

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---

## KRACHTEN OP EEN VLIEGTUIG



Gemaakt door:  
Martijn van Zelst  
&  
Kevin Verbeek  
Klas 6C

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---

## Inhoudsopgave

Inleiding .....	blz. 2
Geschiedenis luchtvaart .....	blz. 2
Geschiedenis Boeing 747 .....	blz. 7
Verslag van het bezoek .....	blz. 9
Krachten op een vliegtuig .....	blz. 12
Weerstand en stuwkracht .....	blz. 20
Besturing van het vliegtuig .....	blz. 24
De “Coffin corner” .....	blz. 27
Simulatie .....	blz. 30
Besturing van de simulatie .....	blz. 37
Nawoord .....	blz. 41
Bronnenlijst .....	blz. 41
Logboek .....	blz. 42
Plan van aanpak .....	blz. 42

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---

## Inleiding

Vliegtuigen, waarom hebben we voor dit onderwerp gekozen?

Eerst wilde we de krachten op een formule 1-auto gaan behandelen in ons profielwerkstuk, maar we kwamen al vrij snel tot het inzicht dat daar weinig informatie over te vinden zou zijn. Al snel kwamen we toen uit op ons tweede onderwerp: vliegtuigen. Vliegtuigen gaan ook snel hebben ook vleugels en hebben veel te maken met de formule 1. Zo zeggen ze wel eens dat een formule 1-auto een omgekeerd vliegtuig is.

Ook voor de vliegtuigen hebben we besloten de verschillende krachten op een vliegtuig te behandelen. Elke kracht op een vliegtuig gaan we dan apart behandelen. Ook komt er nog een stuk geschiedenis van de luchtvaart in. Alles wat we in dit werkstuk behandelen heeft betrekking op de Boeing 747-400. Hier is dus ook een stukje geschiedenis van opgenomen. Om aan informatie te komen hebben we de KLM aangeschreven en zijn er ook een dag op bezoek geweest.



## Geschiedenis van de luchtvaart

De mens heeft altijd verstedd gestaan over het vermogen dat de vogels bezitten om te vliegen. De mensen wilden dit ook graag.

In vele mythes en sagen wordt er al verteld over mensen die vliegen. Het was echt een onderwerp dat tot de verbeelding sprak.

Het is niet precies bekend wanneer de eerste pogingen werden gedaan om te vliegen. Men had vroeger ook helemaal geen weet van de fysische wetenschappen. Men keek veel naar de vogels en probeerde dat na te maken om te vliegen. Het nadeel hiervan was dat de vleugels van de vogels te snel klapte om ze goed te kunnen bestuderen. Men had al de vogel met de langzaamste slag genomen, maar nog was dit snel.

Ze hadden rond 1000 voor Christus wel iets dat kon vliegen, maar ze besepte niet dat dat een potentieel vliegmachine kon worden, namelijk: de vlieger. Tot het eind van de 19<sup>e</sup> werd de vlieger niet serieus genomen. Ook omdat de eigenschappen van een vlieger niet geheel bekend waren.

Voor de middeleeuwen werd er al veel geëxperimenteerd met vleugels. Dit werd vooral gedaan door torenspringers. Deze mensen sprongen met vleugels aan hun armen van een hoge toren af en keken dan of ze, al fladderend, konden blijven vliegen. Het lukte ze echter nooit om in de lucht te blijven en de meeste overleefden zo'n val van een toren ook niet.

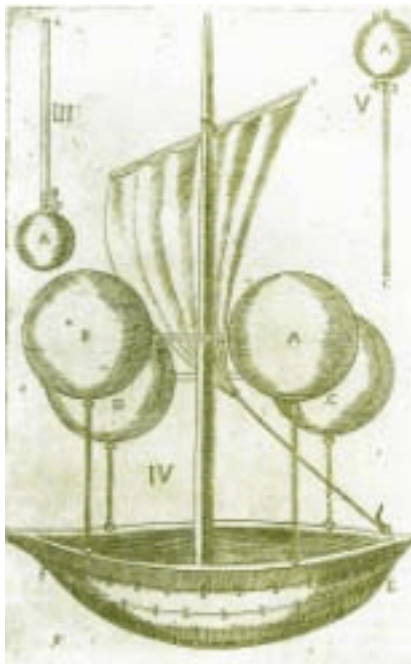


# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

In de 15<sup>e</sup> eeuw kwam er eindelijk iemand met een heldere visie over het vliegen. Dit was Leonardo da Vinci(1452-1519). Door zijn diepgaande kennis over anatomie ontleedde hij hoe een vleugel nou opgebouwd was. Ook herkende hij de derde wet van Newton, die pas in 1643 werd geboren. Hij merkte op dat de vleugel een even grote kracht tegen de lucht moet geven als dat de lucht tegen de vleugel geeft. Hij ging dus ook op het pad van de klappende vleugels aan de mens bevestigen. Deze machines noemen we ook wel ornithopters. Hij zat helemaal op het foute spoor. Hij wilde de machines aandrijven met mankracht. De persoon in de ornithopter moest dan met armen en benen de machine in de lucht houden en besturen. Hij kwam al snel tot de ontdekking dat dit niet zou werken, omdat de machines te zwaar waren om op mankracht te kunnen vliegen. Het is jammer dat da Vinci zich zo lang met deze machines heeft bezig gehouden. In het latere werk van da Vinci verschijnen er schetjes van zweefvliegtuigen. Hij hield zich niet alleen bezig met vliegmachines, maar had ondertussen ook een parachute en een helikopter ontworpen. Het is jammer dat hij op de goede weg zat, maar het niet heeft doorzet. Zo'n 400 jaar lang is er niks meer gedaan met de informatie van Leonardo da Vinci.

Een eeuw na het overlijden van Leonardo da Vinci wordt er pas weer serieus over vliegen nagedacht. Tijdens de tijd die hier tussenzat deden er nog wel veel mensen aan torenspringen. Het was alleen jammer dat de mensen in die tijd vast bleven houden aan het vliegen op spierkracht. Dit kwam omdat de Engelse onderzoeker Francis Willughby(1635-1672) voor het eerst de vogelvucht echt wetenschappelijk ging onderzoeken. Hij kwam tot de conclusie dat de armen van mensen geen dienst konden doen voor de aandrijving van een vliegtuig. Als er al op spierkracht gevlogen zal moeten worden dan zal er op de spieren van de benen moeten worden gevlogen. Hij kwam tot deze conclusie na het vergelijken van de spieren van vogels en die van mensen. Door deze ontdekking werd het ontwerp van vliegtuigen op menskracht alleen maar aangemoedigd.



In de 17<sup>e</sup>-eeuw kwamen twee onderzoekers, Robert Hooke(1635-1703) en Giovanni Borelli(1608-1679), tot de conclusie dat het vliegen op spierkracht niet zou gaan lukken. Het zou alleen maar lukken als de mens zou afvallen of als de mens veel meer spierkracht zou krijgen. Tegenwoordig weten we dat de mens gewoon niet is gemaakt om te vliegen. De botten van een mens zijn massief en zijn veel te zwaar. De botten van vogels zijn veel lichter in verhouding tot die van de mens, dit komt omdat de botten poreus zijn en dus niet veel wegen. Ondanks deze ontdekking bleven mensen dromen van het vliegen op spierkracht.

Rare uitvindingen zijn er ook ontworpen. Zo is er eens een keer een boot met vier koperen bollen die vacuüm zijn. Doordat ze vacuüm zijn is het lichter dan de lucht en zou hij op moeten stijgen. De ontwerper van deze machine, pater Francesco de Lana de Terzi(1631 – 1687), had er echter geen rekening mee gehouden dat de bollen onder de atmosferische druk zouden bezwijken. Een ander idee was het vullen van flessen van ochtenddauw. Een onderzoeker, Cyrano de Bergerac(1619-1655), had ontdekt dat de ochtenddauw in het zonlicht opsteeg. Hij was dus van plan om flessen met ochtenddauw aan zich te binden en dan te wachten totdat het opsteeg en dan zou hij meegaan.

In de 18<sup>e</sup>-eeuw kwam de ballon op het toneel. De ballon heeft een grote invloed gehad op de ontwikkeling van de vleugelvliegtuigen. Doormiddel van de ballon konden verschillende componenten van een vliegtuig op hoogte worden getest. Het is jammer dat de wetenschappers eeuwenlang de implicaties van vulkaanuitbarstingen hebben gemist.

Door de hitte van de uitbarsting werden brokstukken tot grote hoogte meegevoerd. In 1782 realiseerde de Franse papiermaker, Michel Montgolfier(1740-1810), hoe hij opstijgende lucht kon gebruiken. Dit idee kreeg hij terwijl hij naar een haardvuur keek en zag dat de rook opsteeg. Zonder te begrijpen hoe het werkte ging hij een zijden zak maken en daaronder ging hij dan een vuurtje stoken. Tot zijn grote genoegen vulde de zak zich met lucht en steeg naar het plafond. In 1783 demonstreerde hij voor het eerst een grote versie van zijn luchtballon. 5 maanden na deze demonstratie steeg er voor het eerst een luchtballon met een persoon erin op. Voor de eerste keer vloog er een mens en niet zoals vroeger, sierlijk neerstorten.

Het is jammer dat er na de uitvinding van de luchtballon nog zo weinig aandacht werd besteed aan de verdere ontwikkeling van het vliegen met vleugels. De tienjarige George Cayley(1773-1857) was helemaal gek van het vliegen. Vanaf het moment dat de eerste ballon vloog tot aan het einde van zijn leven ging hij zich helemaal richten op vliegen. Hij was de eerste man die zich toelegde op de principes van het mechanisch vliegen. Door zijn werk werd de grondslag voor het latere moderne vliegen gelegd. Hij bestudeerde vanalles over luchtdruk, luchtweerstand en kwam zo tot nieuwe aërodynamische formules. Door het bestuderen van vogels kwam hij tot de ontdekking dat er boven de vleugel een lagere druk heerste dan onder de vleugel. Door deze ontdekking te

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---

koppelen aan de vorm van de vleugel merkte hij op dat een gewelfde vleugel meer lift teweeg bracht dan een platte plaat. Hij ontdekte ook dat lift en stuwkracht 2 verschillende componenten waren. Vroeger werd aangenomen dat die twee componenten door hetzelfde teweeg werden gebracht. Hij kwam tot deze ontdekking omdat hij vogels zag bidden. Ze klapperde niet met hun vleugels, maar bleven toch in de lucht. Het klapperen was voor de snelheid en de gewelfde vorm voor het vliegen. Deze wetenschapper maakte in 1804 zijn eerste schaalmodel van 1,5 meter lang. Dit schaalmodel was gebaseerd op een vlieger maar hij had een vaste hoofdvleugel en een verstelbare staart gemonteerd. Met een gewichtje kon hij vervolgens het zwaartepunt verplaatsen. In 1809 bouwde hij een groter model. Dit was bedoeld om onbemande testvluchten uit te voeren. Dit ging goed. Hij heeft ook nog een aantal malen het model met een jongen laten vliegen en rapporteerde dat het model de jongen meermalen optilde en meerdere meters verplaatste. In 1853 maakte hij weer een ander model met 3 vleugeldekken en hoogte- en richtingsroer. Hij heeft daarna een koetsier in het model gezet en die over een vallei laten vliegen. Deze wetenschapper zag al in hoe het vliegtuig er over een eeuw uit zou moeten zien. Cayley voorspelde dat de mensen later met een snelheid van 20 tot 100 mijl per uur vervoerd zouden worden. In het midden van de negentiende eeuw was er niet echt veel interesse voor het mechanisch vliegen. Dit kwam omdat de theorie van Archimedes veel makkelijker te doorgronden leek dan de nieuwe wetten van de aërodynamica. Een andere reden voor de desinteresse was het gebrek aan goede motoren om de vliegtuigen aan te drijven. Ook waren er nog steeds mensen die van een toren sprongen en daarmee trachten vogels na te doen. De mens wilde als een vogel vliegen. Ze wilde maar niet accepteren dat de mens niet op spierkracht zal kunnen vliegen.

Gelukkig waren er in die tijd nog steeds mensen die zich bezig hielden met de vaste vleugel en de daarbij behorende formules. In 1842 vroeg Henson(1812-1888) patent aan op zijn vliegtuig. Dit werd aangedreven door een stoommotor. Het model is nooit gebouwd, maar is wel het begin van het vliegen met vaste vleugels. Dit model was zijn tijd ver vooruit, want dit ontwerp had al dubbel gewelfde vleugels terwijl die pas in 1908 gebruikt zouden worden. Het probleem van dit model was dat er geen lichtgewicht motor was. Samen met een vriend heeft Henson later een schaalmodel gemaakt met een kleine stoommotor. Ze lieten van een heuvel afdraaien, maar het model bleef niet vliegen, dit kwam door het grote gewicht van de motor en onvoldoende draagkracht

van de vleugels. In die tijd werd er al sarcastisch over een gemotoriseerde glijvlucht gepraat. Henson emigreerde naar Texas zonder van zijn bijdrage aan de luchtvaart af te weten.

Stringfellow(1799-1883) ging door op de ontwerpen van Henson zijn lichte motor. Deze lichte motoren monteerde hij op een driedekker op basis van het model van Cayley. Al de testvluchten mislukte. Een aantal jaren heeft hij zich niet meer bezig gehouden met de luchtvaart tot hij in 1869 in Londen een model van een stoomvliegtuig presenteerde. In dit vliegtuig zaten alle kenmerken van Cayley en Henson verwerkt. Ook deze testvlucht mislukte.

Naar later bleek hebben ze met deze pogingen de gebroeders Wright ertoe gebracht om met boven elkaar geplaatste vleugels te werken. Ondanks dat de experimenten van Henson en Stringfellow mislukte hadden ze wel laten zien hoe het toekomstige vliegen eruit zou gaan zien. Ondanks dat nu toch wel was aangetoond dat het vliegen met vaste vleugels wel kon bleven de mensen het met vleugels aan hun armen proberen. De mensen bleven ervan overtuigd dat het klapperen van de vleugels bedoeld was voor de lift en niet voor de aandrijving.

Tegen het midden van de 19<sup>e</sup> verplaatste de ontwikkeling zich naar Europa. Een Franse marineofficier, Felix du Temple(1823-1890), bouwde ook een schaalmodel in 1857. Dit model werd aanvankelijk nog aangedreven door een propeller die aan een elastiek was bevestigd. Later probeerde hij het ook nog een keer met een kleine stoommotor, maar dat ging helemaal mis. Het toestel werd van een heuvel gelanceerd en ging gelijk naar beneden. In Rusland deden ze ongeveer hetzelfde en daar legde het toestel een paar meter door de lucht af. Aangezien er zoveel hulpmiddelen werden gebruikt, zoals van een heuvel afduwen, kon er nog niet van een gemotoriseerde vlucht worden gesproken. De grootste Franse pionier was wel Alphonse Penaud(1850-1880). Hij begon te experimenteren met helikopters maar stapte al snel over op vaste vleugels. Hij bouwde een toestel met een v-hoek tussen de vleugels en een stabilo. Dit toestel legde met een elastiek als aandrijving op een luchtshow in Parijs wel 40 meter af. Bij een ander ontwerp, dat nooit gebouwd is, had hij al allemaal dingen gemaakt die zijn tijd ver vooruit waren. Zo had het ontwerp een staart met richtings- en hoogteroer, een cockpit met een glazen dak, een intrekbaar onderstel met schopdempers en een hoogtemeter.

Al de schaalmodellen die tot dan toe waren gemaakt waren allemaal inherent. Dit houdt in dat ze van zichzelf al stabiel is. Het probleem was dat als er dan één tot een echt vliegtuig werd gebouwd en dan werd de grootte van de stabiliteit teveel overgenomen. Dit had als reactie dat het toestel slecht bestuurbaar en ongevoelig werd.



# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

In Europa bleven ze met dit probleem zitten totdat de gebroeders Wright de oplossing hadden gevonden. Het besturen van een toestel is een gecompliceerd geheel en dat moet niet alleen goed zijn, maar de mens moet er ook mee kunnen omgaan. De mens moet leren hoe te vliegen. Er stonden nog twee andere dingen het vliegen in de weg. Zo was er nog steeds geen lichtgewicht motor ontworpen, maar de vleugels leverde ook nog steeds niet genoeg lift. Ze waren niet efficiënt.

In 1866 presenteerde Francis Wenham(1824-1908) een artikel. Hierin schreef hij dat een vlakke plaat de meeste lift genereerde aan het voorste deel. Hij concludeerde dus dat je het beste een smalle vleugel kon hebben. Ook wees hij erop dat vogels een gewelfde vorm hadden. Hierbij zat het dikste stuk aan de voorkant. De toekomstige vleugels moesten dit dus ook hebben. Het probleem was dat ze niet wisten hoe die vorm moest zijn.

Later in de 19<sup>e</sup> eeuw werd dit principe verder uitgewerkt door Horatio Phillips (1845-1924). Hij zette als eerste verschillende vleugelprofielen in een windtunnel en bepaalde de lift/weerstandverhouding. Hij toonde aan dat, wat Cayley al vermoedde, een gewelfde vorm het meeste lift genereerde. Dit kwam door de lagere druk aan de bovenzijde. Hij kon dit niet verklaren met de wet van Bernoulli.

In de tijd daarna gingen de mensen weer meer naar de vormen van de vleugels van vogels kijken. Zo heeft een Franse scheepskapitein tijdens zijn vele reizen het vliegen van albatrossen bestudeerd. Later heeft hij een zweefvliegtuig gebouwd in de vorm van een albatros.

Hij heeft dit vliegtuig op een koets gezet en is er toen hard mee gaan rijden. Tot zijn grote verbazing koos het vliegtuig het luchtruim.

Een Duitse ingenieur, Otto Lilienthal(1848-1896), ging zich ook bezighouden met het zweven. Hij ging nog eens



goed kijken naar de vogels. Hij ging zich bezighouden met relatie tussen vleugeloppervlak en liftvermogen. Hij kwam er al snel achter dat je er met alleen maar theoretische kennis niet kwam en ging zo langzaam aan testvluchten doen. Hij maakte zo'n 2500 vluchten in 5 jaar tijd en sommige gingen tot een hoogte van 350 meter. Een jaar voordat hij dood ging had hij het over vleugeltippen om het vliegtuig mee te besturen. Ook maakte hij een zwever waaraan een harnas was gemaakt voor de piloot. Hiermee kon de piloot dan het vliegtuig besturen. Bij experimenten met dit idee werd hij gepakt door een windvlaag. Hij kwam tot stilstand in de lucht. Hij gooide zijn lichaam naar voren om de neus naar beneden te krijgen. Het mocht niet meer helpen, het vliegtuig overtrok en stortte neer. Deze vlucht was helaas zijn laatste. Lilienthal had grote invloed. Vlak voor zijn dood stond hij op het punt om een goed systeem te ontwerpen voor de besturing in de lucht. Als hij niet was overleden was hij zeker de eerste mens geweest die gevlogen had met een motor. In Engeland stond er ook iemand op het punt om

te gaan vliegen met een motor, maar ook hij kwam om met een zweefvlucht.

De ontwikkeling ging daarna niet snel meer in Europa. Daarom hebben de gebroeders Wright, uit Amerika, ook als eerste gevlogen met een gemotoriseerd toestel. De gebroeders realiseerde zich dat ze een piloot nodig hadden die wist wat hij moest doen. Dit in tegenstelling tot Langley(1834-1906). Hij had een toestel gemaakt met een motor erin. Toen hij het vliegtuig wilde testen bleef het haken in de lanceerinrichting. Als het toestel dat al wel had gehaald, had het waarschijnlijk ook niet gevlogen, want de piloot had nog nooit gevlogen. Hij wist dus niet hoe hij het vliegtuig in de lucht moest houden.

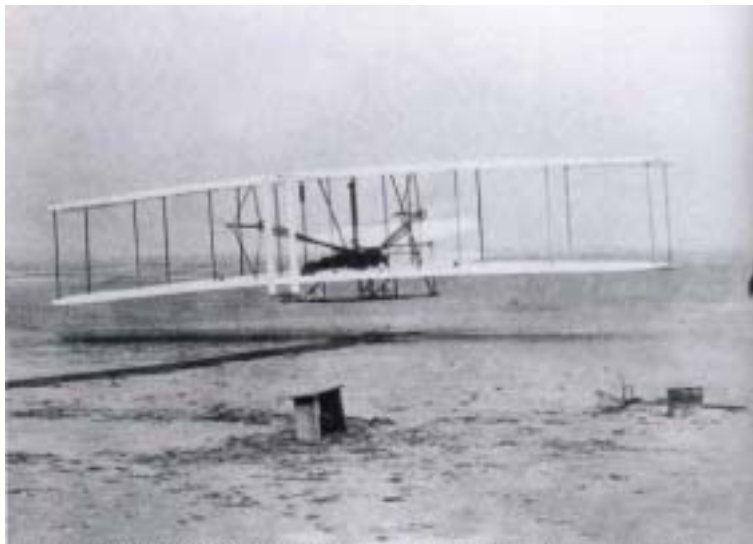
Door het steeds beter worden van de kennis van het vliegen werden de Wrights, Wilbur(1867-1912) en Orville(1871-1948), aangemoedigd om ook te gaan



# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

vliegen. Ze kwamen al snel tot de conclusie dat de vorige wetenschappers de besturing ongeschikt vonden aan de stabiliteit. Ook gingen ze kijken hoe een vogel in de lucht bleef na een windvlaag. Ze zagen dat de vogel zijn vleugeltip draaide. Ze veronderstelde dat als ze dat in een vliegtuig zouden bouwen dat het vliegtuig dan beter bestuurbaar zou worden. Ze noemde dit wing warp, tegenwoordig noemen we het vleugelwring. De vleugels moesten dus slap genoeg zijn om te draaien, maar sterk genoeg zijn om in de lucht te blijven. In het najaar van 1900 hadden ze hun model af. Ze lieten dit model aan een touw rondvliegen en zagen dat de wrong goed werkte en dat de stabiliteit niet te groot moest zijn. Bij hun tweede model ging het allemaal minder. Het toestel had de neiging om te veel te slippen. Ze begonnen te twijfelen aan de berekeningen van Lilienthal. Vanaf dat moment besloten ze om alleen nog maar op hun eigen onderzoeken te vertrouwen. Bij het derde model ging het weer fout. Als er een rolbeweging werd ingezet en de piloot wilde daar weer uitkomen lukte dat niet, het rollen werd zelfs verergerd. De wrongweerstand was te groot. Ze besloten hierop om het wrongmechanisme te koppelen aan het richtingsroer. Dit richtingsroer werkte de wrong tegen. Op deze manier kon de juiste stand van het vliegtuig in de lucht worden behouden. Dit was het succes van de gebroeders Wright. In het najaar van 1902 keerde ze terug van vele testvluchten en waren optimistisch. Ze wilden nu wel eens vliegen met een motor. Er was in die tijd nog steeds geen lichtgewicht motor en dus besloten ze om zelf ook maar een motor te ontwerpen. Het werd een motor met vier cilinders, watergekoeld, 12 pk en 90 kilo "licht". Er was ook nergens informatie te vinden over hoe een propeller eruit moest zien. Ze hebben hier ook onderzoek naar gedaan en hebben uiteindelijk ook een eigen propeller gemaakt. In de zomer van 1903 werd het eerste motorvliegtuig, de Flyer, gebouwd. Dit toestel was gebaseerd op hun laatste zweefvlieger alleen was het richtings- en hoogteroer dubbel uitgevoerd. Op 14 december was dan de dag aangebroken. Ze gooide een muntje op om te beslissen wie er mocht vliegen, het werd Wilbur. Toen het toestel werd gelanceerd maakte het een steile klim en stortte vervolgens neer. Wilbur had een te grote hoogteroer uitslag gegeven. De schade aan het toestel was gering. Na een paar dagen was het toestel opgeknapt. Op 17 december werd het nog een keer geprobeerd. Nu mocht Orville vliegen. De motor werd op toeren gebracht en schoot van het lanceerplatform af. Het toestel vloog 36.6 meter en bleef 12 seconden in de lucht. Het toestel had geen snelheid verloren tijdens de vlucht en was op dezelfde hoogte geland als waar hij was opgestegen.



*Dit was dan eindelijk de eerste gemotoriseerde vlucht van de mens.*

## Geschiedenis van de Boeing 747

Met de komst van steeds krachtigere motoren konden er eindelijk vliegtuigen worden ontwikkeld die groter waren en verder konden vliegen.

## Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

De eerste fabrikant die met zo'n groot toestel kwam was Boeing. Ze noemde hem de 747-100. Dit was allemaal in het jaar 1970. Bij de introductie van dit toestel waren er aanvankelijk alleen maar Pratt & Whitney motoren leverbaar op dit toestel, maar in 1975 waren er ook motoren van General Electric en Rolls-Royce. In totaal zijn er 250 toestellen van dit type geleverd. De laatste werd afgeleverd in 1986. Er zijn twee type passagierstoestellen uitgebracht in deze serie. De tweede is de 747-100B, dit toestel kan meer passagiers vervoeren dan zijn voorganger. Verder was er nog een toestel beschikbaar met een verstevigde huid structuur. Dit toestel is vooral



voor maatschappijen die veel starts en landingen moeten maken. Door het starten en landen gaat de stevigheid van het metaal verloren en is er meer kans op neerstorten. Om dit tegen te gaan heeft Boeing dus een verstevigde versie uitgebracht. Verder heeft Boeing ook nog de 747-100SP uitgebracht. Dit toestel was ontworpen om hoger te vliegen en dus ook sneller en het had grotere brandstoftanks zodat ze verder konden vliegen.

Hierna werd de 747-200 op de markt gebracht. Dit toestel is op hetzelfde frame gebouwd als de 747-100. Dit toestel werd uitgebracht in 1971. Er zijn er in totaal 393 afgeleverd; de laatste van dit type in 1991. Van de



buitenkant lijkt dit vliegtuig identiek aan de 747-100, maar dit vliegtuig is ontworpen om meer vracht te kunnen vervoeren. Bij deze serie was er ook een speciaal vrachtvliegtuig ontwikkeld. Hierbij is de neus zo gemaakt dat hij naar boven kan openklappen. Dit is makkelijk om de vracht in het toestel te brengen. Ook was er de optie om er een grote deur in de zijkant bij te bestellen. Ook is de 747-200 Convertible ontwikkeld. Deze is zo gemaakt dat hij als vracht-, passagier- of als beide tegelijk kan dienen. Dit vliegtuig voldeed goed aan de wensen van de luchtvaartmaatschappijen, want als er minder vracht was konden ze makkelijk meer passagiers vervoeren en natuurlijk andersom.

## Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

Het is logisch dat hierna de 747-300 op het toneel kwam. Deze serie zag het levenslicht in 1983. Bij deze serie zag je als eerste duidelijke veranderingen aan het vliegtuig. Zo was het bovendek langer gemaakt om meer passagier te vervoeren. Dit leverde 10 procent meer passagiers op. Aan de binnenkant was de trap naar het bovendek verandert. Eerst was het een wenteltrap en die is vervangen door een normale trap. Ook hangen er onder dit toestel andere motoren dan onder de vorige 2 series. Deze motoren leverde evenveel stuwkracht terwijl ze 25% minder brandstof gebruiken. Van deze serie zijn er in totaal 81 afgeleverd. De laatste is afgeleverd in 1990.

En dan zitten we bij het toestel wat Boeing op het moment bouwt, namelijk de 747-400. Dit vliegtuig kan je het duidelijkst onderscheiden van zijn voorgangers. Dit vliegtuig heeft namelijk winglets. Dit zijn de opstaande randen aan het einde van de vleugels. Ook onder dit toestel hangen weer andere motoren. Deze motoren zijn kleiner, zuiniger en stiller wat alles heeft te maken met de milieuwetgeving. Van deze serie staan er op dit



moment nog 17 in bestelling. Dit toestel zal niet meer worden vervangen. De opvolger is er al en is de 777. Dit toestel is kleiner, maar kan net zover vliegen en heeft maar 2 motoren. De luchtvaartmaatschappijen willen niet meer van die grote vliegtuigen, maar willen vaker vliegen met kleinere toestellen.



# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

## Verslag van het bezoek:

Op 23 december waren we op uitnodiging van Jan Stoffelen, van de KLM technische dienst, welkom op Schiphol Oost. Om 7 uur 's ochtends vertrokken we met de auto naar Schiphol. En om kwart over 8 kwamen we al op Schiphol, dus we moesten nog even wachten aangezien we om 9 uur bij de poort hadden afgesproken. Rond 9 uur waren we bij de poort en hebben we Jan gebeld dat we er waren. Na 5 minuten kwam hij eraan met zijn fiets en moesten we dagpassen gaan regelen. Van te voren hadden we onze paspoortnummers al door moeten geven. Toen we de dagpassen hadden zei Jan waar we konden parkeren en daar zou hij ons dan ook weer ontmoeten. Daarna werden we door Jan naar zijn kantoor begeleid. Hij zat in een gebouw waar de inspecties van de 737 wordt gedaan. Aangekomen in zijn kantoor kregen we een kop koffie / thee. Nadat we dat op hadden gedronken gingen we naar een opleidings-lokaal waar we uitleg kregen over de krachten op vliegtuigen.



Hierbij legde hij uit hoe de vleugels werken, hoe de straalmotor in elkaar zit en andere relevante informatie. De verkregen informatie hebben wij in dit werkstuk verwerkt.

Nadat we ongeveer 3 uur uitleg hebben gekregen over vliegtuigen gingen we lunchen. De catering zat ook in hetzelfde gebouw. Jan legde onder het eten nog uit wat de KLM allemaal doet voor andere maatschappijen en dat er steeds meer maatschappijen weggaan bij de KLM voor het onderhoud van hun toestellen. Ook schrokken wij van de bedragen die in de luchtvaart rondgaan. Zo kost een 737 rond de 100 miljoen gulden en kost een grote beurt van een vliegtuig rond de 1 miljoen gulden.

Nadat we de lunch op hadden gingen we onze jassen in het kantoor halen en kregen we een rondleiding. Eerst gingen we kijken bij een 737-900 die een modificatie kreeg. Vanwege de aanslagen in Amerika op 11 september 2001 moeten nu alle cockpitdeuren kogelwerend zijn. In dit toestel werd de cockpitdeur dus vervangen door een kogelwerende deur. Ze keken ook meteen de motoren na op gebreken. Na elke 500 vlieguren moet een toestel een A-inspectie ondergaan. Dit is een kleine beurt en hiervoor moet het vliegtuig een hele dag in de hangar staan voor de inspectie, je kunt dit vergelijken met een kleine beurt van je auto. Ook zijn er de C en D-inspectie. Bij de C-inspectie moet het vliegtuig een week in de hangar staan. Dit gebeurt na elke 5000 vlieguren. Bij deze inspectie controleren ze alle onderdelen nog beter. En dan de D-inspectie. Dit is meest ingrijpende inspectie. Dit moet na elke 26000 vlieguren. Hierbij wordt heel het vliegtuig tot op het frame uit elkaar gehaald en helemaal gecontroleerd. Het vliegtuig staat hier ook 4 weken voor in de hangar.



In de hangar waar wij het eerste waren stond er 1 vliegtuig voor de A-inspectie. Hierbij stond het vliegtuig op krikken en waren ze op het moment dat wij daar waren de motoren aan het controleren.

Ook hebben we nog even een kijkje mogen nemen in de cockpit van de 737-900 waar ze de cockpitdeur aan het vervangen waren.

Hier kregen we van een van de monteurs nog uitleg waar alle schakelaars en knoppen voor dienden. Verdere liet Jan de schokdempers van dit vliegtuig nog zien en ook de kasten waar de banden worden opgeborgen als het landingsgestel is ingetrokken. Bij alle

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl



vliegtuigen die daar in de hangar stonden waren alle flaps maximaal uitgezet. Verderop in de hangar stond ook nog een MD-11 van Northwest Airlines. In dit toestel mochten we helaas niet, omdat het geen eigendom van de KLM was. Bij dit toestel kon je bij de motoren duidelijk zien hoe de deflectors werken. De deflectors zorgen ervoor dat de stuwkracht niet naar achter gaat, maar naar voren. Dit gebruiken ze om af te remmen bij het landen. Bij weer een ander toestel liet hij ons zien hoe goed de motoren geluid dempen. Wij moesten met ons hoofd in de inlaat van de motor gaan hangen en dan praten. Het geluid werd heel erg gedemt. De werking van het dempen is heel simpel, aan de binnenkant van de inlaat zitten kleine gaatjes, daar gaat het

geluid doorheen. Als het geluid dan vervolgens tegen de buitenkant aanbotst wordt het teruggekaatst en zo gaat dat een tijd door totdat het geluid is geabsorbeerd.

Nadat we in deze hangar waren uitgekeken gingen we naar buiten om naar de hangar te gaan waar de grote vliegtuigen staan. Op de weg naar deze hangar liepen we nog langs de motorenafdeling van de technische dienst. Op deze afdeling kunnen ze een motor die gereviseerd moet worden weer op 0 zetten. Dit betekent dat ze hem eigenlijk weer nieuw afleveren met 0 kilometer op de teller. Na de uitleg van de motorenafdeling kwamen we bij de hangar met de grote vliegtuigen. Voor deze hangar stond al het toestel waarvoor we kwamen de 747-400. In dit geval was het een toestel van KLM Asia. Je kan ook zien dat het kroontje bij het logo weg is. Als ze het kroontje hadden laten staan zouden ze niet op een land mogen vliegen dat in Azië ligt, dit heeft te maken met het koninklijke van de KLM. Nu ze dit kroontje weg hebben gelaten hebben ze de regels omzeild en mogen ze wel op dat land vliegen.

Nadat we voor de foto hadden geposeerd gingen we de hangar in. We hadden geluk, want er stonden 3 vliegtuigen van het type 747. Ze stonden er allemaal voor een A-inspectie. Bij het eerste toestel kon je duidelijk zien hoe groot de flaps van een vleugel zijn. Als je goed kijkt kan je de vader van Martijn nog zien.

In de tijd dat wij naar de flaps aan het kijken waren was Jan aan het vragen of we het toestel ook van binnen mochten bekijken. Uiteindelijk mochten we het toestel in. We moesten wel plastic zakjes om onze schoenen heen doen, dit moest om het vliegtuig schoon te houden. We namen vervolgens meteen de trap naar boven richting de cockpit.

Het viel ons meteen op dat er veel minder knopjes inzitten dan in de 737. De meest relevante informatie wordt weergegeven op de beeldschermen en als de piloten iets anders willen weten dan kunnen ze ook nog in de menu's verder zoeken. Op het middelste scherm wordt de toestand van de motoren weergegeven.

Ook wordt er op dat middelste scherm de hoeveelheid brandstof per tank weergegeven. Dit wordt niet in liters maar in kilo's gegeven. Als de piloten dan merken dat er in 1 tank minder zit kan het toestel naar 1 kant hellen, aangezien de tanks in de buik en in de vleugels zitten. De piloot kan dan besluiten om brandstof over te pompen naar een andere tank om zo het toestel stabiel te houden. Als een piloot in een 747 gaat vliegen moet hij



## Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

zijn stoel altijd op dezelfde hoogte zetten. Dit komt omdat de cockpit 9 meter boven de grond hangt en de piloot moet weten wanneer het toestel aan de grond komt. Als hij dan zijn stoel altijd op dezelfde hoogte heeft krijgt hij een beter gevoel bij het landen. Nadat we in de cockpit klaar waren liet hij ons zien waar de stewardessen slapen tijdens zo'n lange vlucht. Achter in het passagiersgedeelte (het was een passagier-, vrachtvliegtuig) namen we een hele steile trap naar boven. Bovenin aangekomen zagen we 8 bedden voor de stewardessen. En dan de passagiers maar in zo'n stijve stoel slapen.

Toen we het toestel van binnen hadden bekeken gingen we weer terug naar het kantoor. Daar hebben we nog even koffie/thee gedronken. Tijdens de koffie kwam Jan aanzetten met een tas vol met materiaal voor ons werkstuk. Zo had hij een paar pagina's uit het handboek van een paar vliegtuigen gekopieerd. Ook had hij foldertjes uit het Aviodome gehaald met de geschiedenis van de luchtvaart, daar had hij ook nog een boek van de KLM technische dienst voor ons gehaald. Er zaten ook nog afbeeldingen van de instrumentaria in de 737 bij. Verder had hij nog voor ieder een schaalmodel van een toestel. Het waren 3 verschillende types, de 737, de 747 en de 767. Na dit allemaal te hebben gekregen hebben we hem hartelijk bedankt. Jan zei nog dat we hem altijd mochten lastig vallen met vragen en dat hij het leuk zou vinden als hij het uiteindelijke resultaat zou krijgen. We waren toen helemaal klaar en gingen naar huis. We besloten nog even bij een spotterplaats te gaan kijken hoe de vliegtuigen landden. Na een stuk of 10 toestellen hadden we het wel gezien en reden we aan.



# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---

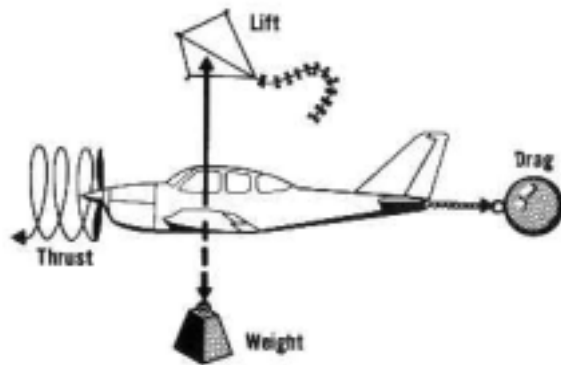
## Krachten op een vliegtuig

Op een vliegtuig werken vier verschillende hoofdkrachten, namelijk:

- lift
- zwaartekracht
- weerstand
- stuwkracht.

In de tekening hieronder zie je hoe de krachten op een vliegtuig werken.

Om een vliegtuig in de lucht te houden, hebben we een kracht naar boven nodig. Bij een vliegtuig is dit de liftkracht. Om dan ook nog naar voren te kunnen bewegen is er dan ook nog de stuwkracht. Met deze krachten kan een vliegtuig in de lucht blijven. We verdelen deze krachten in twee groepen: de verticale krachten (lift en zwaartekracht) en de horizontale krachten (weerstand en stuwkracht). Deze krachten werken niet altijd horizontaal of verticaal op het vliegtuig, maar in een rechtdoorgaande vlucht werken ze wel zo (zie tekening hierboven).



## Lift en zwaartekracht

Deze twee krachten zijn de belangrijkste krachten bij het vliegen. En dan vooral de liftkracht. Deze kracht is erg belangrijk om in de lucht te blijven en zullen we daarom vrij uitvoerig behandelen. Maar we zullen nu eerst beginnen met de zwaartekracht.

### Zwaartekracht

Allereerst gaan we de zwaartekracht behandelen. Dit is een kracht die loodrecht op het aardoppervlak staat. Deze kracht zorgt ervoor dat we op de grond blijven staan. Als we echter gaan vliegen is het niet handig om deze kracht te hebben. Zwaartekracht kunnen we met de volgende formule aanduiden:

$$F_z = m \cdot g$$

Op aarde geldt een valversnelling ( $g$ ) van ongeveer  $9,8 \text{ m/s}^2$ . Dit is niet overal op aarde hetzelfde doordat de aarde niet overal dezelfde afstand tot het middelpunt heeft (de aarde is bij de polen afgeplat).

De  $m$  in deze formule staat voor de massa waarop de zwaartekracht werkt. De zwaartekracht is dus helemaal niet zo moeilijk om uit te rekenen. Ook de richting van de zwaartekracht is duidelijk. Deze is namelijk recht naar beneden (loodrecht op het aardoppervlak).

### Liftkracht

Omdat er een zwaartekracht naar beneden werkt, hebben we een kracht naar boven nodig: de liftkracht. Deze kracht moet dus de zwaartekracht opheffen om ervoor te zorgen dat het vliegtuig in de lucht blijft.

### Druk

Maar hoe werkt deze liftkracht?

Hiervoor moeten we eerst gaan hebben over druk. Er zijn twee verschillende soorten druk:

Statische druk

Dynamische druk

Samen vormen deze de totaal druk.

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---

## Statische druk( $P_s$ )

Dit is de druk die loodrecht op een oppervlak staat. Deze druk moet zorgen voor de liftkracht.

## Dynamische druk( $P_d$ )

Dit is de druk die veroorzaakt wordt door de beweging van de luchtstroom. Deze druk hangt dus af van de snelheid waarmee de lucht beweegt.

## Totaaldruk( $P_t$ )

Dit is de som van de statische en de dynamische druk, oftewel:

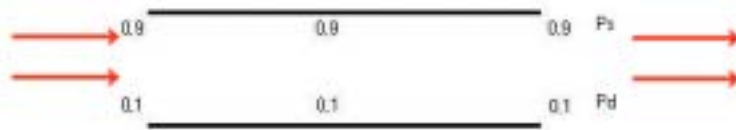
$$P_t = P_s + P_d$$

Onder normale omstandigheden blijft de totaaldruk gelijk. Onder deze omstandigheden is de  $P_d$  ongeveer 0,1 bar en de  $P_s$  ongeveer 0,9 bar. De totaaldruk is dan 1,0 bar.

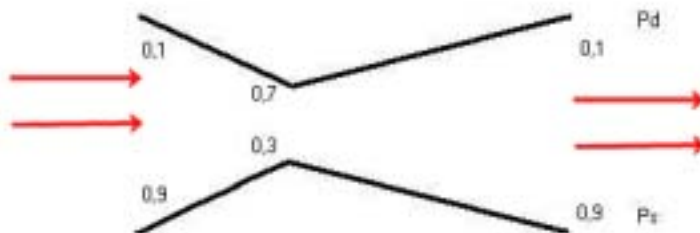
## Druk in een buis

We gaan nu kijken hoe de druk in een buis kan veranderen. We zullen beginnen met een rechte buis.

In het begin is de  $P_d$  ongeveer 0,1 bar en de  $P_s$  ongeveer 0,9 bar. Als lucht zich door de rechte buis gaat bewegen zal de snelheid gelijk blijven, omdat het een rechte buis is. De dynamische druk verandert dus niet. En omdat de totaaldruk gelijk blijft zal de statische druk ook gelijk blijven. In deze rechte buis gebeurt dus helemaal niks met de druk. Je kunt het verloop van de druk zien in de volgende tekening.



Nu gaan we kijken naar een buis die het eerste gedeelte convergeert(smaller worden) en het tweede deel divergeert(breder worden). Hieronder zie je een tekening hiervan.



Zoals je ziet verandert de verhouding tussen dynamische en statische druk. De totale druk blijft gelijk, omdat de omstandigheden niet zijn veranderd gedurende het passeren van de buis. Maar waarom verandert de verhouding tussen statische en dynamische druk dan?

Doordat de buis smaller wordt en er moet dezelfde hoeveel lucht doorheen als vooraan in de buis, zal de lucht er sneller doorheen moeten stromen, zodat er dezelfde hoeveelheid lucht per seconde doorheen gaat. Omdat de dynamische druk afhangt van de snelheid van de lucht zal de dynamische druk toenemen naarmate de lucht sneller gaat. En we hebben gezien dat de volgende formule geldt voor de totale druk:

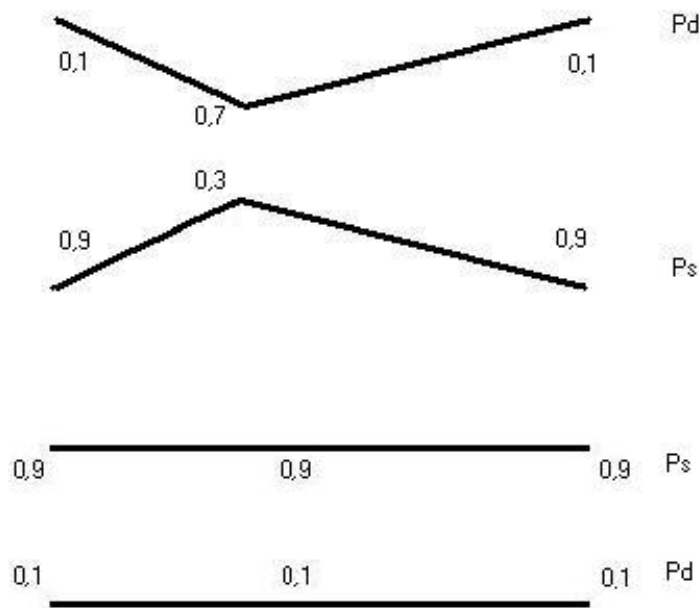
$$P_t = P_s + P_d$$

We weten dat de totaaldruk gelijk blijft, namelijk 1 bar. De dynamische druk is in dit geval 0,7 bar geworden. De statische druk zal dus zijn afgenomen tot 0,3 bar. Dat wil zeggen dat er een onderdruk heerst in het midden van deze buis.

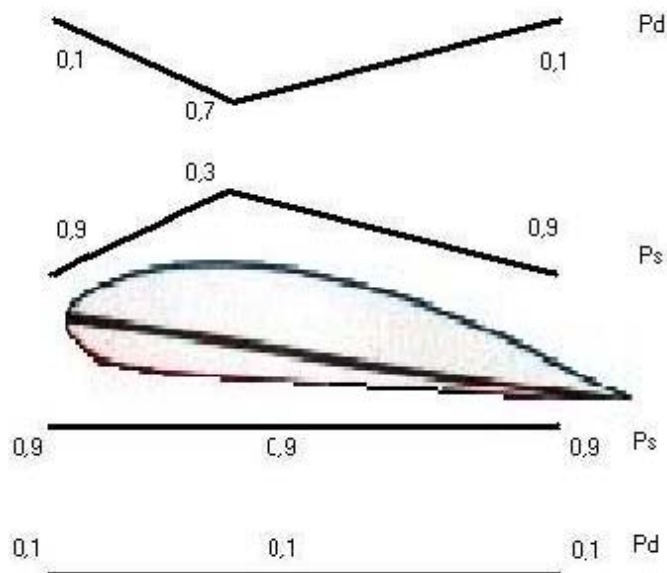
# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

We zetten nu deze twee buizen boven elkaar. We krijgen dan de volgende tekening:



En nu hebben we een vleugel getekend. Nu zul je zeggen: Een vleugel??????  
Ja dat klopt, want we zullen hem er nu intekenen.



De buizen stellen de luchtstroom boven en onder de vleugel voor. Onder de vleugel is de statische druk 0,9 bar. Boven de vleugel is de statische druk 0,3 bar. Er is dus sprake van een drukverschil. Er zal dus een kracht gaan werken. Deze kracht zal naar boven toe gericht zijn. We hebben dus bereikt wat we wilde bereiken, een kracht naar boven: de liftkracht.

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---

## Formule van de liftkracht

We hebben dus nu een kracht naar boven. Nu is het natuurlijk wel interessant om te weten hoe groot deze kracht is. Hiervoor moeten we een formule opstellen voor de liftkracht. De volgende formule kennen we al:

$$F = p * A$$

We kunnen dus de liftkracht berekenen door het verschil in statische druk te vermenigvuldigen met de oppervlakte van de vleugel. Hierbij is alleen één probleem. Hoe weten we wat het drukverschil is? Hierbij hebben we de wet van Bernoulli nodig.

## Wet van Bernoulli

De wet van Bernoulli luidt als volgt:

$$p + 0,5 * \rho * v^2 = \text{constant}$$

We definiëren de snelheid onder de vleugel als  $V$ . De snelheid boven de vleugel noemen we  $\alpha * V$ .  $\alpha$  moet in dit geval groter zijn dan 1, omdat de snelheid van de luchtstroom boven de vleugel groter moet zijn dan onder de vleugel, anders is er geen sprake van drukverschil en is er geen lift. We noemen de druk onder de vleugel  $p_{\text{onder}}$  en de druk boven de vleugel  $p_{\text{boven}}$ . Nu kunnen we de formule opnieuw invullen.

$$p_{\text{onder}} + 0,5 * \rho * V^2 = p_{\text{boven}} + 0,5 * \rho * (\alpha * V)^2$$

Dit kunnen we als volgt uitwerken:

$$p_{\text{onder}} - p_{\text{boven}} = \Delta p = 0,5 * \rho * \alpha^2 * V^2 - 0,5 * \rho * V^2 = (\alpha^2 - 1) * 0,5 * \rho * V^2$$

We weten nu hoe we het drukverschil moeten berekenen. Hiermee kunnen we dan ook de formule voor de liftkracht afleiden:

$$F_L = \Delta p * A = (\alpha^2 - 1) * 0,5 * \rho * V^2 * A$$

De oppervlakte van de vleugel wordt vaak aangeduid met de letter  $S$ . Het deel  $\alpha^2 - 1$  wordt de liftcoëfficiënt genoemd. Deze wordt aangeduid met de letter  $C_L$ . De uiteindelijke liftformule luidt dus:

$$F_L = C_L * 0,5 * \rho * V^2 * A$$

We kunnen nu met deze formule de eenheid van de liftcoëfficiënt bepalen. Dit doen we als volgt:

$$\text{kg} * \text{m/s}^2 = C_L * \text{kg/m}^3 * (\text{m/s})^2 * \text{m}^2$$

Als je dit verder uitwerkt kom je tot de conclusie dat de liftcoëfficiënt geen eenheid heeft. Het is dus gewoon een getal, maar let op het is geen constante. De liftcoëfficiënt houdt namelijk af van de invalshoek van het vliegtuig en het vleugelprofiel. Hier gaan we het nu over hebben.

## Liftcoëfficiënt

Eerst gaan we het hebben over het vleugelprofiel. Een vleugel kan er als volgt uitzien



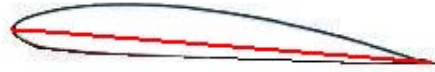
Bij een vleugel kan je de bijbehorende koorde en skeletlijn tekenen. De skeletlijn kunnen we als volgt tekenen. In de vleugel teken je cirkels zo dat de cirkel de boven en onderkant raakt. Als je dan alle middelpunten van de cirkels met elkaar verbindt krijg je de skeletlijn. De skeletlijn is dus de lijn die midden door de vleugel loopt. Je kunt hiermee de vorm van de vleugel als lijn weergeven. Dit zie je in de volgende tekening.



# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

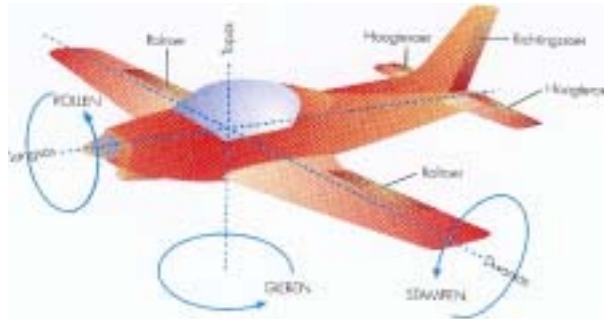
Ook kunnen we de koorde van de vleugel aangeven. De koorde verbindt de voorkant van de vleugel met de achterkant. Je neemt de uiteindes en verbindt die met elkaar. Dit is de koorde. In de volgende tekening is de koorde met een rode lijn aangeven



De koorde geeft aan onder welke hoek de vleugel staat. Dit moeten we gebruiken bij het berekenen van de invalshoek.

Er zijn heel veel verschillende vleugelprofielen en elke heeft weer een andere koorde en skeletlijn. Dit zorgt weer voor een andere liftcoëfficiënt en andere eigenschappen, maar we gaan hier verder niet op in.

Nu gaan we het hebben over de invloed van de invalshoek op de liftcoëfficiënt. Hiervoor brengen we drie verschillende assen aan in het vliegtuig. In de onderstaande tekening zie je hoe de verschillende assen door het vliegtuig lopen.



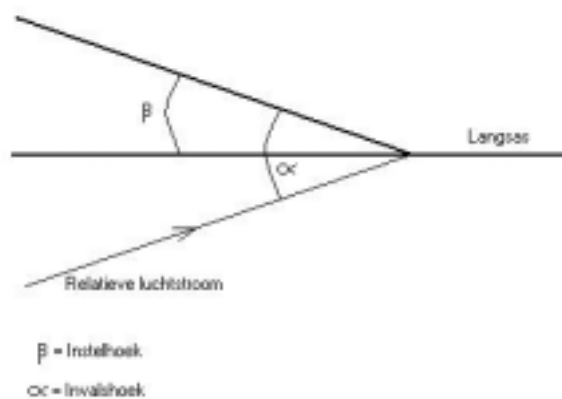
Voor de invalshoek kijken we alleen naar de langsas. De invalshoek hangt af van de volgende punten:

De koorde

De langsas

Relatieve luchtstroom(richting waarin je vliegt)

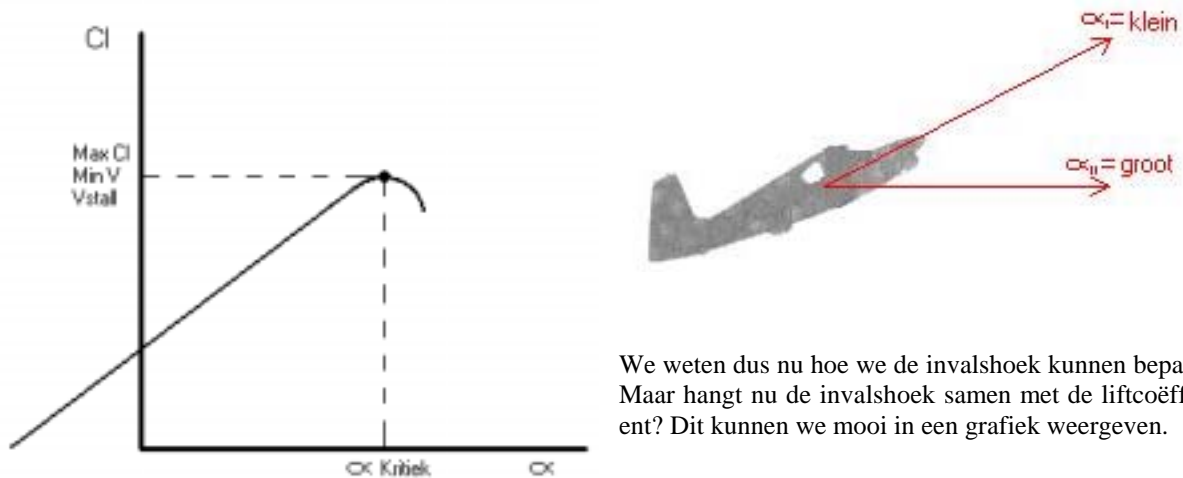
We kunnen dit verband in de volgende tekening weergeven



De bovenstaande tekening kan je ook als volgt weergeven. Hierin stellen de pijltjes de richting voor waarin bewogen wordt.

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl



Aan deze grafiek kan je zien dat hoe hoger de invalshoek is, hoe hoger de liftcoëfficiënt is. Maar na een bepaalde invalshoek daalt de waarde van de liftcoëfficiënt weer. De invalshoek waarbij dit gebeurt noemen we de kritieke invalshoek. Als de liftcoëfficiënt zover is gedaald, omdat de invalshoek groter is dan de kritieke invalshoek, dan spreken we van stall. Op dit verschijnsel komen we later nog terug. Eerst gaan we het nog hebben over flaps en slats.

## Flaps en slat

Flaps en slats zitten beide aan de vleugel. De flaps zitten aan de achterkant van de vleugel en de slats zitten aan de voorkant. De flaps en de slats zorgen ervoor dat de liftcoëfficiënt wordt vergroot. Ook zal de kritieke invalshoek daardoor veranderen. Deze extra hoeveelheid lift is zeer handig bij het opstijgen en bij het landen. Bij deze twee gebeurtenissen worden dan ook vaak de flaps en slats gebruikt. In de volgende foto kan je duidelijk het

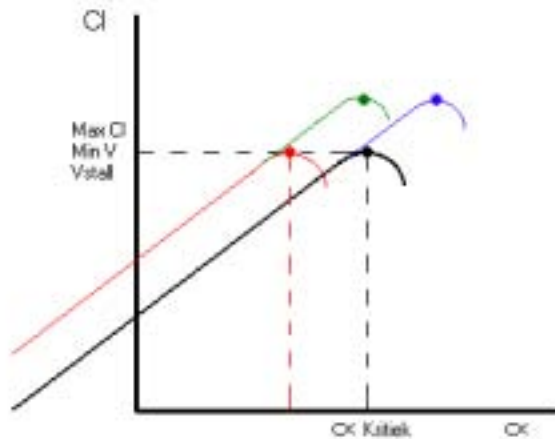


verschil zien tussen een “schone” vleugel en een vleugel waarbij de flaps uitstaan.

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

We kunnen het verschil tussen een "schone" vleugel en een vleugel met flaps en slats ook schematisch weergeven.



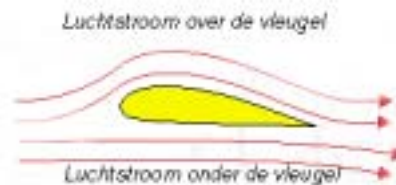
- = "schone" vleugel
- = met flaps
- = met slats
- = met flaps en slats

Het effect van deze flaps en slats op de liftcoëfficiënt kunnen we in de voorgaande grafiek erbij tekenen. De grafiek ziet er dan als volgt uit.

De flaps zorgen ervoor dat de liftcoëfficiënt hoger wordt, maar ook dat de kritieke invalshoek kleiner wordt. De slats zorgen ervoor dat de kritieke invalshoek groter wordt. Maar waarom is er sprake van een kritieke invalshoek? Wat gebeurt er als je die overschrijdt?

## Stall

Om uit te leggen wat stall is moeten we eerst uitleggen hoe de lucht over de vleugel stroomt. Bij kleine invalshoeken volgt deze luchtstroom de vorm van de vleugel. Dat kan je in de volgende tekening zien.



Waarom stroomt de lucht mooi over de vleugel en gaat hij er niet gewoon overheen? Hiervoor moeten we de vleugel van dichtbij bekijken. Dit ziet er dan als volgt uit.



Je ziet dat als je van dichtbij kijkt dat de vleugel niet vlak is. In het metaal zitten hele kleine kuilen. In deze kuilen gaan luchtmoleculen zitten. Deze hebben dan een snelheid van 0 m/s. Als de luchtmoleculen hierlangs stromen worden deze moleculen aangetrokken door de stilstaande moleculen. Hierdoor volgen deze moleculen de vorm van de vleugel. We noemen deze laag van moleculen: de grenslaag. De grenslaag zit dus om de vleugel heen.

Maar wat gebeurt er nu in een stall?

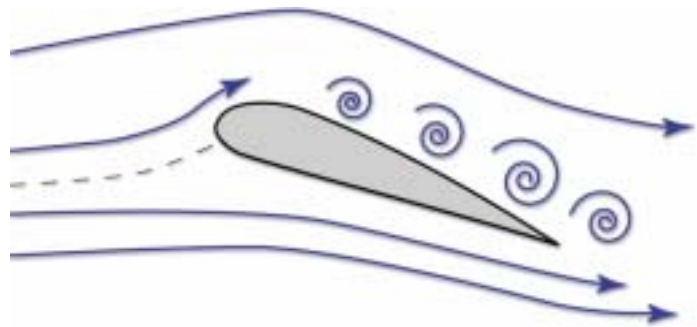
In een stall is de invalshoek zo groot dat de langsstromende moleculen niet sterk genoeg meer worden aangetrokken om de vorm van de vleugel te blijven volgen. De grenslaag laat dus los. Dit kan je in de volgende tekening zien.

## Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---

De vleugel zal minder lift leveren, omdat de snelheid van de luchtstroom boven de vleugel niet zal veranderen. Er ontstaat dus als het ware ook een rechte buis boven de vleugel. Er is geen drukverschil meer en er zal minder lift zijn.



We hebben alles heel algemeen uitgelegd. We hebben volgens de wet van Bernoulli. Hier zitten echter nog een paar addertjes onder het gras. Want het bewijzen van de geïnduceerde weerstand is praktisch onmogelijk met deze methode. Hier gaan we niet verder op in.

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---

## Weerstand en stuwkracht

Nu gaan we de horizontale krachten op een vliegtuig behandelen. Dit zijn de weerstand en stuwkracht. De stuwkracht zorgt ervoor dat het vliegtuig naar voren gaat en weerstand werkt de stuwkracht tegen. We zullen beginnen met de weerstand.

### Weerstand

De weerstand is een kracht die het bewegen van een object tegenwerkt. Deze kracht wordt ook wel de wrijving genoemd. Er zijn drie verschillende soorten wrijvingen:

- Luchtwrijving
- Rolwrijving
- Schuifwrijving

Bij het vliegen hebben we alleen te maken met luchtwrijving. Deze luchtwrijving werkt bijna hetzelfde als de liftkracht. Het drukverschil wordt alleen iets anders veroorzaakt. Omdat het object beweegt drukt het de lucht voor zich in elkaar. Daardoor ontstaat er voor het object een hogere druk dan achter het object. Achter het object zal een lage druk ontstaan, omdat de lucht daar niet kan komen (er zit een object voor). En deze zorgt er dan weer voor dat er een kracht gaat werken tegen de beweging van het object in. Omdat de weerstand bijna hetzelfde werkt als de liftkracht is de formule ook bijna hetzelfde, namelijk:

$$F_w = C_w * 0,5 * \rho * V^2 * A$$

Het enigste verschil is dat er in plaats van een liftcoëfficiënt nu sprake is van een weerstandcoëfficiënt. Hier gaan we het nu over hebben.

### Weerstandcoëfficiënt

De weerstandcoëfficiënt hangt van een aantal dingen af. Eén van de belangrijkste dingen waar deze weerstandcoëfficiënt van afhangt, is de vorm van het object (stroomlijning). Hieronder zie je hoe de lucht langs een cilinder stroomt. Zoals je ziet ontstaat er achter het object een lage druk. Door het grote drukverschil heeft hij een grote weerstand.



Hieronder is te zien hoe lucht om een druppelvorm heen stroomt. Hier is te zien dat er achter de druppelvorm dezelfde druk heerst als ervoor. Omdat er bijna geen drukverschil is, heeft de druppelvorm een kleine weerstand.



De vleugels van een vliegtuig hebben een druppelvorm, zodat het vliegtuig minder weerstand ondervindt en dus zuiniger werkt.

Nu gaan we het hebben over de stuwkracht.

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---

## Stuwkracht

De stuwkracht wordt geleverd door de motor van het vliegtuig. Bij een vliegtuig is dit vaak een straalmotor. Een straalmotor is onder te verdelen in verschillende compartimenten, namelijk;

- Inlaat
- Compressor
- Verbrandingskamer
- Turbine
- Uitlaat

In een schema kan je dit als volgt weergeven:



We beginnen met de inlaat

## Inlaat

De inlaat is de eerste schakel in de straalmotor. De lucht komt hier naar binnen. Maar de inlaat zit er niet voor niets op. Zo is een inlaat divergerend zodat de dynamische druk omlaag wordt gebracht. En daardoor de statische druk omhoog. Ook moet de inlaat ervoor zorgen dat de lucht turbulentvrij wordt aangeboden aan de compressor. Het is hierbij ook belangrijk dat er een juiste hoeveelheid lucht wordt doorgegeven aan de rest van de motor. Hier zorgt de inlaat ook nog voor. In de tekening hieronder is te zien hoe de inlaat eruit ziet.



## Compressor

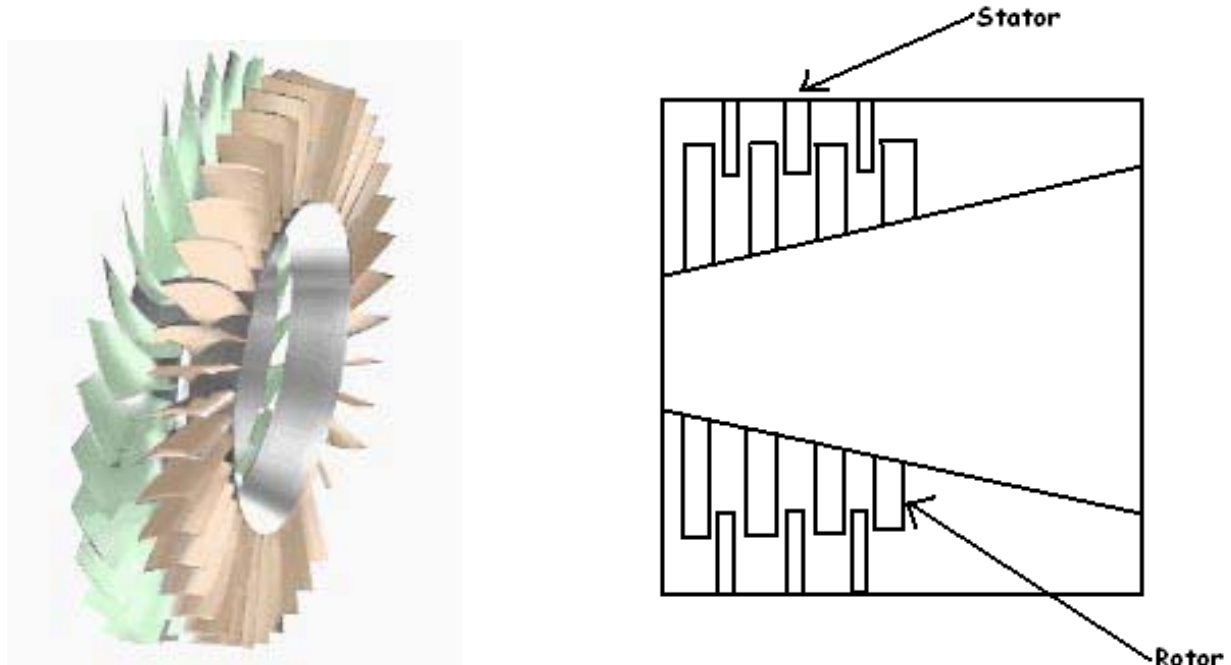
De volgende stap in de motor is de compressor. In de compressor zijn stators en rotors aanwezig. De rotor is een soort schroef die de lucht versneld. De dynamische druk neemt dus toe en de totaal druk neemt ook toe, de statische druk blijft gelijk. Als de lucht dan één rotor heeft gehad komt het aan bij een stator. De stator zorgt ervoor dat de lucht wordt vertraagd. De dynamische druk neemt dus weer af, maar de totaal druk blijft gelijk. De statische druk is dus toegenomen. Na een rotor en een stator is de statische druk dus verhoogd. Deze lucht gaat weer naar de volgende rotor. Hier wordt het weer versneld waarbij de totaal druk toeneemt. Daarna komt het weer bij een stator waar de snelheid weer wordt verminderd wat tot gevolg heeft dat de statische druk weer is

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---

toegenomen. Dit wordt een aantal maal herhaald. Bovendien is de doortocht ook nog een divergerend wat de statische druk ook nog eens verhoogd. Hieronder is een rotor en een stator weergegeven. De bruine is de stator.



Een schematische weergave van de compressor is hierboven weergegeven.

Nadat de lucht in de compressor is geweest gaat het naar de verbrandingskamer. Er gaat echter maar een kwart van de lucht die van de compressor afkomt naar de verbrandingskamer. De rest van de lucht wordt om de motor heengeleid.

## Verbrandingskamer

In de verbrandingskamer wordt de lucht met een hoge druk samen met brandstof ontstoken. Maar voordat het in de verbrandingskamer komt moet de lucht eerst met de brandstof worden gemengd. Dit gebeurt door de swirlfan. Deze draaien rond waardoor de lucht gaat ronddraaien. Ondertussen wordt er ook nog brandstof bij gespoten. Door het ronddraaien van de lucht, mengt de lucht en de brandstof goed. Een ander voordeel van de swirlfan is dat hij de snelheid van de lucht verlaagd. Als de snelheid namelijk te hoog is kan de ontstekingsvlam uitgaan. Als het allemaal goed is gemengd gaat het naar de verbrandingskamer. Hier wordt het mengsel ontstoken. Door het verbranden zet de lucht uit en gaat snel naar achteren. Hier komen we dan bij het volgende deel van de motor.

## Turbine

De lucht met een hoge snelheid die uit de verbrandingskamer komt, komt aan bij de turbine. De turbines zijn omgekeerde rotors. Doordat de lucht er langs stroomt gaat de turbine draaien. Deze turbine is verbonden met een drijfstaag die de door de motor naar de compressor loopt. Dus de turbine drijft de compressor aan. Deze zorgt er dan weer voor dat er nieuwe lucht de motor inkomt. En zo blijft de motor draaien. En dan is er als laatste nog de uitlaat.

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

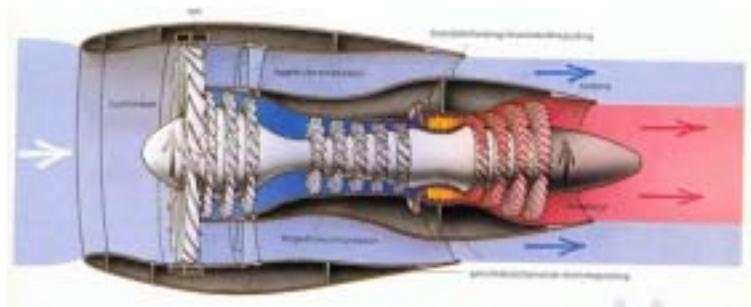
---

## Uitlaat

De uitlaat zit aan het einde van de straalmotor. Deze is convergerend en zorgt ervoor dat de snelheid van de lucht weer toeneemt. Zo krijg je dus nog extra stuwkracht.

Als je al deze stukken bij elkaar voegt krijg je een straalmotor. Die ziet er dan ongeveer als volgt uit.

Voor meer afbeeldingen van een straalmotor zie de bijlagen.



Zoals je ziet zijn er twee verschillende soorten compressors. Dit is ook het geval voor de turbines. Je hebt twee verschillende soorten compressors, namelijk: het lage druk en het hoge druk systeem. Dit is ook het geval bij de turbines. Hier heb je ook een hoge en een lage druk turbine. De lagedrukcompressor is verbonden met de lagedrukturbine doormiddel van een drijfvas. Deze zitten beide aan de uiteindes van de motor, waar de druk het laagst is. We noemen dit het N1-systeem. De hogedrukcompressor is op zijn beurt weer verbonden met de hogedrukturbine. Deze zitten beide aan de binnenkant en noemen we het N2-systeem. Het starten van zo'n motor gaat niet eenvoudig. Hij gaat niet zomaar draaien. Om de motor te starten moet je ervoor zorgen dat het N2-systeem snel genoeg draait zodat er genoeg lucht door de motor stroomt. Dit gebeurt met de startermotor. Als de druk dan ook nog hoog genoeg is kan er een ontsteking plaatsvinden. Als dat is gebeurt schakelt de startermotor uit en draait de motor op eigen kracht.

Maar hoe levert de motor nu stuwkracht?

De stuwkracht van een straalmotor wordt niet alleen geleverd door de verbrandingskamer. Het is zelfs zo dat 90% van de stuwkracht geleverd wordt door de grote fan in het begin van de motor (lagedrukcompressor).

Waarom zorgt deze nu voor stuwkracht?

Dit komt door de derde wet van Newton. De fan duwt de lucht de motor in. De lucht duwt dan op zijn beurt de fan naar voren. Aangezien de fan aan het vliegtuig zit krijgt het vliegtuig een kracht naar voren, de stuwkracht. De stuwkracht hangt af van de hoeveelheid lucht die door de motor heen gaat. Met andere woorden, hij hangt af van de massa lucht die door de motor heen gaat. En de stuwkracht kan je dan simpel berekenen met de formule

$$F = m * a$$

De versnelling(a) is in dit geval gelijk aan:

$$a = v_j - v_i$$

$v_j$  is in dit geval de uitlaatsnelheid(de snelheid waarmee de lucht uit de motor stroomt).  $v_i$  is dan de vliegsnelheid, oftewel de snelheid waarmee de lucht de motor instroomt.

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---

## Besturing van het vliegtuig

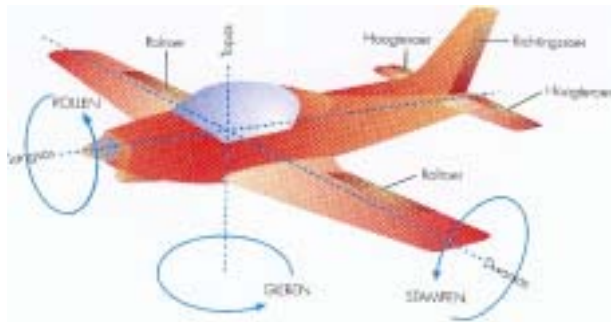
We hebben nu gezien hoe de krachten op een vliegtuig ervoor kunnen zorgen dat het vliegtuig in de lucht blijft. Maar nu hebben we nog een probleem. We kunnen niet sturen. Een vliegtuig zonder besturing is als een in de lucht geschoten projectiel. Om te kunnen bepalen waar we heen gaan, moeten we het vliegtuig kunnen besturen. We moeten het vliegtuig dan kunnen draaien. Hoe doen we dit.

### Assen

Een vliegtuig heeft drie verschillende assen waar hij om kan draaien. De verschillende assen heten:

- Langsas: De as die loopt van de neus naar de staart.
- Topas: De as die van boven naar beneden loopt
- Dwarsas: De as die van de linkervleugel naar de rechtervleugel loopt.

Hieronder kun je een tekening zien van de verschillende assen.



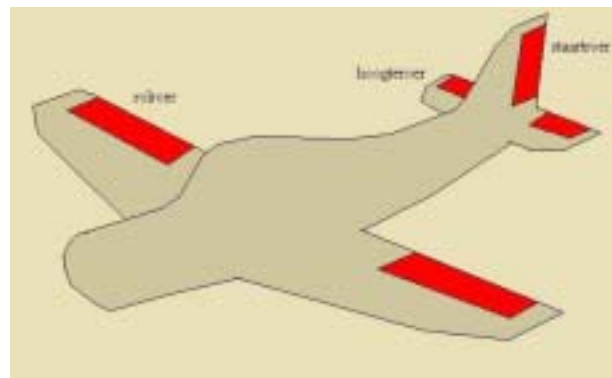
We kunnen dus om de langsas, dwarsas en de topas draaien. Draaien om de langsas noemen we rollen. Draaien om de dwarsas noemen we stampen en draaien om de topas noemen we gieren. Maar hoe kunnen we er nu voor zorgen dat het vliegtuig om deze assen gaat draaien? Hier hebben we roeren voor nodig.

### Roeren

Een vliegtuig heeft 3 verschillende roeren:

- Rolroer of aileron
- Hoogteroer
- Richtingsroer of staartroer

In de tekening hiernaast kun je zien waar deze roeren zitten.



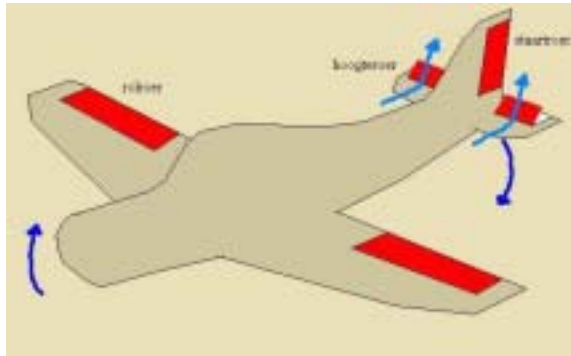
We zullen de verschillende draaibewegingen apart behandelen.

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

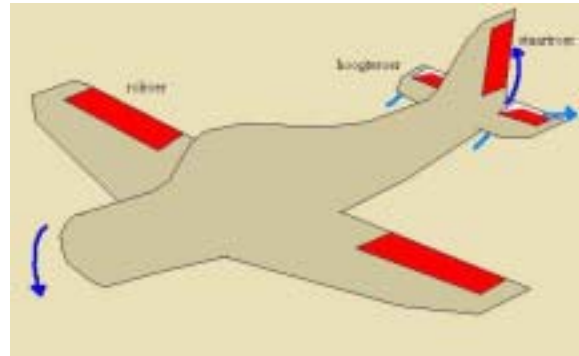
Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

## Stampen

Je kunt deze beweging ook klimmen of dalen noemen. Deze beweging wordt veroorzaakt door de hoogteroeren. Je kunt dit zien in de volgende tekeningen.



**klimmen**



**dalen**

W

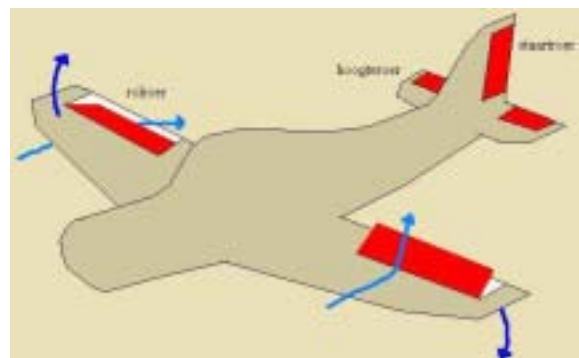
e zullen even precies uitleggen wat er gebeurt. Bij het klimmen worden de rolroeren naar boven gezet. Hierdoor wordt er door de hoogteroeren lucht naar boven geduwd. Volgens de derde wet van Newton moet er dan een reactiekracht worden uitgeoefend op de staart van het vliegtuig. Deze reactiekracht is in dit geval naar beneden gericht. De staart wordt dus naar beneden gedrukt. Volgens de momentenwet zal het vliegtuig hierdoor met de neus omhoog draaien. Dalen werkt precies hetzelfde maar dan andersom.

## Rollen

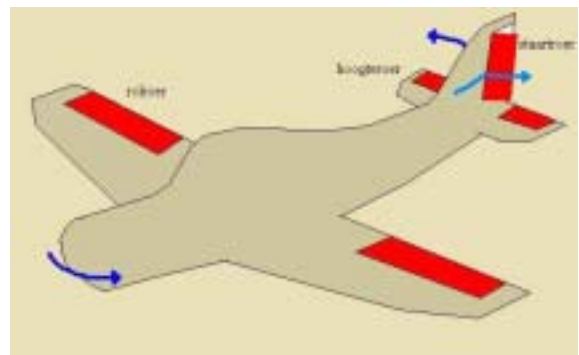
Deze beweging wordt veroorzaakt door de rolroeren. Deze zitten op de vleugel. Deze rolroeren worden ook wel ailerons genoemd. Bij grote vliegtuigen zitten er meestal twee ailerons op één vleugel. De ene zit dan dicht bij de romp dan de andere. We spreken dan van een inner en outer aileron. Dit is nodig, omdat met hoge snelheden de buitenste ailerons het vliegtuig te snel laten draaien. Ze schakelen dan over op de binnenste ailerons. Deze laat het vliegtuig dan minder snel rollen, omdat de arm van de kracht dan niet zo groot is. Hierdoor is het moment van de kracht kleiner en zal het vliegtuig dus minder snel draaien.

In de volgende tekening kun je zien hoe het rollen werkt.

Zoals je in de tekening kunt zien, wordt er een rolroer omhoog gedraaid en de andere naar beneden. Het werkt dan hetzelfde als het hoogteroer. Waar het roer omhoog staat, wordt de vleugel omlaag geduwd en waar het roer naar beneden staat, wordt de vleugel omhoog geduwd. In dit geval komt er een kracht naar beneden op de linkervleugel en een kracht omhoog op de rechtervleugel. Volgens de momentenwet gaat het vliegtuig dan linksom rollen. Om naar rechts te rollen, moeten we het rechterroer omhoog zetten en het linkerroer omlaag.



**rollen**



**gieren**

## Gieren

Gieren wordt gedaan met behulp van het richtingsroer of staartroer. (zie tekening hiernaast) Dit roer wordt vaak niet gebruikt in de lucht. Hij wordt alleen gebruikt om het gieren een beetje tegen te gaan. Kleine vliegtuigen gebruiken het richtingsroer wel soms, maar grote vliegtuigen meestal niet.

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

In feite werkt het richtingsroer weer hetzelfde. Het roer wordt naar links of naar rechts gezet. In de tekening is dat naar links. Hierdoor wordt de staart naar rechts geduwd. En volgens de momentenwet gaat het vliegtuig dan naar links draaien. Naar rechts draaien werkt hetzelfde maar dan andersom.

## De staart van het vliegtuig

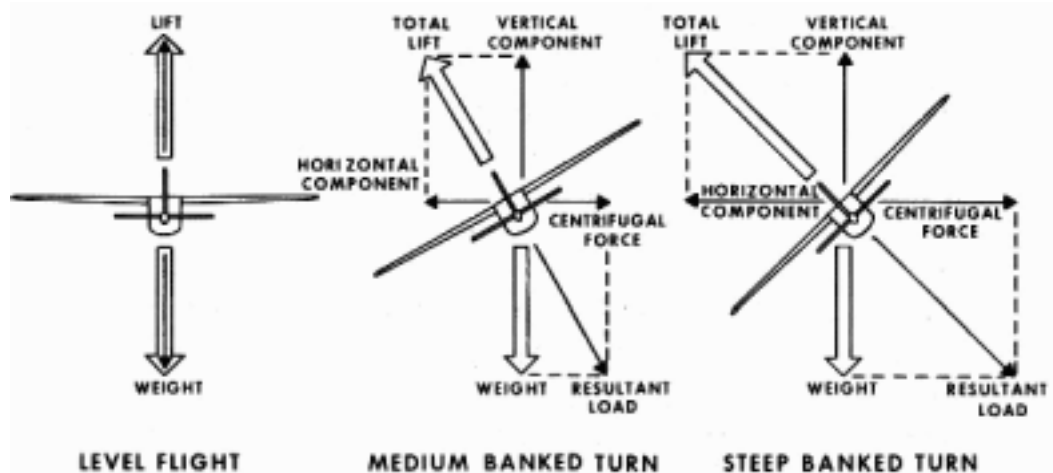
Op de staart zitten dus twee verschillende roeren om het vliegtuig te besturen, maar dit is niet de enigste functie van de staart van het vliegtuig. Hij zorgt namelijk ook voor stabiliteit. Hij zorgt er namelijk voor dat het vliegtuig naar beneden draait als hij aan het vallen is en dat het vliegtuig een bocht maakt als hij zijwaarts aan het bewegen is.

Dit komt door het volgende. Als een vliegtuig aan het vallen is, terwijl het vliegtuig nog recht in de lucht hangt, botsen er luchtmoleculen tegen de onderkant van de staart. Dit gebeurt natuurlijk overal op het vliegtuig, maar door de staart botsen er meer luchtmoleculen achter het zwaartepunt van het vliegtuig. De kracht op het vliegtuig achter het zwaartepunt is dus groter dan voor het zwaartepunt. Hierdoor zal het vliegtuig dus naar beneden draaien. Zo werkt het ook in een bocht. Het vliegtuig draait dan in de richting waar het vliegtuig naar toe beweegt. Het vliegtuig is in dat opzicht hetzelfde als een dartpijlje. Die draait ook altijd in de richting waarin hij beweegt. Hierdoor zal hij altijd met zijn punt naar voren willen bewegen.

## Bochten

Je hebt eerder al kunnen lezen dat een groot vliegtuig geen gebruik maakt van zijn richtingsroer in de lucht. Maar hoe kan hij dan een bocht maken?

Dit doet hij door te rollen. Na het rollen zal het vliegtuig automatisch een bocht maken. Maar hoe werkt dat dan? Dit kun je zien aan de volgende tekening.



De richting van de liftkracht hangt af van de rolhoek. Dit kun je zien in de tekening. Door te rollen verandert de vector van de liftkracht. De liftkracht staat dan ook loodrecht op het vleugeloppervlak. Voor het maken van een bocht is dit heel handig.

In de tekening kun je zien dat je de liftkracht kunt ontbinden in een horizontale en een verticale component. Bij het maken van een bocht is de horizontale component van belang. Deze zorgt namelijk voor een centripetale kracht. Door deze centripetale kracht zal het vliegtuig een bocht maken. Je hebt bij het maken van een bocht dus helemaal geen richtingsroer nodig.

Bij het maken van een bocht daalt het vliegtuig ook een beetje (de verticale component van de liftkracht wordt kleiner). Daarom wordt vaak ook het hoogteroer gebruikt in een bocht. Zo kunnen ze de neus omhoog houden.

Een vliegtuig kan dus met behulp van zijn roeren bestuurd worden. Dit is het grootste verschil met een luchtballon. Een luchtballon kan ook vliegen, maar hij kan niet worden bestuurd. De richting waar hij in beweegt, hangt af van de windrichting. Daarom is het vliegtuig nu ons belangrijkste vervoermiddel door de lucht. Met een vliegtuig kun je overal heen vliegen. Hier wordt dan ook veel gebruik van gemaakt bij de luchtvaart van tegenwoordig.

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---

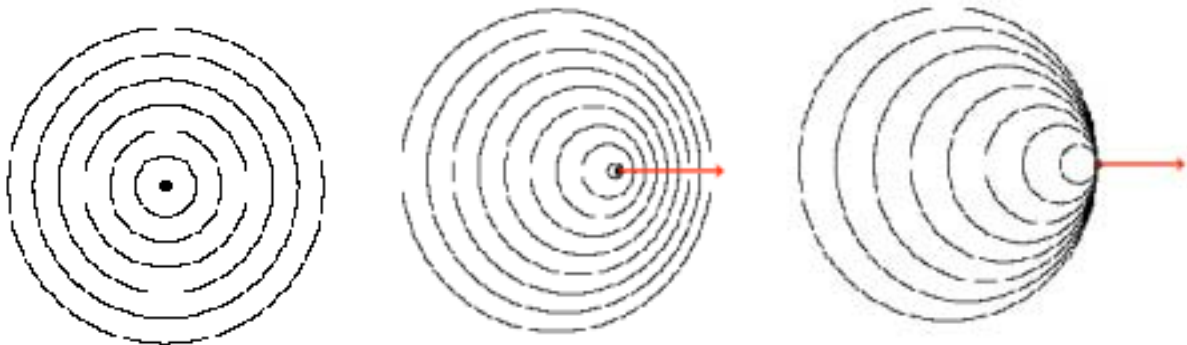
## De “coffin corner”

Tijdens de tweede wereldoorlog werd duidelijk dat je niet zomaar sneller kon vliegen dan de snelheid van het geluid. Door de schok die het vliegtuig krijgt bij het doorbreken van de geluidsbarrière viel het vliegtuig gewoon in stukken uiteen. Daarom werd het ook de geluidsbarrière genoemd. In die tijd dacht men dat je deze barrière onmogelijk kon doorbreken. We weten nu wel beter. Maar toch zijn de commerciële vliegtuigen van tegenwoordig er niet op gebouwd om door deze barrière heen te breken. Dit kan in sommige gevallen zorgen voor problemen.

## Geluidsbarrière

Hierboven zie je een vliegtuig die door de geluidsbarrière heen gaat. Je ziet een duidelijke rookwolk aan de achterkant van het vliegtuig. Deze rookwolk wordt veroorzaakt door een enorme schok. Deze schok komt voor als je de geluidsbarrière doorbreekt. Maar waarom is er dan zo'n enorme schok?

Een vliegtuig zendt constant geluidsgolven uit. Deze golven zorgen ervoor dat wij het vliegtuig kunnen horen. Hieronder zie je een weergave van de golven die het vliegtuig uitzendt.



In dit geval beweegt het vliegtuig niet. Als het vliegtuig wel beweegt, kunnen de geluidsgolven er als volgt uitzien.

Aan dit plaatje kun je zien dat bij het golffront de golven dichter op elkaar zitten. Wat gebeurt er nu als het vliegtuig met de geluidssnelheid vliegt?

Je ziet nu dat alle golven samenkomen in het punt waar het vliegtuig zich bevindt. Deze golven versterken elkaar en dit zorgt voor een enorme schok. Dus bij het doorbreken van de geluidsbarrière krijg je een enorme schok. Veel vliegtuigen kunnen deze schok niet verdragen en hier moet dan zeker rekening mee worden gehouden

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---

## Geluidssnelheid

De geluidssnelheid is niet overal hetzelfde. De geluidssnelheid hangt af van de temperatuur. Daarvoor kun je de volgende formule opstellen:

$$V_{\text{geluid}} = K * \sqrt{T}$$

In deze formule is  $V_{\text{geluid}}$  de geluidssnelheid in meter per seconde. T is de temperatuur in graden Kelvin. En K is een bepaalde constante. Het blijkt dat deze K de waarde van ongeveer 20,1 heeft. De geluidssnelheid bij 273 K is dus:  $V = 20,1 * \sqrt{273} = 332 \text{ m/s}$ .

Deze waarde komt precies overeen met die van Binas.

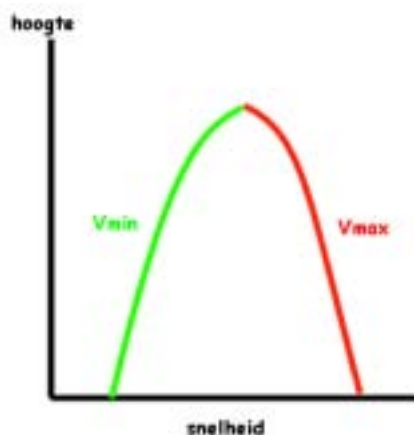
Omdat de geluidssnelheid verandert bij een andere temperatuur, verandert de geluidssnelheid ook bij een andere hoogte. Hoe hoger je komt, hoe lager de temperatuur wordt. Dat wil dus zeggen dat hoe hoger je vliegt, hoe lager de geluidssnelheid wordt. Dit vormt een probleem voor de commerciële vliegtuigen.

## Coffin corner

We hebben dus gezien dat een commercieel vliegtuig niet sneller mag vliegen dan de geluidssnelheid. Hij heeft dus een maximale snelheid. Een snelheid die hij maximaal mag vliegen voordat hij de geluidsbarrière doorbreekt. Deze geluidssnelheid hangt ook nog eens af van de hoogte. Dus hoe hoger hij vliegt, hoe lager zijn maximale snelheid is. Dit kun je als volgt in een grafiek weergeven.



De snelheid van het vliegtuig mag dus nooit voorbij de rode lijn komen. Maar we hebben eerder ook gezien dat het vliegtuig een bepaalde snelheid nodig heeft om genoeg lift te produceren. Alleen dan blijft het vliegtuig in de lucht. Dit is dus de minimale snelheid van het vliegtuig. Deze kunnen we ook in de grafiek zetten. We krijgen dan het volgende.

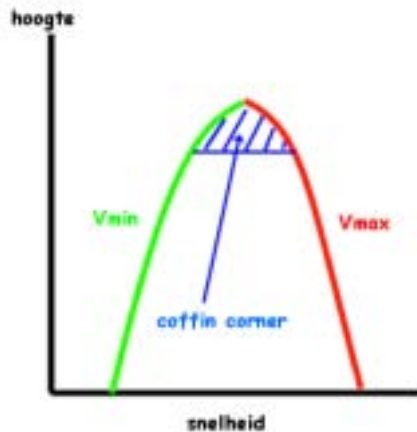


De snelheid van het vliegtuig moet dus tussen deze twee lijnen blijven. Anders gaat het fout. Maar in de grafiek zie je dat er zich een speciale situatie voordoet op een bepaalde hoogte. Daar is de maximale snelheid gelijk aan de minimale snelheid. Dit heet de "coffin corner". Dit gebied hebben wij gemarkeerd in de volgende tekening.

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---



Een vliegtuig mag nooit op deze hoogte komen, want dan gaat het fout. Dit komt door het volgende. De maximale snelheid is gelijk aan de minimale snelheid. Dit wil zeggen dat je niet sneller mag gaan, maar ook niet langzamer. Oftewel, je kunt helemaal niks. Als je sneller wilt gaan dan doorbreek je de geluidsbarrière. Dat gaat dus niet. Als je wil dalen dan krijg je automatisch meer snelheid en dan ga je ook door de geluidsbarrière. En als je langzamer wil gaan vliegen, dan heb je zo'n grote invalshoek nodig om op die hoogte te blijven, zodat je in een stall raakt. En dan stort je ook neer. Je bent dus hulpeloos op zo'n hoogte.

Zo is het ooit voorgekomen dat er een vliegtuig in de coffin corner zat. Deze hebben ze toen heel langzaam laten dalen. Gelukkig is dit vliegtuig nog veilig op de grond gekomen, maar er waren wel heel wat onderdelen van het vliegtuig afgevallen.

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---

## Simulatie

In de voorgaande hoofdstukken hebben we gekeken naar de krachten die op een vliegtuig werken. We hebben ook gekeken hoe we deze krachten kunnen berekenen. Als laatste hebben we ook nog gezien hoe het vliegtuig wordt bestuurd. Met al deze gegevens kunnen we een simulatie op de computer maken. We moeten dan een simulatie programmeren. Dit hebben we gedaan. De programmeercode en de simulatie staan op de bijgevoegde CD. De programmeercode is te lang om hier te laten zien (23 pagina's). Wat we willen kunnen laten zien is het natuurkundige model van de simulatie. Hierin staat beschreven hoe de krachten moeten worden berekend. Hier gaan we het dan ook over hebben.

## Model

We hebben het model en het deel over constanten en variabelen uit het programma gefilterd. Het is ook nog een beetje vereenvoudigd om het makkelijk te houden. Dit ziet er dan als volgt uit.

```
rem vars
x#=5000.00
y#=1.00
z#=5000.00
yangle#=0.00
xangle#=0.00
zangle#=0.00
vx#=0.0
vy#=0.0
vz#=0.0
v#=sqrt((vx#*vx#)+(vy#*vy#)+(vz#*vz#))

rem constanten+vars
time=timer()
g#=9.81
mass#=350000.00
maxthrust#=1050000.00
Cw#=-0.200
Cwr#=19.000
Croll#=0.000100
Cturn#=0.000125
Cpitch#=0.0002400
Cpstab#=0.000001200
Ctstab#=0.000003500
Cl#=1.500
beta#=5.00
grenshoek#=20.00
e#=2.71
T#=210.00+(0.273*((y#*0.001)-17)*((y#*0.001)-17))
rho#=(347.00/T#)*e#^((-0.0288*9.81*y#)/(8.315*T#))
S#=540.00

rem MODEL
model:

rem tijdsverschil
dt#=(timer()-time)/1000.000
time=timer()

rem controle
if vx#=0.000 then vx#=0.0000001
if vy#=0.000 then vy#=0.0000001
if vz#=0.000 then vz#=0.0000001

rem dichtheid en temperatuur
```

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)

© havovwo.nl

---

```
T# = 210.00 + (0.273 * ((y# * 0.001) - 17) * ((y# * 0.001) - 17))  
rho# = (347.00 / T#) * e#^((-0.0288 * 9.81 * y#) / (8.315 * T#))
```

rem KRACHTEN

rem zwaartekracht

```
Fg# = mass# * g#
```

rem invalshoek

gosub invalshoek

rem weerstand

```
Fwx# = Cw# * 0.5 * A# * vx# * vx# * rho# * (abs(vx#) / vx#)
```

```
Fwy# = Cw# * 0.5 * A# * vy# * vy# * rho# * (abs(vy#) / vy#)
```

```
Fwz# = Cw# * 0.5 * A# * vz# * vz# * rho# * (abs(vz#) / vz#)
```

```
Fw# = sqrt((Fwx# * Fwx#) + (Fwy# * Fwy#) + (Fwz# * Fwz#))
```

rem Cl waarde

```
Cl# = invalshoek# * 0.12
```

```
if invalshoek# > grenshoek# or Cl# < 0.00 then Cl# = 0.00
```

```
if invalshoek# > grenshoek# then stall = 1 else stall = 0
```

rem liftkracht

```
Fl# = Cl# * 0.5 * rho# * v# * v# * S#
```

rem stuwkracht

```
Fe# = maxthrust#
```

```
Fe2# = Fe# * (rho# / 1.2255)
```

rem ontbinden in x, y en z

```
Fx# = (sin(yangle2#) * cos(xangle2#) * Fe2#) + Fwx# + (sin(yangle3#) * cos(xangle3#) * Fl#)
```

```
Fy# = (((sin(xangle2#) * Fe2#) - (Fg#)) + Fwy#) + (sin(xangle3#) * Fl#)
```

```
Fz# = (cos(yangle2#) * cos(xangle2#) * Fe2#) + Fwz# + (cos(yangle3#) * cos(xangle3#) * Fl#)
```

rem normaalkracht

```
Fn# = 0.000
```

rem op de grond

```
if y# <= 1.00
```

```
y# = 1.00 : Fn# = Fy# * -1 : vy# = 0.000
```

```
if Fn# < 0.00 then Fn# = 0.00
```

```
Fy# = Fy# + Fn#
```

endif

rem versnelling

```
ax# = Fx# / mass#
```

```
ay# = Fy# / mass#
```

```
az# = Fz# / mass#
```

rem snelheid

```
vx# = vx# + (ax# * dt#)
```

```
vy# = vy# + (ay# * dt#)
```

```
vz# = vz# + (az# * dt#)
```

```
v# = sqrt((vx# * vx#) + (vy# * vy#) + (vz# * vz#))
```

rem positie

```
x# = x# + (vx# * dt#)
```

```
y# = y# + (vy# * dt#)
```

```
z# = z# + (vz# * dt#)
```

rem variabele controle

```
if rotx# = 0.00 then rotx# = 0.001
```

```
if roty# = 0.00 then roty# = 0.001
```

```
if rotz# = 0.00 then rotz# = 0.001
```

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)

© havovwo.nl

---

*rem stampen+gieren door stabilo's*

$rotax\# = rotax\# - (Cpstab\# * Fw\# * \sin(invalshoek\# - beta\#))$

$rotay\# = rotay\# - (Ctstab\# * Fw\# * \sin(invalshoek2\#))$

*rem rotatieversnelling*

*if*  $rotax\# <> 0.000$  *or*  $rotvx\# <> 0.001$

$rotax\# = rotax\# - (Cwr\# * rotvx\# * rotvx\# * (\text{abs}(rotvx\#) / rotvx\#))$

*endif*

*if*  $rotay\# <> 0.000$  *or*  $rotvy\# <> 0.001$

$rotay\# = rotay\# - (Cwr\# * rotvy\# * rotvy\# * (\text{abs}(rotvy\#) / rotvy\#))$

*endif*

*if*  $rotaz\# <> 0.000$  *or*  $rotvz\# <> 0.001$

$rotaz\# = rotaz\# - (Cwr\# * rotvz\# * rotvz\# * (\text{abs}(rotvz\#) / rotvz\#))$

*endif*

*rem terugzetten*

*if*  $rotvx\# <= 0.001$  *and*  $rotvx\# > -0.001$  *then*  $rotvx\# = 0.000$

*if*  $rotvy\# <= 0.001$  *and*  $rotvy\# > -0.001$  *then*  $rotvy\# = 0.000$

*if*  $rotvz\# <= 0.001$  *and*  $rotvz\# > -0.001$  *then*  $rotvz\# = 0.000$

*if*  $rotax\# < 0.002$  *and*  $rotax\# > -0.002$  *then*  $rotax\# = 0.000$

*if*  $rotay\# < 0.002$  *and*  $rotay\# > -0.002$  *then*  $rotay\# = 0.000$

*if*  $rotaz\# < 0.002$  *and*  $rotaz\# > -0.002$  *then*  $rotaz\# = 0.000$

*rem rotatiesnelheid*

$rotvx\# = rotvx\# + (rotax\# * dt\#)$

$rotvy\# = rotvy\# + (rotay\# * dt\#)$

$rotvz\# = rotvz\# + (rotaz\# * dt\#)$

*rem rotatie*

$rotx\# = rotvx\#$

$roty\# = rotvy\#$

$rotz\# = rotvz\#$

*return*

*rem invalshoek*

*invalshoek:*

$tx\# = \cos(xangle2\#) * \sin(yangle2\#)$

$ty\# = \sin(xangle2\#)$

$tz\# = \cos(xangle2\#) * \cos(yangle2\#)$

$lx\# = \cos(xangle3\#) * \sin(yangle3\#)$

$ly\# = \sin(xangle3\#)$

$lz\# = \cos(xangle3\#) * \cos(yangle3\#)$

$invalshoek\# = (\text{acos}((lx\# * vx\#) + (ly\# * vy\#) + (lz\# * vz\#)) - 90.000) + beta\#$

$zx\# = (ty\# * lz\#) - (ly\# * tz\#)$

$zy\# = (tz\# * lx\#) - (lz\# * tx\#)$

$zz\# = (tx\# * ly\#) - (lx\# * ty\#)$

$invalshoek2\# = (\text{acos}((zx\# * vx\#) + (zy\# * vy\#) + (zz\# * vz\#)) - 90.000) * -1.000$

*rem frontaal oppervlak*

$A\# = (\text{abs}(\sin(invalshoek\# - beta\#)) * 600.00) + 125.00$

*return*

Dit gaan we stap voor stap behandelen.

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---

## Tijd

We beginnen bij het begin van het model. Daar hoort het volgende bij:

### Variabelen:

$time = timer()$

### Model:

*rem tijdsverschil*

$dt\# = (timer() - time) / 1000.000$

$time = timer()$

Bij het deel over de variabelen wordt de tijd op dat moment opgeslagen onder de variabele “time”. Dit is in milliseconden. Deze tijd komt van de interne klok van de computer. Elke keer als het programma hier langs komt, wordt deze tijd afgetrokken van de nieuwe tijd op dat moment. Zo weet je dus steeds hoeveel tijd er is verstreken. Dit hebben we later nodig.

## Dichtheid en temperatuur

We hebben later bij de berekeningen ook de dichtheid nodig (voor de lift en weerstand). Daarom wordt die hier berekend.

### Constanten:

$e\# = 2.71$

### Model:

*rem dichtheid en temperatuur*

$T\# = 210.00 + (0.273 * ((y\# * 0.001) - 17) * ((y\# * 0.001) - 17))$

$\rho\# = (347.00 / T\#) * e\#^{(-0.0288 * 9.81 * y\#) / (8.315 * T\#)}$

Op deze berekening gaan we niet verder in. Hij klopt dan ook niet helemaal, maar hij zit er dicht bij in de buurt. En dat is genoeg voor onze simulatie. De variabele “rho#” is in dit geval de dichtheid.

## Zwaartekracht

Dan beginnen we met het berekenen van de eerste kracht: de zwaartekracht. Deze is niet zo moeilijk te berekenen. Dit doen we als volgt:

### Constanten:

$g\# = 9.81$

$mass\# = 350000.00$

### Model:

*rem zwaartekracht*

$Fg\# = mass\# * g\#$

De zwaartekracht ( $Fg\#$ ) wordt simpelweg met de formule  $F = m * g$  berekend. De massa en de valversnelling zijn allebei constanten die we eerder een waarde hebben gegeven. Bij deze simulatie neemt de valversnelling niet af met de hoogte, omdat dit effect miniem is.

## Invalshoek

Daarna moeten we de invalshoek berekenen. Deze hebben we namelijk nodig voor het berekenen van de liftkracht. Dit wordt als volgt gedaan:

### Constanten+Variabelen:

$v_x\# = 0.0$

$v_y\# = 0.0$

$v_z\# = 0.0$

$beta\# = 5.00$

### Model:

*rem invalshoek*

*invalshoek:*

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---

```
tx#=cos(xangle2#)*sin(yangle2#)
ty#=sin(xangle2#)
tz#=cos(xangle2#)*cos(yangle2#)
lx#=cos(xangle3#)*sin(yangle3#)
ly#=sin(xangle3#)
lz#=cos(xangle3#)*cos(yangle3#)
invalshoek#=(acos((lx#*vx#)+(ly#*vy#)+(lz#*vz#))-90.000)+beta#
zx#=(ty#*lz#)-(ly#*tz#)
zy#=(tz#*lx#)-(lz#*tx#)
zz#=(tx#*ly#)-(lx#*ty#)
invalshoek2#=(acos((zx#*vx#)+(zy#*vy#)+(zz#*vz#))-90.000)*-1.000
rem frontaal oppervlak
A#=(abs(sin(invalshoek#-beta#))*600.00)+125.00
```

Wat gebeurt hier nou? Ten eerste verdelen we de richting waar het vliegtuig naar staat gericht op in een x,y en z component. De “xangle2#” is de hoogtehoek van die vector. De “yangle2#” is de richtingshoek van die vector. Daarmee kunnen we dan met sinus en cosinus de vector opdelen in componenten. Dit hebben we ook gedaan voor de liftvector. Daarna hebben we de hoek tussen de bewegingsrichting(vx#,vy#,vz#) en de liftvector berekend. Hier hebben we toen 90 vanaf gehaald, omdat de invalshoek 0 graden moet zijn als de liftvector loodrecht op de beweging staat. Daar hebben we toen nog “beta#” bij opgeteld. Dat is de instelhoek. Daarmee krijg je dan de invalshoek. De 2° invalshoek is ook een soort invalshoek maar dan van de zijkant. Deze wordt op soortgelijke wijze berekend. Daarna berekenen we nog het frontale oppervlak met behulp van de invalshoek. Deze gegevens hebben we dadelijk weer nodig.

## Weerstand

Dan kunnen we de tweede kracht berekenen. Hiervoor hebben we de dichtheid, frontale oppervlak en de snelheid nodig. Deze hebben we al eerder berekend. We kunnen de formule dan verder gewoon invullen. Deze formule hebben we eerder al behandeld.

### Constanten:

$C_w = -0.200$

### Model:

rem weerstand

```
Fwx#=Cw#*0.5*A#*vx#*vx#*rho#*(abs(vx#)/(vx#))
Fwy#=Cw#*0.5*A#*vy#*vy#*rho#*(abs(vy#)/(vy#))
Fwz#=Cw#*0.5*A#*vz#*vz#*rho#*(abs(vz#)/(vz#))
Fw#=#sqrt((Fwx#*Fwx#)+(Fwy#*Fwy#)+(Fwz#*Fwz#))
```

## C<sub>l</sub>-waarde

De liftcoëfficiënt hangt af van de invalshoek. Dan moeten we ook nog letten op stalling. Dus als de invalshoek groter is dan de kritieke invalshoek, dan moet de liftcoëfficiënt gelijk zijn aan 0. De kritieke invalshoek noemen we “grenshoek#”. We kunnen dan de liftcoëfficiënt als volgt berekenen.

### Constanten:

$grenshoek = 20.00$

### Model:

rem Cl waarde

```
Cl#=invalshoek#*0.12
if invalshoek#>grenshoek# or Cl#<0.00 then Cl#=0.00
if invalshoek#>grenshoek# then stall=1 else stall=0
```

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---

## Liftkracht

Nu hebben we alle gegevens om de liftkracht te berekenen. Dit gaan we dan ook nu doen. Dit ziet er als volgt uit.

### Constanten:

$S = 540.00$

### Model:

rem liftkracht

$F_l = C_l \cdot 0.5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S$

De constante "S" is het vleugeloppervlak. Voor de rest is deze berekening wel duidelijk, want we hebben de liftformule al eerder behandeld.

## Stuwkracht

Als laatste hebben we dan nog de stuwkracht. Deze berekening is niet helemaal duidelijk naar voren gekomen. We weten dat de stuwkracht afhangt van de aangevoerde massa lucht. Deze kunnen we niet makkelijk bepalen bij zo'n simulatie. Dit hebben we dus anders gedaan. Van veel vliegtuigen is de maximale stuwkracht bekend. Deze hebben we gebruikt. Maar de aangevoerde massa hangt natuurlijk af van de dichtheid. Daarom hebben we de stuwkracht evenredig gemaakt met de dichtheid. Dit hebben we als volgt gedaan.

### Constanten:

$maxthrust = 1050000.00$

### Model:

rem stuwkracht

$F_e = maxthrust$

$F_{e2} = F_e \cdot (\rho / 1.2255)$

## Ontbinden

Na het berekenen van alle krachten, hebben we ze verdeeld in componenten en toen bij elkaar opgeteld. Dit ziet er als volgt uit:

### Model:

rem ontbinden in x,y en z

$F_x = (\sin(\text{yangle2}) \cdot \cos(\text{xangle2}) \cdot F_{e2}) + F_{wx} + (\sin(\text{yangle3}) \cdot \cos(\text{xangle3}) \cdot F_l)$

$F_y = (((\sin(\text{xangle2}) \cdot F_{e2}) - (F_g)) + F_{wy}) + (\sin(\text{xangle3}) \cdot F_l)$

$F_z = (\cos(\text{yangle2}) \cdot \cos(\text{xangle2}) \cdot F_{e2}) + F_{wz} + (\cos(\text{yangle3}) \cdot \cos(\text{xangle3}) \cdot F_l)$

## Normaalkracht

Als het vliegtuig op de grond staat, moet er ook sprake zijn van normaalkracht. Deze is bij een rechte ondergrond niet zo moeilijk te berekenen, want dan moet hij gewoon de y component(hoogte) van de kracht opheffen. Dit doen we als volgt.

### Model:

rem normaalkracht

$F_n = 0.000$

rem op de grond

if  $y \leq 1.00$

$y = 1.00 : F_n = F_y \cdot -1 : v_y = 0.000$

if  $F_n < 0.00$  then  $F_n = 0.00$

$F_y = F_y + F_n$

endif

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---

## Versnelling, snelheid en positie

Met deze krachten moeten we dan uiteindelijk de versnelling en dan de snelheid en dan de nieuwe positie van het vliegtuig berekenen. Dit is niet zo moeilijk. We gebruiken hiervoor het tijdsverschil wat we als eerste hebben berekend. We kunnen de nieuwe positie dan als volgt berekenen.

### Constanten:

$mass\# = 350000.00$

### Model:

rem versnelling

$ax\# = Fx\# / mass\#$

$ay\# = Fy\# / mass\#$

$az\# = Fz\# / mass\#$

rem snelheid

$vx\# = vx\# + (ax\# * dt\#)$

$vy\# = vy\# + (ay\# * dt\#)$

$vz\# = vz\# + (az\# * dt\#)$

$v\# = \sqrt{(vx\# * vx\#) + (vy\# * vy\#) + (vz\# * vz\#)}$

rem positie

$x\# = x\# + (vx\# * dt\#)$

$y\# = y\# + (vy\# * dt\#)$

$z\# = z\# + (vz\# * dt\#)$

## Rotatie

Een vliegtuig kan naast gewoon van positie veranderen ook nog draaien. Dit werkt op zich hetzelfde. Het probleem is echter dat hier niet echt veel gegevens over zijn. Daarom is het niet zeker of deze berekeningen ook kloppen. We hebben gewoon gekeken waar de rotatie van af zou hangen. Deze waardes hebben we dan in een formule gezet en dan vermenigvuldigd met een geschatte waarde. Uiteindelijk leverde dit nog redelijk realistische effecten op.

Op dit deel gaan we niet verder in. Wel willen we nog even kijken naar het effect van de stabilo's (staart) op het draaien van het vliegtuig.

## Stabiliteit

Zoals we al eerder hebben verteld, zorgt de staart voor een bepaalde stabiliteit. Daarmee bedoelen we dat wanneer het vliegtuig naar beneden beweegt, het vliegtuig ook naar beneden draait. Wij dachten dat dit effect afhing van de wrijvingskracht op het vliegtuig (eigenlijk de wrijving van de staart) en dat hij afhing van de invalshoek. Hiervoor hebben we nu dus ook die 2° invalshoek nodig. Die zorgt namelijk voor het gieren. We hebben dit daarna vermenigvuldigd met een geschatte waarde en zo hebben we dit effect berekend. Ook dit gaf een realistisch effect. Dit stuk ziet er als volgt uit.

### Model:

rem stampen + gieren door stabilo's

$rotax\# = rotax\# - (Cpstab\# * Fw\# * \sin(invalshoek\# - beta\#))$

$rotay\# = rotay\# - (Ctstab\# * Fw\# * \sin(invalshoek2\#))$

Hoewel dit niet zo belangrijk lijkt, is dit toch een belangrijk deel van het model. Zonder dit deel zou je namelijk geen bochten kunnen maken.

We hebben nu globaal uitgelegd hoe de simulatie werkt. Dit is echter maar een klein deel van de simulatie. De rest kun je vinden op de CD (helaas zonder uitleg).

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)

© havovwo.nl

---

## Besturing van de simulatie

Om zelf de simulatie te kunnen gebruiken, moet je weten hoe het werkt en hoe het moet. Dat zullen wij dan ook nu uitleggen. We zullen eerst vertellen welke knoppen waarvoor zijn. Daarna zullen we uitleggen hoe je met deze knoppen moet opstijgen, vliegen en landen.

### Knoppen

Knoppen	Functie
Enter	Simulatie beginnen (als je wil beginnen druk je op enter)
Pijl links/rechts	Rollen (in de lucht) & Sturen (op de grond)
Pijl boven/beneden	Stampen
1-5	Stuwkracht (1=geen stuwkracht, 5=max. stuwkracht en 2,3 en 4 zitten er tussen in)
6	Remmen met motoren (motoren worden afgezet+meer wrijving)
F1-F5	Flaps (F1=min. flaps, F5=max. flaps en F2, F3 en F4 zitten er tussen in)
F6-F10	Slats (F6=min. slats, F10=max. slats en F7, F8 en F9 zitten er tussen in)
G	Wielen naar binnen/naar buiten
V	Veranderen van camera (de camera heeft 3 standen: 1=achter het vliegtuig, 2=vrije camera, 3=vanuit het vliegtuig)
Muisbeweging	Het besturen van de camera als de camera in stand 2 staat.
S	Spoilers omhoog/omlaag
B	Remmen met de wielen (als je op de grond bent)
R	Herstarten na het crashen

Bij het vliegen kun je de pijltjes toetsen ook nog vervangen door een joystick. Je kunt dan beide gebruiken.

Het is natuurlijk niet makkelijk om deze knoppen allemaal te onthouden. Daarom is het slim om deze uit te printen en ze erbij te houden bij het vliegen totdat je ze kent.

Nu we de knoppen weten, kunnen we verder met hoe we nu precies moeten vliegen. Met knoppen alleen komen we niet ver. We zullen opstijgen, vliegen en landen apart behandelen.

### Opstijgen

Opstijgen is helemaal niet moeilijk als je weet wat je moet doen. Als je dat weet, gaat het nooit meer fout. Op de CD staat een video van het opstijgen in deze simulatie. Als je deze bekijkt, kun je ook zien hoe het werkt. (je hebt hier een DivX 4 codec voor nodig)

Nu zullen we even vertellen wat je moet doen bij het opstijgen. Zodra je het vliegtuig ziet, druk je op enter om de simulatie te starten. Nu pas werken alle knoppen. Nu kun je, als je wil, de camerastand veranderen. Wij vinden de vrije camera het fijnst, omdat je dan meer controle hebt over de camera. Hiervoor moet je één maal op "V" drukken. Je ziet nu de camerastand veranderen. Hierna moeten we vooruit zien te komen. Dit doen we door op "5" te drukken. Hierdoor krijgen we namelijk de maximale stuwkracht. Het vliegtuig zal nu vooruit bewegen. Voordat we verder gaan, moeten we eerst weten wat de gegevens op het scherm betekenen. Hieronder kun je zien hoe het eruit ziet.

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---



Linksboven zie je een aantal gegevens. We zullen ze even uitleggen:

FPS	=	het aantal beeldjes per seconde. Dit getal is niet belangrijk
Speed	=	de snelheid in meter per seconde. Deze moet je wel vaak in de gaten houden.
Altitude	=	Hoogte in meters. Deze is handig bij het landen of om te kijken of je van de grond komt bij het opstijgen.
Flaps	=	De stand van de flaps. Bij min. flaps staat er 0 (knop F1) en bij max. flaps staat er 4 (knop F5). Meestal wordt alleen de max. of min. flaps gebruikt.
Slats	=	De stand van de slats. Bij min. slats staat er 0 (knop F6) en bij max. slats staat er 4 (knop F10). Meestal wordt alleen de max. of min. slats gebruikt.
Spoilers	=	De stand van de spoilers. Bij OFF staan ze omlaag en bij ON staan ze omhoog.

Rechtsonder zie je nog een handig metertje. Hieraan kun je zien hoe je gedraaid bent. Als je hebt gerold, staat de horizon scheef. Als je aan het klimmen bent, is de horizon naar beneden geschoven. Dit metertje is handig om te kijken of je recht vliegt.

Maar nu verder met het opstijgen. We waren aan het bewegen. We moeten snelheid blijven maken totdat we bijna 70 meter per seconde gaan. (zie bij Speed) Op dat moment moeten we onze flaps maximaal zetten, zodat we dadelijk kunnen opstijgen. Dit doen we door op F5 te drukken. Nu wachten we nog iets langer totdat de snelheid ongeveer 80 m/s is. Op dat moment is het handig als je je camera aan de zijkant van het vliegtuig hebt gezet, want dan kun je goed zien of het vliegtuig opstijgt. Maar het hoeft niet. Op dit moment moet je namelijk beginnen met opstijgen. We moeten hiervoor de neus omhoog duwen. Dit doen we door op het pijltje omlaag(!) te drukken. Blijf deze inhouden totdat het vliegtuig van de grond komt. Je mag hem niet te lang inhouden, want dan kom je in een stall! Het beste is om na het opstijgen het vliegtuig weer iets rechter te zetten door op het pijltje omhoog te drukken.

Na het opstijgen is het gebruikelijk om je wielen in te trekken. Daarom drukken we na het opstijgen op "G" om de wielen in te trekken. En dat was het opstijgen. Nu nog even samengevat:

1. Druk op enter om de simulatie te starten.
2. Zet je camera in een stand naar keuze met de knop "V".
3. Druk op "5" om vooruit te komen.
4. Bij 70 m/s: druk op F5 voor maximale flaps.
5. Bij 80 m/s: druk op pijltje omlaag om op te stijgen. Ga niet te ver!
6. Druk op "G" om je wielen in te trekken.

En dan gaan we nu verder met vliegen.

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---

## Vliegen

Na het opstijgen, stijg je vrij hard. Dit komt door de flaps. Deze worden normaal gesproken alleen gebruikt bij het landen of bij het opstijgen. We moeten deze flaps dus weer uit gaan zetten. Maar hiervoor moeten we wel genoeg snelheid hebben, anders vallen we weer naar beneden! Bij het klimmen maak je niet veel snelheid. Probeer dus op ongeveer 300 meter hoogte je vliegtuig recht te krijgen met de pijltjes toetsen (kijk naar het metertje rechtsonder). Dan begint het vliegtuig snelheid te maken. Bij een snelheid van ongeveer 120 m/s is het wel veilig om je flaps op zijn minimale stand te zetten. Dit doe je door op de F1 knop te drukken.

Nu kan het zijn dat je niet graag heel hoog wil gaan vliegen. Maar omdat je vliegtuig met zijn maximale stuwkracht vliegt, zal hij steeds sneller gaan. Hierdoor zal hij dan omhoog willen. Om dit te voorkomen, moet je je vliegtuig recht proberen te zetten en dan de stuwkracht te verminderen. Dit doe je dan door op "2" of op "3" te drukken. Bij "3" is de stuwkracht natuurlijk groter dan bij "2". Als je nu hoogte dreigt te verliezen, omdat je te langzaam gaat, moet je je stuwkracht weer verhogen door op "4" of "5" te drukken. Probeer een evenwicht te vinden, zodat je mooi recht kan vliegen, zonder dat je de hoeveelheid stuwkracht opnieuw moet veranderen.

Bij het vliegen is het natuurlijk ook leuk en handig om bochten te maken. Dit is niet zo moeilijk. Hiervoor moet je de pijltjes links en rechts gebruiken. Je zult dan rollen. Als je in een gerolde stand staat, zal het vliegtuig automatisch een bocht maken. Als het nodig is, kun je ook nog met het pijltje omlaag de neus omhoog houden. Bochten maken is niet zo moeilijk.

Even weer samengevat:

Flaps:

1. Klim na het opstijgen tot een hoogte van ongeveer 300 m.
2. Zet het vliegtuig recht.
3. Maak snelheid tot de 120 m/s
4. Zet dan je flaps in de minimale stand met F1.
5. En stijg dan vrolijk verder

Stuwkracht:

1. Als je op een bepaalde hoogte wil blijven vliegen, ga je recht vliegen.
2. Verminder dan de stuwkracht door op "2" of op "3" te drukken.
3. Verlies je te veel hoogte, verhoog dan de stuwkracht door op "4" of op "5" te drukken.

Bochten:

1. Wil je een bocht maken, rol dan in de richting waarin je een bocht wil maken met de pijltjes links/rechts.
2. Het vliegtuig zal automatisch een bocht maken. (hoe verder je rolt, hoe scherper de bocht)
3. Als je neus naar beneden draait, gebruik dan pijltje omlaag om dit te herstellen.
4. Wil je geen bocht meer maken, rol dan terug (metertje rechtsonder)

## Landen

Als laatste zullen we nog uitleggen hoe je moet landen. Dit is verreweg het moeilijkste. Als je het vliegen nog niet onder de knie hebt, kun je hier beter niet aan beginnen.

Ten eerste moeten we op een hoogte van ongeveer 1000-2000 meter gaan vliegen. Dan gaan we op zoek naar een landingsbaan. Dit kan even duren. De landingsbaan moet er wel een beetje goed voorliggen. Als de landingsbaan dwars staat op jouw bewegingsrichting, dan kun je daar vrijwel onmogelijk landen. Zoek dus een landingsbaan die een beetje in jouw richting staat. Als je zo'n landingsbaan gevonden hebt, kun je gaan landen. Ten eerste kun je even kijken naar een filmpje over landen die op de CD staat. Het filmpje heet "landing.avi". Daar kun je zien hoe moeilijk het is.

We zullen nu verder gaan met de uitleg over hoe je moet landen. Ten eerste moeten we gaan afremmen en dalen. Dalen is niet zo moeilijk. Je draait gewoon je neus naar beneden door op het pijltje omhoog te drukken. Maar door het dalen krijg je ook meer snelheid. Daarom moet je voor het dalen nog op een of andere manier afremmen. Als je best snel gaat en vrij hoog vliegt, kun je het beste op "6" drukken. Hierdoor rem je extra sterk

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---

af. Lijkt dit je te veel, dan kun je altijd nog gewoon de motor uitzetten door op “1” te drukken. Je kunt ook je slats gebruiken om extra af te remmen als dat nodig is. Hiervoor moet je op F10 drukken.

En we gaan landen, dus is het wel handig om je wielen naar beneden te doen. Dit doe je door op “G” te drukken. Nu gaan we dalen. Tijdens het dalen moet je je vliegtuig zo sturen dat het vliegtuig mooi richting de landingsbaan vliegt. Dit kun je ook zien in het filmpje. Dat onderdeel is het allermoeilijkste. Soms kom je net iets te schuin aan en dan kan het fout gaan. In het filmpje ging het ook niet helemaal goed, maar door bijsturen hebben we het vliegtuig toch nog aan de grond gekregen.

Na het dalen en sturen gaan we als het goed is op een hoogte tussen de 1 en 100 meter richting de landingsbaan. Nu moeten we op de landingsbaan komen. Daarvoor moeten we eerst kijken hoeveel we zijn afgeremd. Als je ongeveer 105 m/s of langzamer gaat voor de landingsbaan, moet je flaps op maximaal zetten door op F5 te drukken, anders land je voor de landingsbaan. Als je snelheid groter is dan 105 m/s, hoef je niets te doen. Als je bij de landingsbaan komt, moet je nog iets verder dalen totdat je bijna bij de grond bent. Bij het landen moet je je neus omhoog hebben staan. Dit doe je door op dat moment op pijltje omlaag te drukken totdat je neus omhoog staat. Als je nu nog steeds naar beneden gaat, dan is het goed en dan kun je rustig landen. Meestal is dit niet het geval. Je blijft dan een beetje erboven zweven. Je moet dan je spoilers omhoog zetten. Dit doe je door op “S” te drukken. Als het goed is, ga je nu wel naar beneden en kun je rustig landen.

Als je met je achterwielen op de grond bent, moet je pijltje omhoog drukken, totdat je voorwiel ook op de grond staat. Je bent nu geland. Nu nog remmen. Dit doe je door op “B” te drukken. Blijf deze knop inhouden totdat je stil staat en je bent geland!

Dat vatten we nog even samen:

1. We gaan op een hoogte vliegen van 1000-2000 meter.
2. We gaan op zoek naar een goede landingsbaan.
3. Druk op “6” om sterk af te remmen of op “1” om niet zo snel af te remmen en op F10 om extra af te remmen. (indien nodig)
4. Zet je wielen naar beneden door op “G” te drukken.
5. Ga dalen met pijltje omhoog en stuur het vliegtuig in de richting van de landingsbaan.
6. Daal tot een hoogte van ongeveer 50-100 meter en kijk naar je snelheid.
7. Bij snelheid < 105 m/s : flaps op maximaal met F5. Anders niks doen.
8. Daal tot je bijna bij de grond bent en trek je neus omhoog door op pijltje omlaag te drukken.
9. Ga je omlaag dan kun je gewoon landen. Zoniet, dan moet je je spoilers omhoog zetten door op “S” te drukken.
10. Als je met je achterwielen de grond raakt, moet je op pijltje omhoog drukken totdat je voorwiel op de grond staat.
11. Nu moet je alleen(!) de knop “B” inhouden totdat je stilstaat.

Als je dit allemaal lukt, dan ben je een zeer goede piloot. Maar meestal gaat het landen bij veel mensen fout. Er zijn nog maar weinig mensen die met deze simulatie kunnen landen, dus maak je niet druk als het niet lukt.



# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)  
© havovwo.nl

---

## Nawoord

Toen we eerst besloten om het over de krachten op een formule 1 te gaan hebben waren we zeer enthousiast over de techniek bij zulke auto's. Ook hadden we besloten dat we een simulatie van de gevonden resultaten wilde maken. Echter, we kwamen gelukkig al vrij snel tot het inzicht dat je over dat onderwerp niet zo veel zou kunnen vinden, omdat dat allemaal geheim wordt gehouden. Als een logisch gevolg daarvan moesten we een nieuw onderwerp gaan verzinnen. Toen kwamen we al vrij snel uit op vliegtuigen. Het heeft ook met vleugels en snelheid te maken en hier kon je ook een simulatie bij maken. Nadat we dit hadden besloten hebben we meteen e-mails gestuurd naar fabrikanten en organisaties die met vliegtuigen te maken hebben. Vervolgens hebben we informatie ingewonnen op het internet en in de bibliotheek. Het was alleen een groot nadeel dat je daar niet veel kon vinden. We kregen wel een hoopgevende mail van de KLM terug waarin we een e-mailadres kregen van een medewerker van de technische dienst, Jan Stoffelen. Met Jan hebben we vele e-mails uitgewisseld, zie de bijlagen. Ondertussen hadden we alvast de geschiedenis van de luchtvaart, geschiedenis van de Boeing 747 en de basis voor de simulatie gemaakt. Na vele e-mails met Jan vroeg hij ons of we een keer langs konden komen op Schiphol zodat hij ons daar uitleg en een rondleiding kon geven. Nadat we afspraak hadden gemaakt gingen we op 23 december naar Schiphol. Daar aangekomen hebben we uitleg gekregen en een rondleiding. Nu hadden eindelijk informatie die nuttig waren voor ons onderwerp. Na het een paar weken te laten rusten zijn we begonnen met het uitwerken van de verkregen informatie van Jan. Hier kwamen we nog op een paar struikelblokjes terecht, maar dat konden we aan Jan vragen. Het uitwerken ging redelijk makkelijk, mede dankzij de heldere uitleg van Jan. Nu konden we ook verder met het maken van de simulatie. Na dit afgerond te hebben konden we de rest, inleiding, besturing, verslag van het bezoek en het nawoord maken. Ook hebben we de indeling nog overzichtelijker gemaakt. Nu we het allemaal af hadden konden we het gaan uitprinten en in een mapje doen. Wij zijn bij het maken geen grote problemen tegengekomen. We waren op tijd begonnen met het inwinnen en uitwerken van de informatie. Ook waren de taken goed verdeeld. Zo deed Kevin de simulatie en deed Martijn andere dingen om de verdeling in evenwicht te houden. Het is allemaal goed uitgekapt. We zijn niet in tijdnood gekomen. Aan het einde hebben we wel een beetje moeten haasten, maar dat was meer om de puntjes op de i te zetten. Nu we dit afhebben kunnen we gaan nadenken over de presentatie.

## Bronnenlijst

### Boeken

Dalton, S., De magie van het vliegen, Haarlem/Amsterdam: Schuyt 2001  
Boven, L., van, Schiphol en de Nederlandse luchtvaart, Amsterdam: Meulenhoff 1987  
Surendonk, H., Onderhoud in Beweging, Amsterdam: KLM technische dienst 1996

### Internet

<http://flightsimulator.pagina.nl/>  
<http://www.springer-3.myweb.nl/tech/index.html>  
<http://nl.corporate.klm.com/perspective/spreekbeurt/SpreekbeurtInformatie.asp>  
<http://www.tudelft.nl/matrix/index.cfm?usertype=bezoeker>  
<http://dutils1.lr.tudelft.nl/ls3/notaties.html>  
<http://users.skynet.be/vogelvlucht/Lift.html>  
<http://www.library.tudelft.nl/BTUD/ned/fbaeron.htm>  
<http://www.eu.aircrash.org/burnelli/index.htm>  
<http://www.lemarcq.com/c130hercules/vliegen.htm>  
<http://www.xs4all.nl/~wvdtol/dap/cat51.htm>  
<http://users.pandora.be/aerodynamica/>  
<http://home.wanadoo.nl/hoewerkthet/tech/vliegtuig.html>

# Profielwerkstuk Krachten op een vliegtuig

Martijn van Zelst en Kevin Verbeek [m\\_van\\_zelst@hotmail.com](mailto:m_van_zelst@hotmail.com)

© havovwo.nl

## Logboek

Wie	Wat	Wanneer
Samen	Op school+deelvragen	30-10-2002 2:00
Samen	Onderwerp verwisseld	04-11-2002 2:30
Samen	Onderwerp+deelvragen	07-11-2002 1:20
Samen	Basis voor simulatie+KLM gemaïld	13-11-2002 4:00
Samen	Informatie+e-mail	14-11-2002 2:30
Samen	E-mail+simulatie	21-11-2002 1:15
Samen	Gekeken naar Flight Simulator voor ideeën	22-11-2002 2:00
Samen	Taken verdeeld+gekeken welke technische info in werkstuk	29-11-2002 1:45
Samen	Vragen gemaakt voor de KLM	06-12-2002 1:45
Samen	Naar tabellen over 747 gezocht	13-12-2002 0:45
Samen	Naar de technische dienst van de KLM op Schiphol	23-12-2002 10:00
Martijn	Aan de geschiedenis van de luchtvaart gewerkt	30-12-2002 2:00
Kevin	Aan simulatie gewerkt(natuurkundig model)	03-01-2003 2:00
Martijn	Aan de geschiedenis van de luchtvaart verder gewerkt	03-01-2003 3:00
Kevin	Aan de simulatie gewerkt	05-01-2003 3:00
Kevin	Aan de simulatie gewerkt(vliegtuigmodel gemaakt)	06-01-2003 2:00
Martijn	Aan de geschiedenis van de Boeing 747 gewerkt	06-01-2003 3:00
Kevin	Aan de simulatie gewerkt	07-01-2003 3:30
Martijn	Geschiedenis van luchtvaart en 747 afgemaakt	08-01-2003 3:00
Kevin	Aan de simulatie gewerkt	09-01-2003 3:00
Samen	Bepaalt wie wat uitwerkt van het bezoek	10-01-2003 2:40
Martijn	Uitwerking van het bezoek	11-01-2003 3:30
Kevin	Aan de simulatie gewerkt	11-01-2003 2:00
Samen	Aan elkaar laten zien wat we hebben	13-01-2003 1:30
Kevin	Aan de simulatie gewerkt	14-01-2003 2:30
Martijn	Inleiding geschreven	15-01-2003 1:00
Samen	Begin gemaakt aan het uitwerken van de krachten op een vliegtuig	25-01-2003 2:30
Kevin	Aan de simulatie gewerkt	29-01-2003 1:30
Samen	Verder gewerkt aan de krachten op vliegtuig	01-02-2003 3:30
Kevin	Aan de simulatie gewerkt(omgeving gemaakt)	03-02-2003 3:30
Samen	Weer aan de krachten gewerkt	07-02-2003 4:00
Kevin	Besturing van het vliegtuig	08-02-2003 3:00
Martijn	Bronnenlijst	09-02-2003 1:00
Samen	Weer aan krachten gewerkt(stuw+weerstand)	09-02-2003 2:30
Samen	Coffin corner uitgewerkt	10-02-2003 2:30
Kevin	Uitleg simulatie en hoe te gebruiken	11-02-2003 3:00
Martijn	Nawoord+logboek	13-02-2003 2:00
Samen	Puntjes op de i gezet+titelpagina	13-02-2003 4:00

## Plan van aanpak

We willen een simulatie maken over vliegtuigen. Ook willen we de 4 hoofdkrachten op het vliegtuig gaan behandelen. We gaan verschillende fabrikanten en luchtvaartmaatschappijen aanschrijven. We proberen een rondleiding los te krijgen bij de KLM. Natuurlijk gaan we de geschiedenis van de luchtvaart ook nog behandelen.

We proberen de informatie hoofdzakelijk van internet af te halen. En als we een rondleiding bij de KLM krijgen, zullen we daar de ontbrekende informatie vandaan halen.

De taakverdeling is als volgt:

Kevin	Martijn
Simulatie	Geschiedenis
Krachten op vliegtuig	Krachten op vliegtuig
Straalmotor	Straalmotor
	Inleiding+nawoord