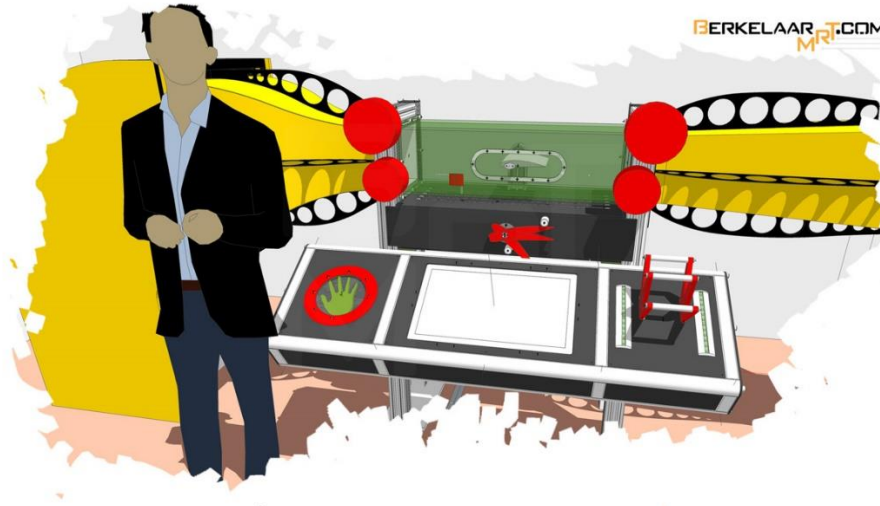


Demo Windtunnel



Tijdens deze middag maak je op een leuke en afwisselende manier kennis met windtunnelonderzoek. We starten met een theoretisch deel waarin de algemene onderwerpen in de aerodynamica worden aangesneden. Ook zal je een globaal beeld krijgen over hoe een windtunnel werkt en gebruikt kan worden voor experimentele doeleinden. Hierna zullen we de windtunnel aanzetten en de natuurkundige verschijnselen proberen waar te nemen. Zo krijg je een beeld over wat aerodynamica, oftewel stromingsleer, met als medium lucht inhoudt.

Wat gaan wij vandaag allemaal testen in de windtunnel? Een 2D doorsnede van een vleugel. We zullen hierbij de invalshoek, ook wel de Angle of Attack, aanpassen en kijken hoe dit de Lift en Weerstand gaat beïnvloeden. Ook gaan we een auto op schaal, wat wil zeggen in het klein, plaatsen in de windtunnel en gaan we met rook de luchtstroming rondom de auto proberen te visualiseren.

Instructies tekstkleur	
	= Demogever vertelt
	= Correctie/Waarschuwing
	= Demogever voert uit
	= Toeschouwer voert evt. uit
	= Verwijzing Appendix

Inhoudsopgave

Handleiding	4
Demonstratie omschrijving incl. achtergrondinformatie	4
Introductie	4
Uitleg Animatie	4
(Optioneel) Vervolg gevorderd (middelbare school/ouders met interesse)	5
Ombouwen	5
Rookmachine	6
Afbouwen	6
Onderhoud en Continuatie	7
Lijst aanwezige apparaten en materialen	7
Lijst met gebruiksvoorwerpen en leveranciers	7
Speciale onderzoeksapparatuur en locatie	8
Activiteit/Handeling voor de bezoekers	8
Leerdoelen per doelgroep	8
Kinderen van 6 tot 12 jaar.....	8
Jongeren van 12 tot 16 jaar.....	9
Volwassenen.....	9
Ruimte en Locatie.....	9
Apparatuur	9
Context binnen de TU Delft.....	9
Context binnen de maatschappij.....	10
Appendix	11
Natuurkunde	11
Vleugels Aerodynamica	11
Windtunnels	14
Vleugelprofielen	17
Luchtstroom	19

Handleiding

Demonstratie omschrijving incl. achtergrondinformatie

Introductie

U staat hier voor de Low-speed windtunnel van het Science Centre Tu Delft. Dit is een van de vele windtunnels die de TU Delft kent. Low-speed wil zeggen dat de windtunnel met lage snelheden werkt, ver onder de snelheid van het geluid (1200 km/h). Een windtunnel kan voor veel dingen worden gebruikt. Van het testen van hoe gestroomlijnd wielrenners zijn tot het meten van de Liftkracht van een vleugel. Deze windtunnel wordt vooral gebruikt voor het meten van de Liftkracht van een vleugel. Ook kunnen er auto's op schaal (niet op ware grote) ingezet worden. Verder kun je ook de luchtstroom in de windtunnel visualiseren met behulp van een rookmachine. De windtunnel is bedoeld voor experimentele doeleinden voor scholieren van 6 VWO en als tentoonstellingsmateriaal voor het museum.

Uitleg Animatie

Laten we aan de hand van deze animatie kijken hoe de windtunnel eruit ziet. [\(start animatie\)](#)

Ik zal een beetje meepraten met de tekst in de animatie en soms het een en ander

toevoegen. Bewaar u vragen tot na de animatie, we kunnen hem helaas niet pauzeren.

- Een vliegtuig vliegt door een kracht die we Liftkracht noemen, deze kracht werkt op de vleugels.
- De Liftkracht is afhankelijk van een aantal dingen, waaronder de invalshoek van de vleugel, dus hoe hij t.o.v. de luchtstroom staat, en het oppervlak van de vleugel. **(Animatie is fout, oppervlak verandert niet met variëren invalshoek)**
- Ook speelt de snelheid een grote rol in de Lift, hij heeft namelijk invloed in het kwadraat voor degene die weten wat dat is. **[VLEUGELS AERODYNAMICA]**
- Start de windtunnel door je hand op de sensor te leggen. **(Eventueel tijd voor korte vraag)**
- Zoals u kunt zien bestaat de windtunnel uit een gesloten systeem, een rondje, waarin de lucht door een grote ventilator onderin het rondje rechtsonder wordt gepompt. Deze is echter wel turbulent. Voordat de lucht bij het smallere stuk komt, wat we de test-sectie noemen, gaat het door een gelijkrichter. Dit zorgt ervoor dat de lucht mooi zonder wervelingen, laminair z'n weg kan vervolgen naar de test-sectie. De vernauwing zorgt ervoor dat de lucht sneller gaat lopen, waardoor we een mooie rechte snelle luchtstroom hebben in het test-gedeelte. Het gesloten systeem zorgt ook voor extra lichtsnelheid.
- Linksboven kunnen we deze lichtsnelheid aflezen in km/uur.
- Wanneer een vliegtuig start zorgt de voorwaartse snelheid voor een laminaire stroom langs de vleugel, net als hier in de opstelling nagebootst met een 2D doorsnede van een vleugel.
- Door de invalshoek te veranderen zal de lift dat ook doen. **(Nogmaals, invalshoek doet vleugeloppervlak niet veranderen)**
- Een verkeerde invalshoek kan ervoor zorgen dat de luchtlaag loslaat en turbulente lucht veroorzaakt, wat verlies in Lift en toename in Weerstand veroorzaakt. Dit is hier geïllustreerd met de haartjes op de vleugel.
- **Zoek de invalshoek die de meeste Lift veroorzaakt. Doe dit door te draaien aan de vleugel en de grafiek af te lezen.**
- Het vliegtuig blijft mooi in de lucht, want de stroom blijft laminair rondom de vleugel.
- Zoals eerder gezegd speelt de snelheid ook een grote rol bij de Liftkracht. Om een beetje een idee te krijgen, hier een proef.

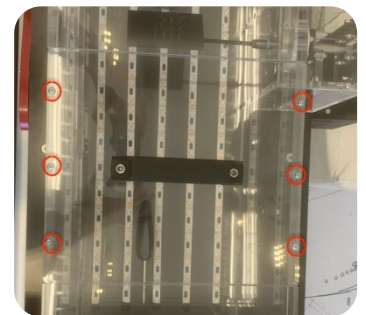
- Pas de juiste power-setting toe door de hendel te duwen, en vind het punt waarbij je Liftkracht evenveel is als je Zwaartekracht, het punt van zweven. Lees dan de luchtsnelheid af van de meter en beantwoord de vraag.
- Door de juiste combinatie van invalshoek en luchtsnelheid te kiezen laten jullie het Tu Delft vliegtuig vliegen!

(Optioneel) Vervolg gevorderd (middelbare school/ouders met interesse)

- Om een beeld te geven hoe de experimentele set-up eruitziet, zal ik deze even aanzetten. (Login met wachtwoord: woei) Op de display zijn een aantal dingen te zien, zo zie je twee grafieken en wat knoppen om het vermogen van de ventilator op te schroeven en zo de windsnelheid toe te laten nemen.
- In het test-gedeelte zien we een metalen apparaat, de Loadcell. Deze meet krachten in 2 richtingen. In de horizontale richting opzij, waarin de weerstandskracht werkt, en in de verticale richting omhoog, waarin de Lift- en Zwaartekracht werken. [
- Windtunnels]
- We kunnen ons nu focussen op de 2D doorsnede van de vleugel in de test-sectie. Het vleugeltje zal zorgen voor krachten in 2 richtingen, zoals ik net al zei. Laten we ons even focussen op de Liftkracht en de Weerstandskracht. Deze kracht omhoog en opzij zijn afhankelijk van ongeveer dezelfde dingen: Luchtsnelheid, Luchtdichtheid, vleugeloppervlak en een Liftcoëfficiënt, die de aerodynamische eigenschappen van het profiel uitdrukt in een nummer. Dit Liftcoëfficiënt is direct afhankelijk van de vorm en invalshoek van het profiel. Deze dingen zijn ook te zien op de metertjes, namelijk luchtsnelheid rechtsboven, invalshoek linksboven en de temperatuur die iets zegt over de luchtdichtheid. [VLEUGELPROFIELEN] [VLEUGELS AERODYNAMICA]
- Laten we hem op 70% zetten, dan loopt hij op z'n mooist. Langzamerhand zal hij opstarten, dit zie je ook aan het metertje rechtsboven. Kijk nu naar de linker grafiek die de Lift meet, en naar de rechter die de weerstand meet. Beide zie je toenemen, logisch: de aerodynamische krachten gaan werken. (Vragen over waarom lift negatief? (Zie: [
- Windtunnels])
- Nu de luchtstroom een stabiele snelheid heeft kunnen we de invalshoek gaan variëren. (Laat de invalshoek heel langzaam toenemen tot voorbij de overtrek) Als we hem groter maken zien we dat zowel de Lift als de Weerstand toeneemt. Let op de haartjes, die gaan trillen wat wil zeggen dat de luchtlaag aan het loslaten is en dat de lucht turbulent is op dat punt. Wanneer alle haartjes zijn gaan trillen is de vleugel helemaal overtrokken, wat zorgt voor een hele inefficiënte manier van vliegen, veel weerstand, weinig lift. Laten we nu kijken naar ander toepassingen van de windtunnel.

Ombouwen

- Zorg dat de windtunnel uit staat. (Geen stromende lucht)
- Schroef de 6 schroefjes los aan de bovenkant van de windtunnel met inbussleutel 2.5 van het setje uit de doos. (Onderdeel 8 van FIGUUR 4). (Zie: Figuur 1)
- Demonteer het vleugelprofiel Doe dit met inbussleutel 3 van de bovengenoemde set. En trek het profiel zonder moment uit te oefenen op de Loadcell uit de Loadcell. (Let op: geen grote kracht uitoefenen op het vleugeltje bij het eruit halen i.v.m. plastische deformatie Loadcell) (Zie: Figuur 2)
- Plaats nu een van de auto's in de windtunnel door het sprietje onderaan de auto in het gat te steken op de bodem van de



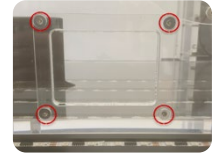
Figuur 1



Figuur 2

windtunnel. Draai dan de schroef die daar zit nog vast met de lange inbussleutel uit de grote doos (Onderdeel 7 van **FIGUUR 4**)

- Plaats nu onderdeel 10 & 12 van **FIGUUR 4** op het gat boven aan de windtunnel (onderdeel 12 aan de auto kant).
- Maak nu de 4 schroefjes aan de zijkant van de windtunnel los met inbussleutel 2.5 van de set en haal het klepje eraf. (Zie: Figuur 3)



Figuur 3

Rookmachine

- Haal de rookmachine 16 en de batterij 17 uit de doos Figuur 5. Schuif de batterij in de rookmachine (kijk even waar de elektrodes zitten) en druk 1 keer op de knop bovenaan de rookmachine. Hij zal waarschijnlijk even een beetje opwarmen. De rook gaat aan/uit telkens als je het knopje **1x** indrukt. Voor verdere uitleg (bijvullen vloeistof, opladen batterij), zie manual onderdeel 19 uit de doos.
- Plaats onderdeel 13 en 14 van Figuur 4 op de rookmachine in respectievelijke volgorde.
- Zet de windtunnel op de rookstand (rechtsboven), dit is een lichtsnelheid waarbij de rook mooi laminair stroomt.
- Steek nu de tuutjes van de rookmachine door het gat van Figuur 3 heen en druk 1x op de knop zodat de rook gaat stromen.
- Belangrijk is dat de rook goed zichtbaar is, zodat je de luchtstroom kan waarnemen. Dit is hier gedaan d.m.v. een zwart-wit contrast. Wat je ziet is een mooie laminaire stroom die over de auto heen gaat. Dat de stroom laminair is, is te zien aan dat het mooi parallel en rechtlijnig is. Houd je hem namelijk een beetje boven de auto, dan zie je dezelfde buiging in de stroom als die van de auto zelf, wat dus aangeeft dat de luchtstroom parallel is. Turbulente stroom zou wervelingen en verstrooiing van de rook veroorzaken. Dit zou eventueel aan het einde van de auto te zien kunnen zijn, waar de luchtlaag loslaat. Als je een vleugeltje zou onderzoeken met de rookmachine, zou je de scheiding tussen laminaire en turbulente luchtstroom aantreffen bij het punt op de vleugel waar de vleugel overtrokken is. Deze techniek wordt verder ook toegepast bij professionelere windtunnels om te zien waar er eventueel turbulente stroom zou ontstaan rondom een vleugel, auto, of ander lichaam.

Afbouwen

- Laat de rookmachine stoppen met roken door 1x op de knop te drukken en haal hem weer uit elkaar. Doe de twee buiswerken weer mooi in de grote doos en doe de batterij en de rookmachine weer in de kleine doos. **Let op: Haal de batterij uit de rookmachine en doe hem in het witte kartonnen doosje met de juiste kant omhoog.**
- Haal klepje 10 van de bovenkant van de windtunnel en vervang deze met klepje 11 van de grote doos. Dit om overtollige rook uit het gesloten systeem te halen, de windtunnel blijft du even aan staan. Doe dit een paar minuten tot de lucht weer een beetje schoon is.
- Haal dan klep 11 en 12 eraf en verwijder de auto uit de windtunnel, nadat je het schroefje met de lange inbussleutel hebt losgedraaid.
- Pak het vleugelprofiel met de haartjes en monteer deze weer door hem met het sprietje naar beneden in de Loadcell te plaatsen en het schroefje van Figuur 2 hand-vast aan te draaien, vast is vast!
- Draai klep van Figuur 1 & Figuur 3 weer dicht met inbussleutel 2.5.
- Check even of alles weer in de kisten zit zoals bij Figuur 4 & Figuur 5.

Onderhoud en Continuatie

Rookmachine bijvullen/opladen (zie manual Figuur 5 onderdeel 19)

Lijst aanwezige apparaten en materialen

Tabel met namen, type nr. en inhoud



1. Ferrari
2. Lamborghini
3. Escalade
4. Vleugelprofiel 1
5. Vleugelprofiel 2
6. Windmolen
7. Lange inbusleutel
8. Inbusleutel set klein
9. Inbusleutel set groot
10. Afsluitklep rook
11. Rook-verwijder-klep
12. Gelijkrichter rook
13. Adapter rookmachine
14. Tuutjes rookmachine
15. Bochtstuk rookmachine

Figuur 4



16. Rookmachine
17. Batterij rookmachine
18. Vloeistof rookmachine
19. Manual rookmachine
20. Oplader batterij

Figuur 5

Lijst met gebruiksvoorwerpen en leveranciers

Tabel met gebruiksvoorwerpen (naam, artikelnummer, hoeveelheid) en leveranciers)

Leverancier materialen: Berkelaar MRT

Speciale onderzoeksapparatuur en locatie

- *Waar wordt de demonstratie gegeven?* De demonstratie wordt gegeven in het Science Centre Tu Delft.
- *Aan/Bij welk apparaat wordt de demo gegeven?* We staan hier bij een low-speed windtunnel, ontworpen door Ingenieursbureau BerkelaarMRT ook gevestigd in dit gebouw. De windtunnel is bedoeld voor experimentele doeleinden voor scholieren van 6 VWO en als tentoonstellingsmateriaal voor het museum.
- *Hoeveel personen kunnen er actief mee doen bij deze demonstratie?* Bij de demonstratie kunnen maximaal 6 mensen aanwezig zijn, tenzij de demogever het oké vindt om de demo aan een groter aantal personen te geven. Let op: betrokkenheid zal afnemen!
- *Zijn er extra onderdelen/objecten nodig voor het geven van de demo?*
 - *Welke zijn dit? Voor de demo is nodig:* Windtunnel, Kist objecten, Kist rookmachine.
 - *Waar liggen deze?* Op het moment liggen de twee kisten in de kelder van het Science Centre. Deze is te betreden met een pasje, af te halen bij de balie.
- *Eventuele extra voorwaarden (meetgegevens verzamelen, veiligheid aspecten, e.d.)* In de demo zullen geen meetgegevens worden verzameld. Eventuele data wordt gelijk besproken en behandeld. Veiligheidsaspecten zijn slecht van toepassing voor de demogever.
De demogever is de enige die de vleugel in en uit de Loadcell mag halen.

Activiteit/Handeling voor de bezoekers

Uit het oogpunt van de bezoeker een korte omschrijving van de door hem uitgevoerde activiteit(en). Wat krijgt hij te horen, bij welk onderdeel is hij betrokken en (indien van toepassing) welke handelingen kan hij zelf doen?

De bezoeker zal vooral een toeschouwende rol aannemen, waarbij soms een ondersteunde handeling uitgevoerd op aanvraag van de demogever. Dit om betrokkenheid in de demo te stimuleren. Hierbij kan gedacht worden aan het helpen van schroefjes los/vast draaien en het vasthouden van de rookmachine. Let op: Toeschouwer zit niet aan de Loadcell i.v.m. risico op plastische deformatie!

Leerdoelen per doelgroep

Kinderen van 6 tot 12 jaar

2 a 3 punten op globaal niveau wat interessant is voor bovenstaande doelgroep

1. Grip op het idee van een windtunnel: Wat is het, Waar wordt het voor gebruikt?
2. Het verschijnsel Lift en Weerstand waarnemen.
3. Laminaire luchtstroom waarnemen bij het visualiseren met de rook.

Jongeren van 12 tot 16 jaar

2 a 3 punten met wat specifiekere achtergrond informatie gericht op bovenstaande doelgroep

Bovenstaande leerdoelen, maar dan verdiepend:

1. Grip op het idee van een windtunnel: Wat is het, Waar wordt het voor gebruikt?
2. Het verschijnsel Lift en Weerstand waarnemen. Focus op overtrek, uitleg vleugelprofielen.
3. Laminaire luchtstroom waarnemen bij het visualiseren met de rook. Snappen verschil laminaire/turbulente luchtstroom.

Volwassenen

Combinatie van eerdere leerdoelen met wetenschappelijke achtergrondinformatie en maatschappelijk belang

1. Grip op het idee van een windtunnel: Wat is het, Waar wordt het voor gebruikt? Zie Appendix voor extra info: Low/High speed windtunnels Tu Delft, Loadcell, etc. []
2. Windtunnels]
3. Het verschijnsel Lift en Weerstand waarnemen. Focus op overtrek, uitleg vleugelprofielen. Zie Appendix voor extra info: Snappen Lift/Weerstand Formule, Numerieke waarde experiment en verdere natuurkunde uit de Appendix. [[VLEUGELPROFIELEN](#)] [[VLEUGELS AERODYNAMICA](#)]
4. Laminaire luchtstroom waarnemen bij het visualiseren met de rook. Snappen verschil laminaire/turbulente luchtstroom. Verdiepende info. uit Appendix, omtrent vortexen, grenslagen, etc. [[LUCHTSTROOM](#)]

Ruimte en Locatie

In welke ruimte wordt deze demonstratie gegeven. Wat is de achterliggende gedachte van deze ruimte? Wat voor exhibits, wat is er nog meer te doen/beleven in deze ruimte?

De demonstratie wordt gegeven bij de windtunnel die zich bevindt in het Science Centre. Hier wordt verder onderzoek gedaan door scholieren va 6VWO naar aerodynamica.

Apparatuur

Demonstraties maken vaak gebruik van onderzoeksfaciliteiten die naast de demonstratie ook voor onderzoek en onderwijs ingezet worden. Wat is er zo bijzonder aan dit apparaat, wat wordt er mee gedaan en wat voor onderzoek/onderwijs wordt hier gedaan?

De windtunnel is special ontworpen voor demo- en experimentele doeleinde door Berkelaar MRT. Veel scholieren doen voor hun PWS (profielwerkstuk) experimenten met de windtunnel.

Context binnen de TU Delft

Wat gebeurt er op de TU Delft m.b.t. het onderwerp van de demonstratie op gebied van onderzoek, onderwijs en valorisatie?

De Tu Delft heeft een leidende rol in windtunnelonderzoek. Met haar grote spectra aan windtunnels, zijn bedrijven erg afhankelijk van de testfaciliteiten van de TU. Zo geeft ze ook aan de studenten de unieke kans om proeven te doen met deze hoogstaande proefopstellingen.

Context binnen de maatschappij

Waarom is het belangrijk dat wij hier onderzoek naar doen? Welke belangrijke elementen zijn er in het verleden binnen deze context gebeurd? Wat merkt de bezoeker hier zelf van?

Vandaag de dag is er veel te doen om milieuproblemen als de stikstof- en CO₂-uitstoot. Vliegtuigen en auto's zijn hier grote boosdoeners in en technologische ontwikkelingen zijn van groot belang om deze uitstoten binnen de perken te houden. Zo is windtunnelonderzoek cruciaal voor het aerodynamisch verbeteren van deze voertuigen, om ze zo zuiniger en milieuvriendelijker te maken. Samen werken we aan een betere toekomst!

Appendix

In deze appendix is verdiepende informatie te vinden over de natuurkunde achter de experimentele opstelling en de aerodynamica die van toepassing is. Deze informatie is voor de demogever en de geïnteresseerde toeschouwer. Verder wordt er nog dieper ingegaan op de apparatuur, de ruimte, locatie en de context van windtunnelproeven binnen de TU Delft en de maatschappij.

Natuurkunde

Om het experiment beter te begrijpen, zal in de volgende kopjes diepere uitleg worden gegeven van de natuurkunde die plaatsvindt in de windtunnel. Als eerst wordt er begonnen met een stukje klassieke mechanica, gevolgd door aerodynamica. Tot slot wordt er gekeken naar windtunnels, vleugelprofielen en luchtstromen.

Vleugels Aerodynamica

Krachten op een vleugel

Een kracht kan ervoor zorgen dat een voorwerp van vorm of snelheid verandert. Laten we dit betrekken op een vliegtuig. Er komen heel veel kleine krachtjes te staan op een vliegtuig die zorgen voor snelheidsverandering van het vliegtuig. Het vliegtuig is stevig genoeg gebouwd/gemaakt, zodat de vorm niet verandert. Al deze krachten kunnen dan onderverdeelt worden in 4 verschillende krachten, namelijk lift, weerstand, zwaartekracht en stuwkracht van de motoren. Hieronder zie je welke richting ze op werken.



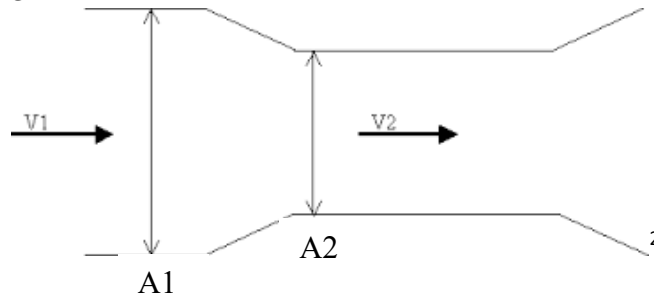
1

Wat gezien kan worden, is dus dat de lift en zwaartekracht in verticale richting werken en dat de weerstand en voortstuwing in de horizontale richting werken. Als alle krachten in evenwicht zijn, wat wil zeggen dat de krachten op dezelfde as gelijk zijn in magnitude, dan zweeft het vliegtuig of beweegt het met een constante snelheid (kruissnelheid). Wanneer de krachten uit evenwicht zijn zal het vliegtuig versnellen in de richting van waar de kracht het grootst is. Wij zullen ons verder slechts focussen op de Lift en de weerstand, omdat de voortstuwing en de zwaartekracht minder interessant zijn voor windtunneltesten.

¹ <https://www.sciencespace.nl/technologie/artikelen/3900/hoe-vliegt-een-vliegtuig>

Lift

Om het concept Lift iets beter te kunnen begrijpen, kijken we eerst naar de Venturi-buis, hieronder weergegeven.



In de buis kun je zien dat de doorsnede, of de oppervlakte waardoor de stroom van links naar rechts gaat, varieert. Laten we zeggen dat het grotere deel, Area 1 (A1) is, en het smallere deel Area 2 (A2) is. v_1 is de snelheid van de luchtstroom door A1 en v_2 is de snelheid van de luchtstroom door A2. Er is een natuurkundige wet die zegt dat het product van A1 en v_1 gelijk moet zijn aan het product van A2 en v_2 . Hieruit kun je concluderen dat een toename in oppervlak gepaard gaat met een afname van snelheid en visa versa. Dit is iets wat we zullen moeten onthouden om zo de liftkracht te begrijpen.

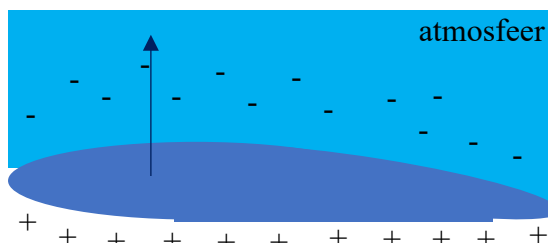
Er zijn meerdere manieren om lift te verklaren, maar de bekendste is toch wel de verklaring van Bernoulli. Bernoulli (1700-1782) zei dat de som van de statische druk en de dynamische druk in situatie 1 van de Venturi-buis gelijk is aan die van situatie 2. Hieronder de Formule:

$$\left(\frac{1}{2}\rho v_1^2\right) + p_1 = \left(\frac{1}{2}\rho v_2^2\right) + p_2$$

Dynamische druk 1
Statische druk 1
Dynamische druk 2
Statische druk 2

Dus wanneer de luchtsnelheid [v] toeneemt, zal dit gecompenseerd moeten worden met een afname in druk [p]. Een hoge stromingssnelheid gaat dus gepaard met een lage statische druk.

Nu we weten dat een versmalling een hogere luchtsnelheid teweeg brengt door meneer Venturi en dat een hogere stromingssnelheid gepaard gaat met een lagere statische druk, kunnen we Lift verklaren. Kijk hiervoor naar de afbeelding hieronder.



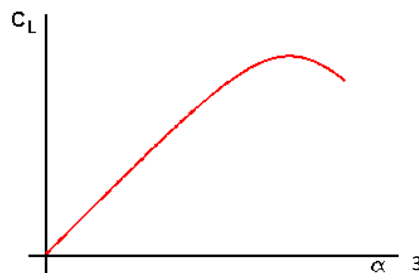
² <http://home.kpn.nl/tukker5/PLAATJESMAP/Verslag%20PEN41.htm>

Je ziet namelijk aan de bovenkant een halve Venturi-buis, grenzend aan de atmosfeer. Dit wil zeggen dat de stroom sneller zal gaan aan de bovenkant t.o.v. de onderkant van de vleugel, aangezien daar een vernauwing is (continuïteitswet). Volgens Bernoulli heb je bij een snellere stroom een hogere dynamische druk, dus een lagere statische druk. Er ontstaat dus een drukverschil tussen boven en onder, zoals te zien is in de afbeelding hierboven. Een verschil in druk uitgeoefend over een bepaald oppervlak van een lichaam resulteert in een kracht, namelijk de Liftkracht.

De Liftkracht is afhankelijk van een aantal parameters: Luchtdichtheid, stromingsnelheid, oppervlakte vleugel, liftcoëfficiënt. De formule hieronder laat zien hoe ze gelinkt zijn.

$$Lift = \frac{1}{2} \rho v^2 \cdot S \cdot C_L$$

De liftcoëfficiënt is een getal die iets zegt over de aerodynamische eigenschappen van een voorwerp. Hoe hoger dit getal, hoe grotere de liftkracht zal zijn. De liftcoëfficiënt van een vleugel zal veranderen wanneer de vorm of de oriëntatie van de vleugel ten aanzien van de luchtstroom verandert. Over dat eerste later meer in [VLEUGELPROFIELEN]. De oriëntatie duiden we graag aan met de invalshoek. Hoe groter deze is, hoe groter de C_L -waarde. Dit is tot een bepaald punt waarbij de vleugel overtrek en de C_L -waarde juist weer afneemt. Dit punt noemen we de overtrek: de vleugel verliest z'n aerodynamische krachten, omdat de luchtlaag loslaat en overgaat in turbulente stroom i.p.v. laminaire stroom. Deze daling is mooi te zien als je de liftcoëfficiënt [C_L] uitzet tegenover de invalshoek [α]:



Het is goed om te beseffen dat de bovenstaande grafiek gaat om een symmetrisch profiel, ofwel bovenkant en onderkant van de vleugel zijn hetzelfde. Dit kun je zien doordat bij een invalshoek van 0, de C_L en dus ook de lift 0 is. Hij gaat dus door de oorsprong, omdat het drukverschil tussen boven en onder er niet is, beide kant zijn namelijk gelijk qua vorm en oriëntatie. Hadden we nou een asymmetrisch profiel gehad, dan had je bij een invalshoek van 0 wel al enige C_L -waarde. De grafiek zou iets naar boven verschuiven.

Weerstand

Weerstand kennen we in vele vormen: rolweerstand, frictie, maar ook luchtweerstand. Op dat laatste gaan we ons focussen. Luchtweerstand is de kracht die de luchtdeeltjes uitoefenen op het lichaam en is altijd tegenovergesteld aan de relatieve bewegingsrichting van het lichaam. Vandaar dat die bij een vliegtuig en het vleugeltje de luchtweerstandskracht naar achteren gericht is.

³ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Grafica_CL-alfa.png

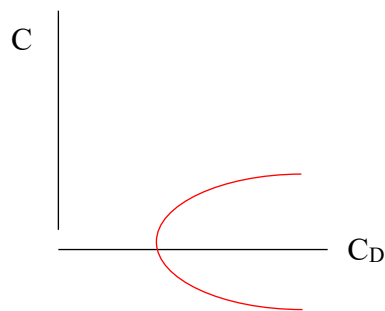
Luchtweerstand is afhankelijk van dezelfde parameters als die van Lift, op eentje na. Zie de formule:

$$Luchtweerstand = \frac{1}{2} \rho v^2 \cdot S \cdot C_D$$

De liftcoëfficiënt is de dragcoëfficiënt C_D (NL: weerstandcoëfficiënt) geworden. Dit dimensieloze getal zegt iets over de mate van weerstand die het lichaam produceert. Wanneer de vorm en/of oriëntatie van het lichaam verandert, dan varieert de C_D ook. Aerodynamische vormen, zoals een druppel, zullen een lage C_D hebben..

Efficiëntie

Om een vleugel efficiënt te krijgen, willen we een zo hoog mogelijke Lift tegenover een zo laag mogelijke weerstand. Wanneer dit het geval is, kunnen we een lichaam aerodynamisch noemen. De Fractie $\frac{Lift}{Luchtweerstand}$ moet dus zo hoog mogelijk zijn. Dit kan je ook schrijven als de fractie $\frac{\frac{1}{2} \rho v^2 \cdot S \cdot C_L}{\frac{1}{2} \rho v^2 \cdot S \cdot C_D}$, wat hetzelfde is als $\frac{C_L}{C_D}$. De verhouding tussen deze twee dimensieloze getallen moet dus zo hoog mogelijk zijn om efficiënt te vliegen. Je zou natuurlijk ook een C_L kunnen plotten tegenover de bijbehorende C_D . Zo'n grafiek zou er ongeveer zo uitzien:



Voor een profiel die minder weerstand heeft, gaat de grafiek naar links verschuiven. Hierover later meer onder het kopje [\[VLEUGELPROFIELEN\]](#).

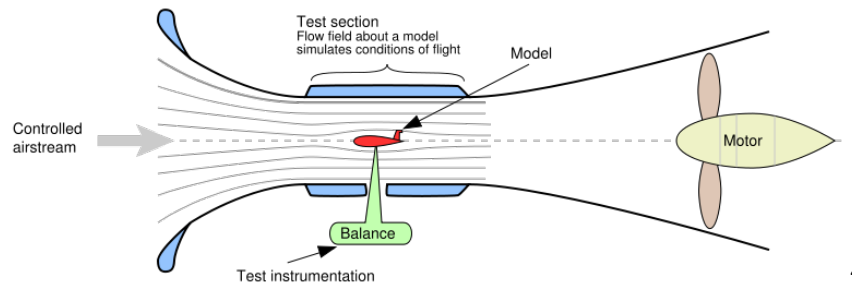
Windtunnels

Een windtunnel heeft als doeleinde om experimenteel onderzoek te doen naar aerodynamische eigenschappen van een lichaam/voorwerp. Door een gecontroleerde luchtstroom te laten stromen langs een voorwerp kan men zien wat voor een invloed het voorwerp heeft op de luchtstroom en andersom. Zo kun je kijken naar de transitie van laminaire naar turbulente stroom (parallel naar chaos) of letten op shockwaves en andere aerodynamische verschijnselen, maar je kunt ook kijken naar de aerodynamische krachten die komen te staan op het lichaam.

Ontwerp

Hieronder de vereenvoudigde presentatie van een windtunnel. Zoals je kunt zien bestaat de windtunnel uit een motor die de luchtstroom aanzet, het test-gedeelte, en een lichaam waaraan wordt gemeten met meetinstrumentaria. Een windtunnel kan een open systeem zijn zoals hieronder, maar hij kan ook gesloten zijn zoals die in het Science Centre. Een andere mogelijkheid is nog dat de windtunnel maar aan één einde open is en dat aan het

andere einde een tank zit met lucht onder een hoge druk. Deze configuratie tref je vaak aan bij supersonische windtunnels. [\[SOORTEN WINDTUNNELS\]](#)



Er zijn verschillende soorten meetinstrumenten in een windtunnel om bepaalde parameters te kunnen meten. Zo heb je parameters als temperatuur, statische druk van de omgeving, de invalshoek, maar ook de snelheid en de kracht op het lichaam. Over die laatste twee parameters hieronder meer.

Pitot buis

De Pitot buis wordt gebruikt om de snelheid van de lucht te meten. De Pitot buis is aanwezig in de windtunnel en in elk vliegtuig. Dit om de IAS, indicated airspeed, te meten. Het is illegaal om zonder te vliegen, omdat het voor een piloot van groot belang is om te weten met welke snelheid de lucht langs zijn vleugels gaat.

Het buisje staat direct gericht in de luchtstroom, waardoor de luchtstroom een vloeistof die in de buis zit met een bepaalde druk naar achter perst. Dit zegt iets over de totale druk die er is. Wanneer je de statische druk meet, kan de dynamische druk bepaald worden en daarmee de luchtsnelheid. Hiervoor heb je natuurlijk wel nog de luchtdichtheid nodig. Hieronder de formule voor eventuele verduidelijking:

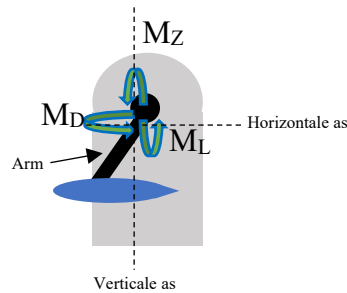
$$v = \sqrt{\frac{2 * (P_{totaal} - P_{statisch})}{\rho}}$$

Loadcell

Zoals beloofd nu iets over het device dat de krachten meet, de Loadcell. Een Loadcell is een hypergevoelig en duur device, die snel kapot kan gaan door plastische deformatie (permanente verbuiging). In de eerste zin staat een klein foutje; hij meet geen krachten maar momenten. Deze twee dingen zijn gelukkig goed aan elkaar gelinkt. Een moment is namelijk het product van een kracht en de arm van die kracht op de Loadcell. Dus wanneer we de arm en het moment weten is de kracht makkelijk de bepalen.

⁴ <https://nl.wikipedia.org/wiki/Windtunnel>

In het kopje [KRACHTEN OP EEN VLEUGEL] is te zien dat er 3 krachten op de vleugel werken en dus ook op de Loadcell, aangezien die met een bepaalde arm vast zit aan de vleugel. Hieronder is de situatie geschetst.



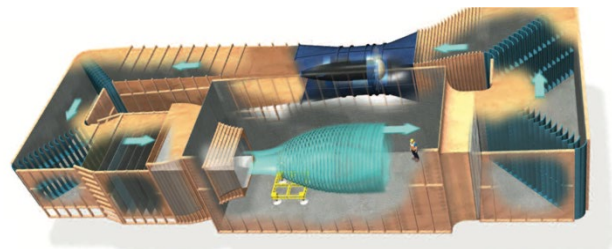
Zoals je ziet zorgt het vleugeltje voor drie momenten op de Loadcell. Het zwaartemoment (M_z) en het liftmoment (M_L) rondom de horizontale as en het weerstandsmoment (M_D) rondom de verticale as. Alle drie de momenten hebben als arm de lengte van het balkje. Mocht je je afvragen waarom het liftmoment negatief is op het grafiekje van de windtunnel: dat komt omdat het zwaartemoment meegerekend is in het moment om de horizontale as. Blijkbaar is deze zwaarder dan de geproduceerde Lift. Het vleugeltje produceert dus niet genoeg lift om de compenseren van z'n zwaartekracht, hij zou vallen als het balkje er niet was.

Soorten windtunnels

Je hebt verschillende soorten windtunnels om verschillende soorten onderzoek te doen naar luchtstromen. Je hebt ze eigenlijk in twee smaken en de Tu Delft heeft ze beide tot haar beschikking en doet er ook onderzoek mee. Hieronder staan ze omschreven:

Low speed windtunnels

De low speed windtunnel, de naam zegt het al, faciliteert onderzoek met lichtsnelheden onder de snelheid van het geluid (1194 km/h). Ze zijn vaak gesloten om het momentum van de uitgaande lucht te benutten voor de luchtstroom in het circuit. De Tu Delft kent 5 Low speed windtunnels waarmee serieus onderzoek wordt gedaan, ook door externe bedrijven. De bekendste is wel de Open Jet Facility bij de faculteit van Lucht- en Ruimtevaarttechniek, hier rechts weergegeven⁵.



Supersonische windtunnels

De supersonische windtunnel faciliteert experimenten waarbij het nodig is dat lichtsnelheden over de snelheid van het geluid kunnen gaan. In aerodynamische termen zeggen we dat het Mach-getal meer dan 1 is. Onderzoek voor bijvoorbeeld straaljagervleugels en andere supersonische vliegtuigen wordt hier gedaan. Delft kent 5 Supersonische windtunnels



⁵ <https://www.Tu Delft.nl/lr/organisatie/afdelingen/aerodynamics-wind-energy-flight-performance-and-propulsion/facilities/>

en ze worden allemaal gevoed door grote druktanks die zich bij de faculteit van lucht- en ruimtevaarttechniek bevinden. Binnen supersonische windtunnels heb je ook nog verschillende categorieën: Transsonisch ($0,8 < M < 1,3$), Supersonisch ($1,3 < M < 5,0$) en Hypersonisch ($M > 5,0$). Hier rechts de HTFD hypersonische windtunnel⁶.

Vleugelprofielen

Een vleugelprofiel is bepalend voor de aerodynamische eigenschappen van de vleugel. Zoals eerder besproken zal de vorm van het profiel invloed hebben op de waarden als C_L en C_D . Hoe kan je een bepaalde vorm omschrijven en hoe gaat dat precies invloed hebben op de aerodynamische eigenschappen van de vleugel? Daarover meer in dit hoofdstuk.

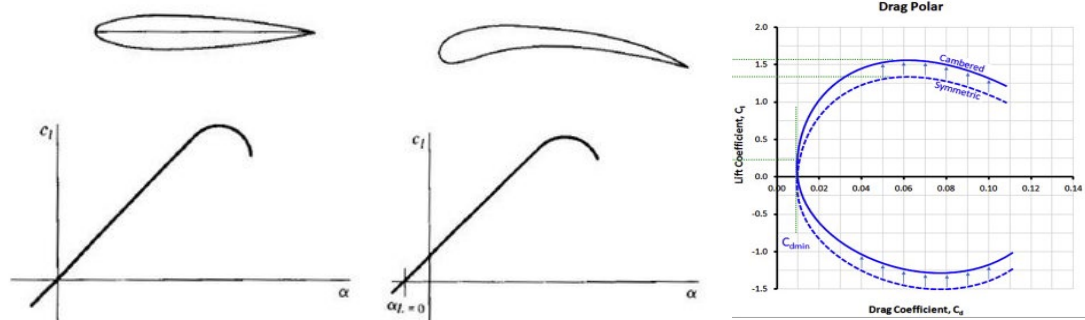
Eigenschappen 2D

Om te beginnen gaan we kijken naar de 2D eigenschappen van een vleugelprofiel. Dit wil zeggen dat we gaan kijken naar de dwarsdoorsnede van de vleugel. Hieronder een doorsnede weergegeven.



7

Over het algemeen kun je zeggen dat dunnere vleugels gemaakt zijn voor snellere vliegtuigen en dat de dikkere vleugels gemaakt zijn voor langzamere vliegtuigen. Zoals je kan zien in de afbeelding hierboven, zijn er twee lijnen die de verdere vorm van de vleugel maken. Je hebt de koorde wat simpelweg een rechte lijn is van Leading edge naar Trailing edge (voor- en achterkant). Daarnaast heb je de skeletlijn die de werving van het profiel aangeeft. De skeletlijn is een lijn die getrokken kan worden door alle punten die even ver van de boven- als onderkant zijn. Als je een profiel hebt waarbij de koorde en de skeletlijn dichtbij elkaar komen, dan heb je weinig werving. Wanneer de lijnen hetzelfde zijn, dan heb je te maken met een symmetrisch profiel. Zijn de lijnen ver van elkaar af, dan heb je veel werving in je profiel. Hoe uit zich dit in de aerodynamische eigenschappen van het profiel?



89

⁶ <https://www.Tu Delft.nl/lr/organisatie/afdelingen/aerodynamics-wind-energy-flight-performance-and-propulsion/facilities/>

⁷ <https://nl.wikipedia.org/wiki/Vleugelkooorde>

⁸ <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/negative-camber>

⁹ <https://www.quora.com/What-is-Cl-max-for-an-aircraft>

Wat je kan zien aan de afbeelding hierboven is dat bij het symmetrische profiel (links) de C_L - α curve door de oorsprong gaat, terwijl het profiel met de welving (midden) al bij 0 graden invalshoek een C_L -waarde heeft.

Wat in het plaatje hierboven (rechts) is te zien, is dat de C_L - C_D curve omhoog schuift wanneer een vleugelprofiel meer welving (camber) krijgt. Je zult dus meer lift krijgen tegenover dezelfde weestand. De vleugel wordt dus efficiënter.

Eigenschappen 3D

In het vorige kopje hebben we slechts naar de 2D-eigenschappen van een vleugelprofiel gekeken. Wanneer we ons focussen op 3D, kijken we naar hoe de vleugel varieert over de spanbreedte van de vleugel. Zo zie je hieronder een afbeelding van een flying-V, een vliegtuig die slechts bestaat uit een vleugel in V-vorm.



10

Op de 3D niveau zouden we kunnen kijken naar drie verschillende aspecten over hoe de vleugel varieert over z'n spanbreedte. We kunnen kijken naar:

1. Hoe het vleugelprofiel varieert over de spanbreedte
2. Hoe de dimensies van de vleugel veranderen over de spanbreedte
3. Ailerons, flaps en Anti-vortex devices

De eerste twee spreken voor zich, dus we gaan nu iets dieper in op nummer 3. Ailerons zijn de verstelbare flappen waarmee de piloot het vliegtuig bestuurt. Deze doen natuurlijk de vorm van de vleugel variëren over de spanbreedte. Dit geldt ook voor de flaps, die verantwoordelijk zijn voor extra lift tijdens landen en opstijgen. Anti-vortex devices zijn de verticale flappen aan het einde van de vleugel. Zij zorgen ervoor dat het drukverschil tussen de onder- en ¹¹bovenkant van de vleugel niet kan wegstromen aan de zijkant van de vleugel. Deze stroming zou tip-vortexen kunnen veroorzaken, wat extra weerstand met zich meebrengt. Hiernaast een illustratie van zo'n tip-vortex.



De meeste vliegtuigen, en dan vooral de grotere, bestaan meestal uit een blend tussen meerdere vleugelprofielen om zo de meest optimale vorm te krijgen voor het doel van het vliegtuig. Dit omdat ook bepaalde subsystemen van het vliegtuig vaak in de vleugel verwerkt moeten worden, zoals de tank, ailerons, flaps, bliksemafleiders, etc.

¹⁰ <https://grabcad.com/library/albatros-xxl-1>

¹¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Wingtip_vortices

Luchtstroom

In dit hoofdstuk zal er nog ingegaan worden op verschillende luchtstromen, om bepaalde verschijnselen in de windtunnel te verklaren.

Laminair

Een laminaire stroming wil zeggen dat de luchtstroom parallel en geordend verloopt. Deze stroom gaat vaak gepaard met weinig weerstand en dit is de gemoedstoestand van de lucht wanneer er geen sprake is geweest van verstoringen o.i.d.

Turbulent

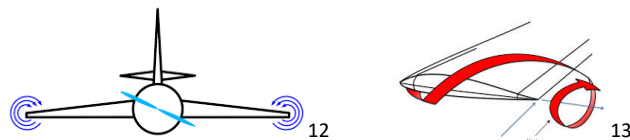
Turbulente luchtstroom is chaotisch en onvoorspelbaar. Deze luchtstroom gaat vaak gepaard met weerstand en geluid. Vaak wordt een vliegtuig ontworpen om zo min mogelijk turbulente luchtstroom met zich mee te brengen, maar er zijn uitzonderingen. Hier wordt niet verder op ingegaan, maar is genoeg over te vinden.

Grenslaag

De grenslaag is een flinterdunne laag ($\pm 2\text{mm}$) met lucht op de vleugelwand, die veel invloed heeft op de luchtstroom rondom de vleugel. Bij een laminaire stroom is de luchtsnelheid op de vleugelwand 0 [m/s] , deze snelheid neemt steeds meer toe naarmate je van de vleugelwand weggaat. Bij turbulente stroom is de richting en magnitude onvoorspelbaar bij de grenslaag. Je kan dan zeggen dat het deel van de vleugel is overtrokken.

Vortexen

Een vortex of wervel is een draaiende beweging in een medium, in ons geval dus lucht. Een vortex gaat vaak gepaard met veel weerstand en verlies in efficiëntie. Zoals eerder beschreven komt een tip-vortex door de hoge druk onder de vleugel die via de zijkanten van de vleugel naar boven kruipt. Deze wervelende lucht in combinatie met een voortgaande beweging zal dus voor een vortex zorgen. Hieronder is dit geïllustreerd:



¹² https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wing_Tip_vortex.svg

¹³ <https://i.stack.imgur.com/ykpUN.jpg>