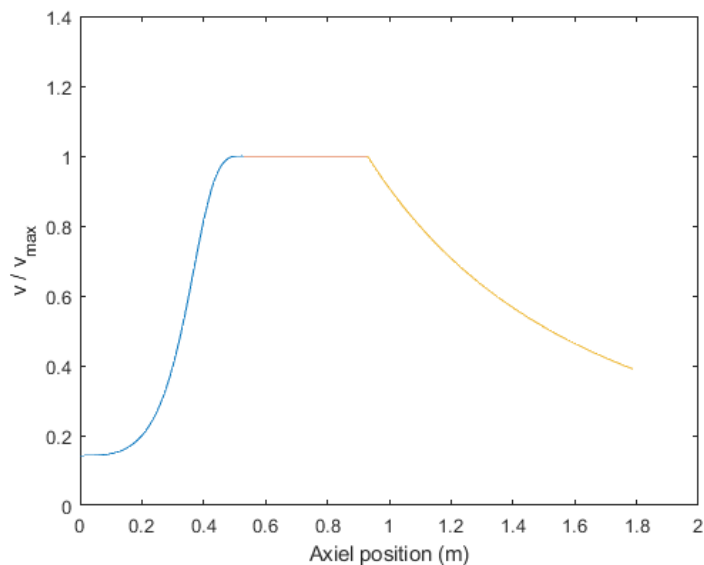


Figur 23: Nät, sett från testsektionen, placerad mellan testsektionen och diffusorn.

Fläkten som används är fläkten från den föregående laborationen, dock krävdes en ny fläktram för att förbättra passformen mot diffusorn. Fläktramen, som visas i figur 14, utformades så att fläkten fixeras, elektroniken skyddas och att diffusorn enkelt kan anslutas.

3.2 Tryckförluster

För att uppskatta tryckförlusterna i vindtunneln beräknades vindhastigheterna över hela tunneln genom att skala flödes hastigheten beroende på tunnelns tvärsnitt enligt ekvation 2.5. Med flödes hastigheterna och den absoluta ytfinheten för de olika komponenterna kunde sedan vindtunnelns tryckförluster beräknas för specifika hastigheter genom testsektionen i enlighet med sektion 2.3. Tryckförlusterna beräknades för en vindhastighet i testsektionen på riktvärdet 10 m/s. De valda dimensionerna resulterade i en profil av luftens hastighet i tunneln enligt figur 24. De teoretiska tryckförlusterna i vindtunneln visas i tabell 5.



Figur 24: Vindhastigheter i vindtunneln.

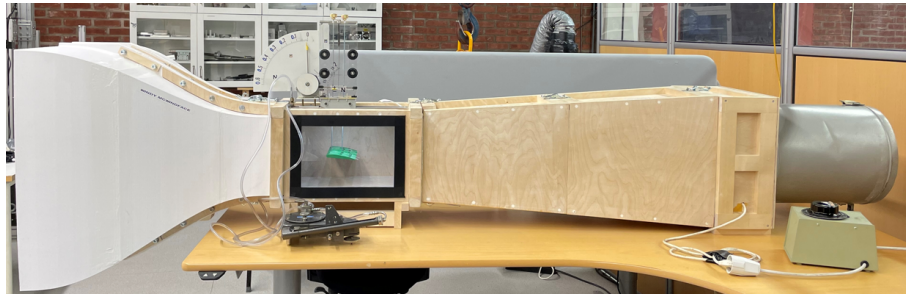
Tabell 5: Vindtunnelns tryckförluster.

| Komponent | Δp [Pa] |
|---------------------------|-----------------|
| Testsektion | 2.1 |
| Diffusor | 4.4 |
| Munstycke | 0 |
| Nät | 27.6 |
| Raster | 0.5 |
| Inlopp | 0.6 |
| Utlopp | 15.3 |
| Total tryckförlust | 50.5 |

De approximativa totala tryckförlusterna på 50.5 pascal var små nog att de flesta axialfläktar med passande standarddiameter klarar att uppnå riktvärdet 10 m/s i vindtunneln [20]. Därför antogs axialfläkten från föregående laboration uppfylla kraven.

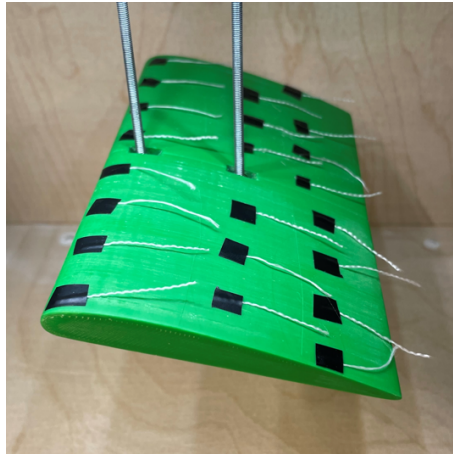
3.3 Laboration

Laborationsstationen ändrades från en öppen till en stängd testsektion. Stationen ser ut som i figur 25. Ett pitot-rör placerades i testsektionens främre kant, riktat mot flödesriktningen för att mäta vindhastigheten i testsektionen. För att reglera vindhastigheten används ett effektreglage kopplat till fläkten. För att vindtunneln ska anses att vara säker för studenter och laborationshandledare att använda, placeras ett skydd framför fläkten som förhindrar direktkontakt.



Figur 25: Laborationsstationen med all tillhörande utrustning.

För att visualisera flödet kring vingen fästs tafsar på vingens ovansida, som visas i figur 26. För att öka laboranternas förståelse av hur flöden interagerar med vingen, ska studenterna beskriva hur tafsarna beter sig vid olika anfallsvinklar. Lyftkraft och strömningsmotstånd på vingen ska även mätas för att kunna beräkna relationen $\frac{C_L}{C_D}$. Studenterna bör utifrån det de har observerat och beräknat kunna redogöra för vad som händer vid överstegring.



Figur 26: Vinge med tafsar placerade på dess ovansida.

4

Resultat och diskussion

I följande kapitel presenteras och diskuteras resultatet med de tekniska målen som utgångspunkt samt den tidigare forskning om vindtunnel-konstruktion som presenterats i delkapitel 2.2.

4.1 Konstruktion

Detta delkapitel är ämnat för att beskriva det slutgiltiga resultatet av vindtunnels konstruktion. Vilket inkluderar vindtunnels funktionsmässiga konstruktion samt empirisk information samlad kring vindtunneln och dess olika moduler.

4.1.1 Nuvarande vindtunnel

Den sammansatta vindtunneln tillsammans med dess mätutrustning visas i figur 25. Av vindtunnels olika delar är testsektionen av störst intresse, eftersom den ensam är kopplad till två tekniska mål. Testsektionens inre bredd mäts till 20 cm, vilket innebär att kravet på att testobjekt ska kunna ha en bredd på 10 cm är uppfyllt. Den nya vingen tillsammans med den modifierade mätutrustningen gör att kravet på att anfallsvinkeln kan ändras utan att öppna testsektionen och kravet att vingen är synlig från sidan är uppnådda.

Vikt och dimensioner för vindtunnels olika moduler presenteras i tabell 6. Vindtunnels längd i sin ihopsatta form blev 234 cm, vilket inte uppfyller kravet att vindtunnels totallängd måste vara under 210 cm. Utan fläktskyddet är vindtunnels längd 201 cm, vilket ger möjlighet till att göra vindtunneln kortare genom att byta ut skyddet. Den tyngsta komponenten väger 7.4 kg och därför är kravet att alla komponenter skall väga under 10 kg uppfyllt.

Tabell 6: Dimensioner och vikter för enskilda moduler.

| Modul | Längd [cm] | Höjd [cm] | Djup [cm] | Vikt [kg] |
|----------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| Munstycke | 57 | 59 | 59 | 7.0 |
| Testsektion | 42 | 36 | 26 | 4.6 |
| Diffusor liten | 42 | 36 | 27 | 3.0 |
| Diffusor stor | 42 | 39 | 33 | 3.1 |
| Fläkt | 21 | 41 | 39 | 7.4 |

Genom test visades det möjligt att en person själv klarade av att montera hela vindtunneln utan hjälp från andra. Det testades även att placera alla moduler på ett hyllplan med djup 60 cm, se figur 27, i figuren syns tydligt att alla moduler klarade detta krav.



Figur 27: Vindtunnelns alla moduler placerade i hylla

4.1.2 Kontroll av vindtunnelns dimensioner utifrån teori

Följande delkapitel behandlar huruvida varje enskild komponent följer den teori som presenterats i kapitel 2.2. Tabell 7 visar relationer, ekvationsnummer, resulterande värden och riktvärden för de olika delarna.

Kontraktionsmunstycket har vid inloppet en area $A_{\text{inlopp}} = 0.32 \text{ m}^2$ och vid utloppet $A_{\text{utlopp}} = 0.04 \text{ m}^2$, som ger kvoten $\frac{A_{\text{inlopp}}}{A_{\text{utlopp}}} = 8$, vilket uppfyller riktvärdet som ligger mellan 6 och 10. Längdförhållandet för kontraktionsmunstycket är också tillgodosett med $\frac{L_1}{2y_1} = 1.007$ vilket ligger nära riktvärdet 1. Relationen mellan testsektionens längd och hydrauliska diameter ($\frac{L_2}{D_h}$) blev 1.7725, där D_h beräknar enligt ekvation 2.9. Riktvärdet för denna relation, visas i tabell 7, vilket testsektionen uppfyller.

Kvoten mellan fläktens tvärsnittsarea och testsektionens tvärsnittsarea med riktvärde mellan 2 och 3 är inte uppfyllt för projektet då kvoten blir $\frac{A_{\text{fläkt}}}{A_{\text{testsektion}}} = 1.889$ vilket är något lägre än det rekommenderade. Risken med en kvot mindre än 2 är, som nämnt i kapitel 2.2, att vindtunnelns övriga dimensioner skulle vara för stora och därmed skulle vindtunnel bli mer kostsam. För projektets situation, där det redan fanns en fläkt att använda, skulle det bli betydligt mer kostsamt både ekonomiskt och tidsmässigt att köpa in en ny fläkt. Fläkten från den föregående

Tabell 7: Vindtunnelns slut- och riktvärden.

| Del | Ekvation | Relation | Slutvärde | Riktvärde |
|-----------------------|----------|-------------------------------------|-----------|------------------------|
| Kontraktionsmunstycke | 2.13 [6] | $\frac{A_{inlopp}}{A_{utlopp}}$ | 8 | $6 \leq x \leq 10$ |
| Kontraktionsmunstycke | 2.14 [6] | $\frac{L_1}{2y_1}$ | 1.007 | ≈ 1 |
| Testsektion | 2.15 [8] | $\frac{L_2}{D_h}$ | 1.7725 | $0.5 \leq x \leq 3$ |
| Fläkt | 2.30 [6] | $\frac{A_{fläkt}}{A_{testsektion}}$ | 1.889 | $2 \leq x \leq 3$ |
| Diffusor | - [12] | 2θ | 8° | $x \leq 4.3^\circ$ |
| Raster | 2.17 [6] | $\frac{A_{fföde}}{A_{totalt}}$ | 0.9048 | $x \geq 0.8$ |
| Raster | 2.18 [6] | $\frac{L_h}{D_h}$ | 5.952 | $6 \leq x \leq 8$ |
| Nät | 2.29 [6] | $\frac{A_{fföde}}{A_{totalt}}$ | 0.7432 | $0.58 \leq x \leq 0.8$ |

laborationen hade rätt dimensioner för att kunna installeras i slutet av diffusorn och var tillräckligt stark för ge önskat luftflöde. Av denna anledning ansågs det vara klokt att återanvända denna fläkt.

Diffusorn har riktvärdet 4.3° i lutning mellan två motstående väggar. Detta värde gäller när det inte finns någon gränsskiktsskontroll som motverkar separation. Den diffusor som byggts har en vinkel på 8° och följer alltså inte riktvärdet. Valet av denna vinkeln gjordes för att diffusorn inte ska bli för lång och samtidigt kunna användas till fläkten. Problemet med en för brant lutning är som nämnt i kapitel 2.2 att det är svårt att upprätthålla ett fullt utvecklat flöde, samt att risken för separation ökar. Detta går dock att kontrollera med hjälp av nät och det ansågs därför inte vara något problem att överstiga riktvärdet.

Rastret uppfyller riktvärdet för porositeten $\frac{A_{fföde}}{A_{totalt}} > 0.8$ då det slutliga värdet för porositeten blev 0.9048. Relationen mellan längden och hydrauliska diametern för varje cell i rastret presenterad i ekvation 2.18 har riktvärden mellan 6 och 8 och det raster som används hamnar på 5.952 och bedöms vara tillräckligt nära det rekommenderade. Det nät som används i vindtunneln har en porositet på 0.7432 och uppfyller därmed riktvärdet för porositetet som ligger mellan 0.58 och 0.8.

4.2 Luftflöde

Huruvida ett godkänt luftflöde i vindtunneln är uppnått bedöms utifrån att luftflödet ska vara parallellt och flödeshastigheten ska kunna regleras. Eftersom hastigheten går att reglera genom att minska och öka effekten till fläkten är det tekniska målet för reglerbar hastighet uppfyllt.

Huruvida luftflödet i testsektionen är parallellt är inte helt enkelt att avgöra med säkerhet, men ett par tester har gjorts. Det första testet gjordes genom att fästa en sytråd inne i kontraktionsmunstycket för att visa eventuella fluktuationer i flödet. Om tråden gör större rörelser eller står och slår bör detta tolkas som att flödet är turbulent. Detta var dock inte fallet vilket visas i figur 28. I figuren är hela tråden skarp, utan rörelseoskärpa, något den inte hade varit om flödet fluktuerat eller om tråden gjorde stora rörelser, vilket antyder att luftflödet är parallellt. Även då flödet



Figur 28: Test av parallellt flöde i testsektion.

uppfattas som parallellt uppstår troligtvis små virvlar i testsektionen. Med största sannolikhet kommer mängden med små virvlar vara ungefär samma varje gång och blir därför försumbara, då det inte påverkar målet för konsekventa mätdata.

Det andra testet som gjordes var att föra ett pitotrör upp och ner i mitten av testsektionen och mäta hastighetsvariationer. I samtliga tester var hastigheten runt 12.2 m/s i mitten och varierade inte märkbart när pitotröret fördes upp och ner i testsektionen. Testet av hastighetsvariationer gjordes fem gånger och samtliga försök gav likadana resultat med maxhastigheter mellan 12 till 12.3 m/s vilket indikerar att det enbart är en avvikelse inom 2.5 %. Med tanke på hur luftflödet beter sig i testsektionen och att regleringen av hastigheten fungerar konsekvent bör luftflödet vara adekvat för vindtunnelns ändamål.

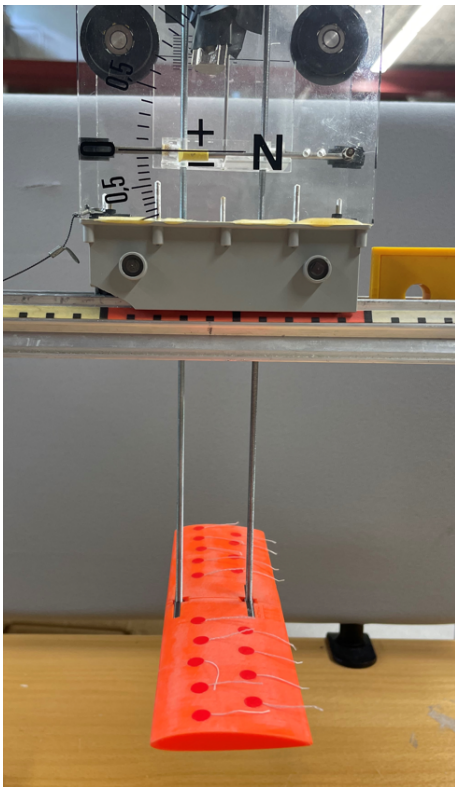
4.3 Laboration

Det kanske viktigaste tekniska målet som är kopplat till laborationen är att vindtunneln ska vara säker att hanteras av studenter och laborationshandledare. Vid användning skyddas användaren från fläkten med hjälp av ett skydd, därmed blev vindtunneln säker att använda.

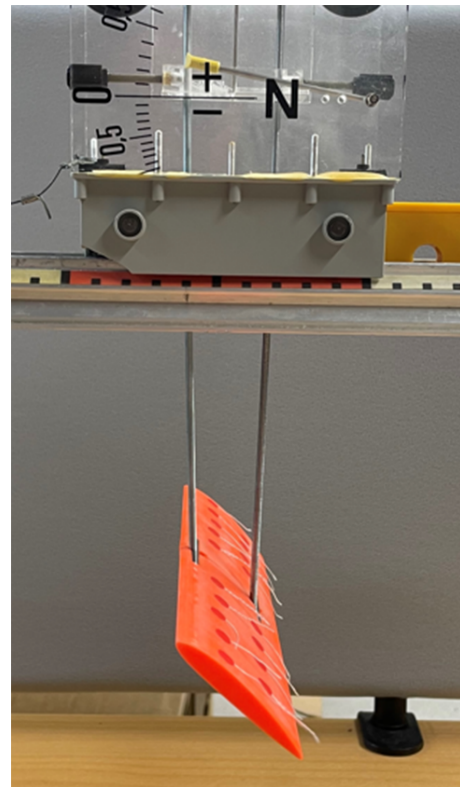
För att laborationen ska gå att genomföra behöver mätningarna vara repeterbara för att det ska kunna bedömas om studenterna har gjort rätt. Vindtunneln i sig bör ha alla förutsättningar för att ge repeterbara resultat eftersom den har ett konsekvent luftflöde. Däremot uppstår det vissa problem med mätinstrumentet som ska mäta lyft. Vid samtliga tester för mätning av lyft vid olika anfallsvinklar på vingen så fallerar mätdata och de visade resultaten är felaktiga. Då vingen överstegrar samt

vid ytterligare ökning av anfallsvinkel minskar inte utslagen på lyftmätaren. Strömningssmotståndet ökar väsentligt, vilket är förväntat, men att lyftkraften skulle vara den samma oavsett anfallsvinkel på vingen är felaktigt. Felkällan är inte bekräftad med säkerhet men flera hypoteser om vad som orsakar de felaktiga mätresultaten finns.

Den första hypotesen är att de vingprofiler som används är för stora och tar upp för stor del av testsektionens tvärsnitt. Därför tillverkades ett par mindre vingar. Då mätinstrumentet är till för en större vinge var utslagen för lyftkraft och strömningssmotstånd så små att signifikanta resultat uteblev och därför kan det inte bekräftas att det är vingen som är problemet. Den andra hypotesen är att när vinkeln på vingen justeras från annordningen så ökar också friktionen kring stängerna vid branta lutningar, detta visas i figur 29.



(a) Vinge med anfallsvinkel 0° .



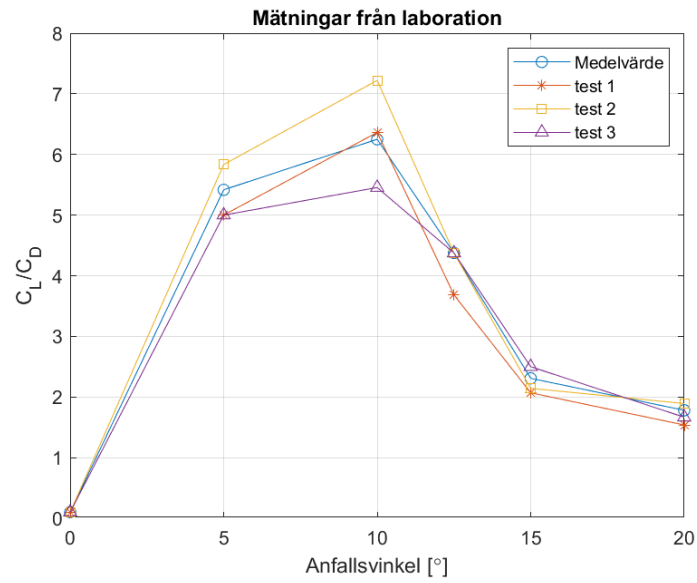
(b) Vinge med hög anfallsvinkel.

Figur 29: Vinge i olika anfallsvinklar.

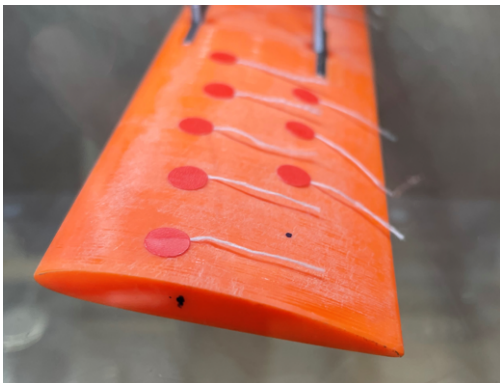
Det som bör noteras i figur 29 är att när anfallsvinkeln höjs så förs stängerna ihop något och pressar därför mot vagnen. Den extra friktion som det medför kan vara anledningen till att den förväntade minskning av lyftkraft inte visas på mätaren. För att testa om det är anledningen hade en ny utformning av vingens infästning behövts. Detta är något som inte gjordes på grund av projektets begränsade tidsplan.

Den nya laborationens första del går ut på att mäta relationen mellan lyftkraft- och strömningsmotståndskoefficienterna vid olika anfallsvinklar. Detta visar tydligt att strömningsmotståndet ökar även om lyftkraften är konstant. I figur 30 visas resultatet från tre mätningar av $\frac{C_L}{C_D}$ där vingen från laborationen används, vilken visar ett optimalt förhållande vid 10° . Detta är även i enlighet med föregående laboration. Laborationens andra del behandlar hur luftströmmen rör sig runt vingen vid de olika anfallsvinklarna, vilket visas i figur 31. Där syns det tydligt när vingen når överstegring och tafsarna går från att vara utsträckta (figur 31a) till att röra sig kaotiskt över vingen på grund av separation som sker på vingens ovansida (figur 31b). Den kaotiska rörelsen kan bekräftas av att tafsarna blir delvis suddiga på bild istället för skarpa över hela tafsarna, som de hade varit om de inte rörde sig när bilden togs.

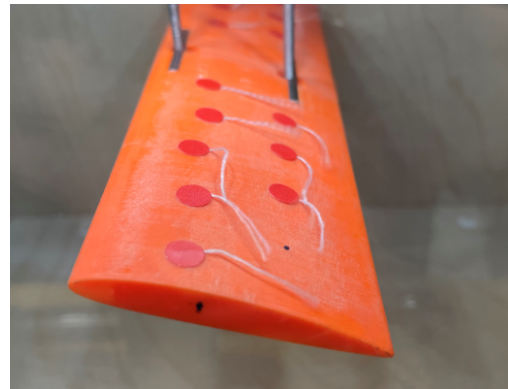
4. Resultat och diskussion



Figur 30: $\frac{C_L}{C_D}$ för anfallsvinklarna 5°, 10°, 12.5°, 15° och 20° vid tre separata tillfällen.



(a) Vingen innan överstegring, tafsarna följer luftflödet längs vingen.



(b) Vingen vid överstegring, tafsarna visar separation och turbulens.

Figur 31: Visualisering av överstegring under laborationen.

5

Slutsats

I följande kapitel diskuteras de resultat som projektet frambringat samt de felkällor och osäkerheter som kan antas påverka dessa resultat. Som avslutning presenteras även förslag för vidareutveckling av vindtunneln och tillhörande laboration.

5.1 Reflektion kring resultatet

Eftersom luftflödet var parallellt så dras slutsatsen att det är möjligt att konstruera en väl fungerande vindtunnel utifrån allmänna tumregler framtagna av tidigare studier och som är liten nog att få plats på ett normalt bord. Detta kunde dessutom göras till stor del för hand med de relativt enkla medel man finner i en trä- och metallverkstad ämnad för studenter. Dock bör det tilläggas att mer precisa tillverkningsmetoder hade varit att föredra, då detta hade kunnat minimera de skevheter i komponenter och kopplingar som lätt kan uppstå vid tillverkning för hand. Även andra materialval, till exempel plåt, hade kunnat förbättra den resulterade vindtunneln genom minskad friktion och ökad hållfasthet.

Den resulterande vindtunnelns egenskaper möter nästan samtliga tekniska mål den konstruerades för. Vindtunnelns totallängd överstiger 210 cm, dock med fläktskyddet monterat. För att vindtunnelns totallängd ska understiga 210 cm så måste fläktskyddet bytas ut. Vindtunnelns komponenter väger alla under 10 kg, vilket är en bidragande faktor till att den resulterande vindtunneln kan monteras av en ensam person. Genom monteringen av fläktskyddet från föregående laboration blev även vindtunneln säker att hantera av både studenter och handledare. Fläkten skapar en vindhastighet på över 10 m/s i vindtunnelns testsektion som är reglerbar. Testsektionen är också stor nog att ta emot objekt med en bredd på 10 cm. Vindtunneln uppnår även målet att alla delar ska gå att placeras på ett hyllplan med djup 60 cm.

Vindtunneln och dess kringutrustning möter dock inte alla tekniska mål gällande den föregående laborationen. De mål som uppfylldes var att vingen tydligt kan ses från ett sidoperspektiv, och att dess anfallsvinkel kan ändras utan att öppna testsektionen. Men det fel som uppstår då vingen ställs i höga anfallsvinklar gör att ett moment i den föregående laborationen inte kan genomföras, då mätresultaten för vingens lyftkraft inte minskar efter att överstegring bör inträffa. Detta gör att även om det tekniska målet att mätresultaten på vingen ska vara repeterbara är uppfyllt, så är mätresultaten felaktiga. Däremot kan den nya laborationen genomföras i sin

helhet, då principerna som åskådliggörs i denna inte påverkas i någon betydande utsträckning av det fel som uppstår vid höga anfallsvinklar.

Sammanfattningsvis är vindtunneln väl fungerande och uppfyller de krav som ställs. Den nya laborationen har ändrats till att fokusera mer på hur luftflöden beter sig och går att upprepa med konsekventa resultat. Detta ger fler infallsvinklar till strömningsmekaniska beteenden kring vingen och bör därmed bidra till ökad förståelse hos studenterna. Rekommendationen blir därför att ersätta den tidigare laborationen med den nya.

5.2 Vidareutveckling

Ytterligare förbättringar av vindtunneln och tillhörande laboration skulle kunna vara att digitalisera all mätutrustning i tunneln, det vill säga mätutrustning för vindhastighet och kraftverkan på testobjektet. Förslagsvis skulle vindhastigheten kunna mätas med hjälp av en differentialtryckmätare kopplad till en arduino-dator. Krafter på mätobjekten skulle kunna mätas med lastceller kopplade till arduinon. Mätutrustningen skulle även kunna modifieras för att ta emot fler olika mätobjekt. Digitaliseringen öppnar även upp för möjligheten att på ett smidigt sätt spara data för att jämföra med till exempel en CFD-simulering.

Med ny mätutrustning skulle även problematiken kring lyftkrafter eventuellt gå att lösa då hela konstruktionen för hur vingen är kopplad till mätinstrumentet ändras. Friktionen som uppstår i samband med den mekaniskt uppmätta lyftkraften kan då uteslutas helt om problemet skulle kvarstå. Det skulle också gå att mäta lyftkraft och strömningsmotstånd på de mindre vingarna med känsligare mätinstrument, vilket diskuterades i sektion 4.3.

Vidare finns det möjlighet att installera en rökannordning i vindtunneln. Det hade gett möjlighet till att tydligare visualisera luftströmmar vid kontakt med vingen och möjliggjort ytterligare säkerställning av luftflödets parallellitet.

Samtliga utvecklingsförslag bör ge ännu bättre förutsättningar till en ökad förståelse hos studenterna.

Litteraturförteckning

- [1] F. M. White. “Integral Relations for a Control Volume”, *Fluid Mechanics*, 8th ed, USA: McGraw-Hill Professional, 2016, ch. 3 pp. 119-170.
- [2] F. M. White, “Compressible Flow”, *Fluid Mechanics*, 8th ed, USA: McGraw-Hill Professional, 2016, ch. 9, pp. 539-620.
- [3] F. M. White, “Flow Past Immersed Bodies”, *Fluid Mechanics*, 8th ed, USA: McGraw-Hill Professional, 2016, ch. 7, pp. 407-454.
- [4] F. M. White. “Integral Relations for a Control Volume”, *Fluid Mechanics*, 8th ed, USA: McGraw-Hill Professional, 2016, ch. 3 pp. 3-53.
- [5] S. Ristić, “Flow Visualisation Techniques in Wind Tunnels part I – Non optical Methods”, *Scientific Technical Review*, vol. 57, no. 1, pp. 39-49, Jan, 2007.
- [6] S. Brusca, R. Lanzafame, M. Messina, “Design and build”, *Low-speed wind tunnel*, USA: Nova Science Publishers Inc., 2011, ch. 7, pp. 189-220.
- [7] M. Ismail, R. Alnouti, Y. Matter, U. KC, M. Mufflehi, “Minimal Portable Wind Tunnel for Engineering Education”, *2020 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, pp. 1-5, Feb, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/ASET48392.2020.9118351>.
- [8] J. B. Barlow, W. H. Rae Jr, A. Pope, “Wind tunnels”, *Low Speed Wind Tunnel Testing*, 3rd ed, USA: John Wiley & sons, 1999, ch. 2, pp. 19-57.
- [9] J. H. Bell, R. D. Mehta, “Contraction Design for Small Low-Speed Windtunnels”, NASA, USA, Rep. 177488, 1988.
- [10] J. B. Barlow, W. H. Rae Jr, A. Pope, “Wind tunnels”, *Low Speed Wind Tunnel Testing*, 3rd ed, USA: John Wiley & sons, 1999, ch. 3, pp. 61-132.
- [11] L. Cattafesta, C. Bahr, J. Mathew, “Fundamentals of Wind-Tunnel Design”, *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, USA: John Wiley & Sons, 2010, doi: <https://doi.org/10.1002/9780470686652.eae532>.
- [12] R. D. Mehta, “The aerodynamic design of blower tunnels with wide-angle diffusers”, *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 18, pp. 59-120, 1979, doi: [https://doi.org/10.1016/0376-0421\(77\)90003-3](https://doi.org/10.1016/0376-0421(77)90003-3).
- [13] L. Prandtl, “Attaining a Steady Air Stream in Windtunnels”, NACA, no. 726, 1975, Hämtad: 2022-05-09. [online]. Tillgänglig: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19930094691/downloads/19930094691.pdf>
- [14] R. D. Mehta, P. Bradshaw, “Design rules for small low speed wind tunnels”, *The Aeronautical Journal*, vol. 83, no. 827, pp. 443-453, Nov, 1979, doi: <https://doi.org/10.1017/S0001924000031985>.
- [15] C. F. Colebrook, C. M. White, “Experiments with Fluid Friction in Roughened Pipes”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mat-*

- hemical and Physical Sciences*, vol. 161, no. 906, pp. 367–381, Aug, 1937, doi:10.1098/rspa.1937.0150.
- [16] F. M. White. “Viscous Flow in Ducts”, *Fluid Mechanics*, 8th ed, USA: McGraw-Hill Professional, 2016, ch. 6, pp. 307-382.
- [17] Wattendorf F. L. Factors Influencing the Energy Ratio of Return Flow Wind Tunnels”, *Fifth International Congress for Applied Mechanics*, Cambridge, September 12-16, 1938.
- [18] W. Eckert, K. W. Mort, J. Jope, “Aerodynamic Design Guidelines and Computer Program for Estimation of Subsonic Wind Tunnel Performance”, *NASA*, USA, Rep. TN D-8243, 1976.
- [19] I. E. Idel’chick, “Handbook of Hydraulic Resistance; The Israel Program for Scientific”, Translation, Tel Aviv, Rep. AEC-TR-6630, 1966.
- [20] Ventur, “COMPACT TCBB/TCBT”, *Ventur*, 2022. [Online]. Tillgänglig: https://ventur.se/download/product_card/en_tcbb_tcbt.pdf. [Hämtad: Maj. 10, 2022].

A

Föregående Laboration

| | | |
|--|---------------------------------------|--|
| | Lab form Fluid Mechanics MTF053 | Group: Name: Date: Assistant: |
|--|---------------------------------------|--|

Introduction

The lab session is divided into three parts:

Part 1: Drag Measurements

Part 2: Measurements of Forces on a Wing Profile

Part 3: Pressure Measurements

The fluid flow velocity is estimated with a Prandtl tube. The pressure difference between the total pressure, p_0 , and the static pressure, p , is estimated with an alcohol manometer. To increase the accuracy when measuring low pressure differences, the manometer scaled tube is inclined. With the tube-incline used in the lab we get the following value:

$$k = 0.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

Observe that the density of the alcohol and the incline of the scaled tube is included in the k -factor!

OBS: Read the instructions for the different parts!

The instructions are for your own sake.

**Do not make any adjustments of the manometers.
Ask the assistants for help if you think there is a need for adjustments.**

Part 2: Measurements of Forces on a Wing Profile

(Chord length: $L = 4.6$ cm, Wingspan: $b = 18$ cm)

Task:

- Determine C_L , C_D , and C_L/C_D for the wing profile at different angles of attack.
- Sketch C_L , C_D , and C_L/C_D in the graph (next page)
- Which angle is the best glide angle?
- When do stall occur?
- What happens at stall?

Measurements

$$A = b \cdot L = 8.28 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}, \quad C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

Use the nozzle with diameter:

18 cm

Desired manometer reading:

130 mm

k -factor for the manometer:

$$k = 0.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta p = kgh$$

h = manometer reading

Monometer initial value:

$$h_0 = \quad \text{mm}$$

True manometer reading:

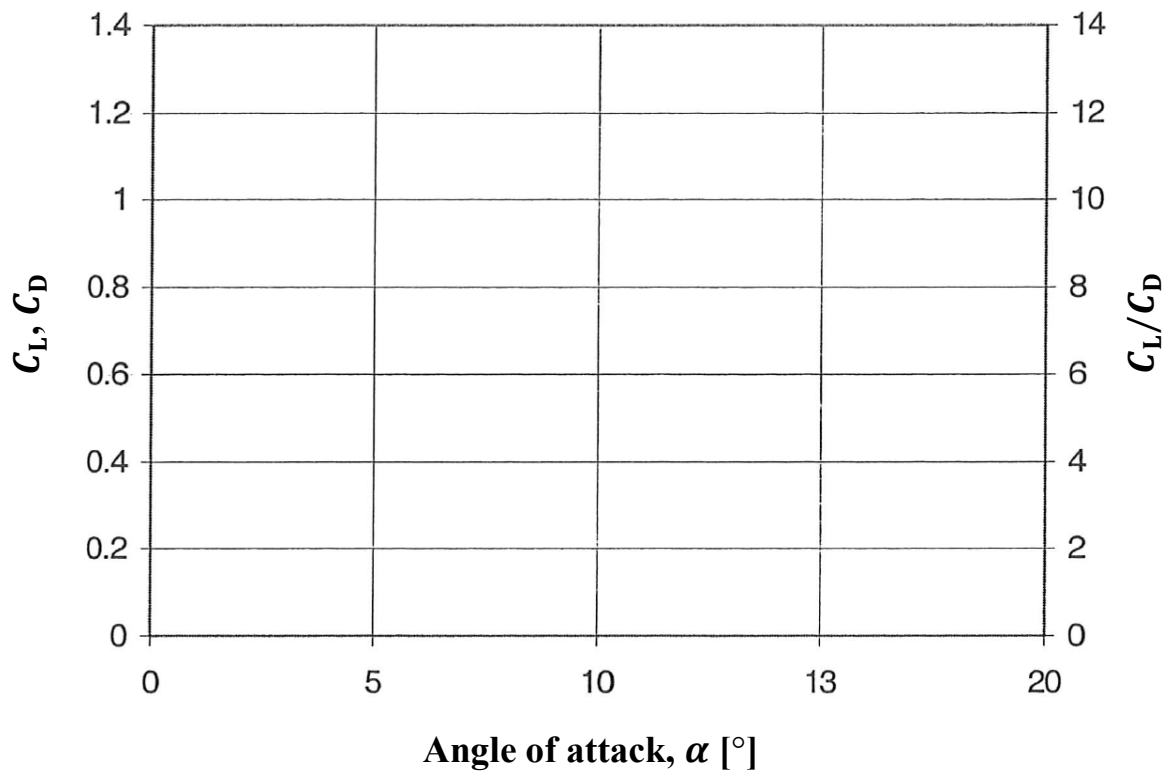
$$h_T = \quad \text{mm}$$

Estimated velocity:

$$V = \quad \text{m/s}$$

$$Re = \frac{VL}{\nu} =$$

| Angle of attack α [°] | Drag force F_D [N] | Drag coeff. C_D | Lift force F_L [N] | Lift coeff. C_L | Lift-to-drag ratio C_L/C_D |
|---------------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|------------------------------------|
| 0 | | | | | |
| 5 | | | | | |
| 10 | | | | | |
| 13 | | | | | |
| 20 | | | | | |



B

Ny Laboration

| | | |
|--|---|--|
| | Lab form Fluid Mechanics MTF053 | Group: Name: Date: Assistant: |
|--|---|--|

Introduction

The lab session is divided into three parts:

Part 1: Drag Measurements

Part 2: Measurements and observations of flow over a Wing Profile

Part 3: Pressure Measurements

The fluid flow velocity is estimated with a Prandtl tube. The pressure difference between the total pressure, p_0 , and the static pressure, p , is estimated with an alcohol manometer. To increase the accuracy when measuring low pressure differences, the manometer scaled tube is inclined. With the tube-incline used in the lab we get the following value:

$$k = 0.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

Observe that the density of the alcohol and the incline of the scaled tube is included in the k -factor!

OBS: Read the instructions for the different parts!

The instructions are for your own sake.

**Do not make any adjustments of the manometers.
Ask the assistants for help if you think there is a need for adjustments.**

Part 2: Measurements and observations of flow over a Wing Profile

Chord length: $L = 6$ cm, Wingspan: 18 cm

Task:

- Discuss how the tufts behave for the different angles of attack.
- Determine C_L , C_D , and C_L/C_D for the wing profile at different angles of attack.
- Sketch C_L/C_D in the graph (next page)
- Which angle is the best glide angle?
- When do stall occur?
- What happens at stall? This answer should be motivated by your observations of the tufts.

Measurements

$$A = b \cdot L = 10.08 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}, \quad C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

Use the wind tunnel:

Desired manometer reading:

90 mm

k -factor for the manometer:

$$k = 0.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta p = kgh$$

h = manometer reading

Monometer initial value:

$$h_0 = \quad \text{mm}$$

True manometer reading:

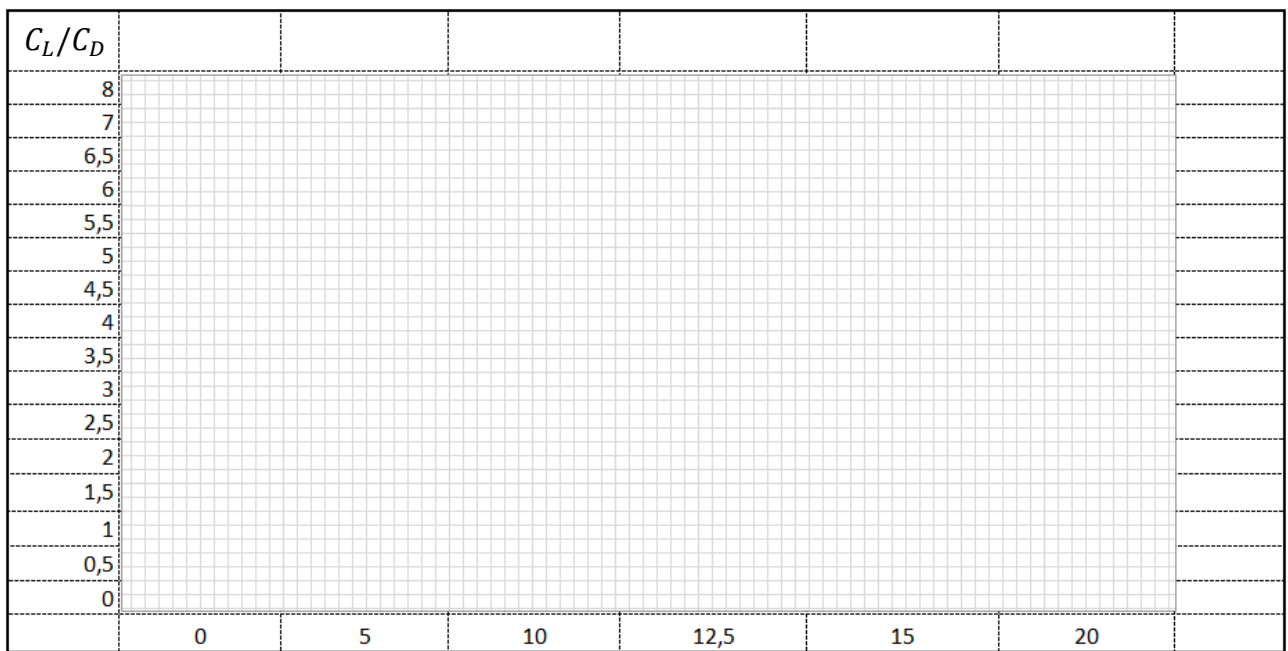
$$h_T = \quad \text{mm}$$

Estimated velocity:

$$V = \quad \text{m/s}$$

$$Re = \frac{VL}{\nu} =$$

| Angle of attack α [°] | Drag force F_D [N] | Drag coeff. C_D | Lift force F_L [N] | Lift coeff. C_L | Lift-to-drag ratio C_L/C_D |
|---------------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|------------------------------------|
| 0 | | | | | |
| 5 | | | | | |
| 10 | | | | | |
| 12.5 | | | | | |
| 15 | | | | | |
| 20 | | | | | |



Angle of attack, [°]

Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige
www.chalmers.se



CHALMERS