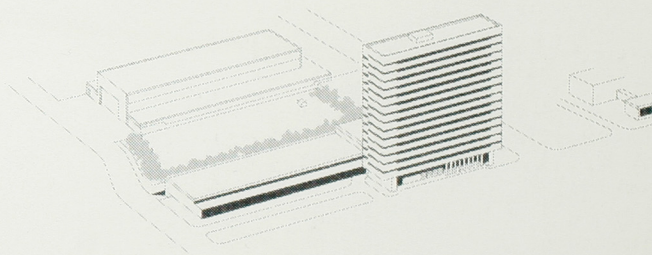
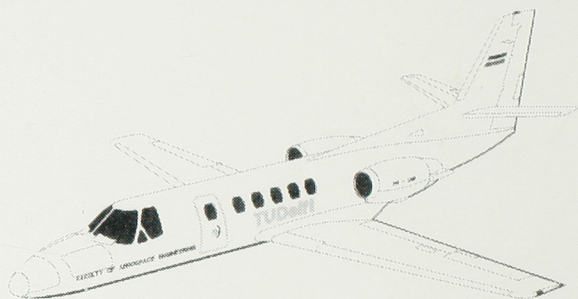


De stabiliteit en besturing van vliegtuigen: theorie en praktijk

Intreerede

Prof.dr.ir. J.A. Mulder

November 1991



TU Delft

Technische Universiteit Delft

Faculteit der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek

TRES Red. 1991

**DE STABILITEIT EN BESTURING
VAN VLIEGTUIGEN:
THEORIE EN PRAKTIJK**

Intreerede

1 november 1991 Prof.dr.ir. J.A. Mulder

Uitgeverij

Uitgeverij van de afdeling van het werk van de afdeling in de afdeling
en de afdeling van de afdeling van de afdeling van de afdeling van
de afdeling van de afdeling van de afdeling van de afdeling van
vrijdag 1 november 1991

Jaar

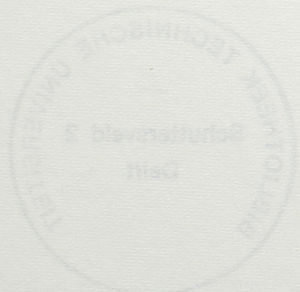
Prof.dr.ir. J.A. Mulder



Mulder_
red_
1991

DE STABILITEIT EN BESTURING
VAN VLIEGTUIGEN:
THEORIE EN PRAKTIJK

Drukkerij
Prof.dr. J.A. Mulder 1 november 1991



DE STABILITEIT EN BESTURING VAN VLIEGTUIGEN

DE STABILITEIT EN BESTURING
VAN VLIEGTUIGEN:
THEORIE EN PRAKTIJK

INHOUDSOPGAVE

INLEDE

Intreerede

uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar in de Stabiliteit en Besturing van Lucht- en Ruimtevoertuigen aan de Faculteit der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek van de Technische Universiteit Delft, op vrijdag 1 november 1991

door

Prof.dr.ir. J.A. Mulder

DE STABILITEIT EN BESTURING
VAN VLIEGTUIGEN:
THEORIE EN PRAKTIK

Inhoudsopgave

afgesproken bij de afdeling van het Instituut van Hoogleraren in de Technische
en Besturing van Lucht- en Ruimtevaartuigen aan de Faculteit der
Technische Wetenschappen van de Technische Universiteit Delft, op
vrijdag 1 november 1951

door

Prof. dr. J.A. Müller

Aan Annemarie.

DE STABILITEIT EN BESTURING VAN VLIEGTUIGEN

INHOUDSOPGAVE

INLEIDING	1
DE BEWEGINGSVERGELIJKINGEN	4
DYNAMISCHE VliegPROEVEN	7
VLUCHTSIMULATIE	10
GEAVANCEERDE BESTURING	17
DE MENSELIJKE FACTOR	21
TOT BESLUIT	24
GERAADPLEEGDE LITERATUUR	27

*Mijnheer de Rector Magnificus en overige leden van het College van Bestuur,
Geachte hoogleraren, docenten en medewerkers van deze Universiteit,
Geachte dames en heren studenten,
Beste familieleden, vrienden en overige gasten.*

Zeer gewaardeerde toehoorders.

INLEIDING

De oude droom van de mens is zelf te kunnen vliegen als een vogel. Hoewel een vliegtuig vrij door de lucht vliegt, lijken we in de cockpit wel heel ver van die droom verwijderd. We hebben bijvoorbeeld geen fysiek contact met het ons omringende medium en slechts met in de cockpit opgestelde stuurorganen kunnen we de beweging van het vliegtuig beïnvloeden. Voor het waarnemen van de bewegingstoestand van het vliegtuig zoals de hoogte en de snelheid moeten we bovendien gebruik maken van in de cockpit opgestelde instrumenten. Het verst verwijderd van de oude droom lijkt de vlieger van het moderne verkeersvliegtuig, waarvan de cockpit is uitgerust met displays en computers. De verkeersvlieger stuurt niet meer zelf, maar voedt de flightcontrol en flightmanagement computers met noodzakelijke gegevens, hij controleert de voortgang van de vlucht en zorgt voor de communicatie met de verkeersleiding. Is voor hem misschien de oude droom vervlogen?

Zelf heb ik vele vluchten mogen uitvoeren met verschillende typen verkeersvliegtuigen waaronder zeer moderne. Hoewel subjectief spreek ik dus uit ervaring als ik de vraag beantwoord. Wat maakte het vliegen de oude droom van de mens? Het moet het verlangen zijn geweest zich los te maken van de begrenzing van het twee dimensionale aardoppervlak en zich schijnbaar moeiteloos te verplaatsen door de ruimte. Dat nu is nog steeds wat de verkeersvlieger ervaart en zo is mijn antwoord op de zo juist gestelde vraag: nee, de oude droom is verwezenlijkt!

Natuurlijk is de echte reden van het snel groeiende luchtverkeer niet de verwezenlijking van een oude droom maar de grote en toenemende behoefte aan vervoer. Daarmee ontstaan problemen op het gebied van de verkeersleiding, die het gevolg zijn van congestie in de lucht en op de vliegvelden. De sterke toename van het vliegverkeer maakt ook het probleem van de geluidsoverlast opnieuw actueel. Tenslotte, maar niet in de laatste plaats, is er het probleem van de vervuiling van met name de hogere lagen in de atmosfeer door de emissies van straalmotoren en de mogelijke bijdrage van het vliegverkeer aan het zogenaamde broeikas effect. Het is duidelijk dat deze problemen in de komende tijd aan belang zullen winnen en dat afdoende oplossingen een absolute voorwaarde zijn voor duurzame groei in de luchtvaart.

In Nederland heeft de luchtvaart, maar ook de ruimtevaart zich altijd mogen

koesteren in een brede belangstelling. Het zwaartepunt van de nationale lucht- en ruimtevaart activiteiten is de succesvolle vliegtuigbouwer Fokker. Er zijn echter ook verschillende kleinere industrieën en ondernemingen in Nederland met activiteiten op het gebied van de lucht- en ruimtevaart. Daarnaast is er het Nationaal Lucht- en Ruimtevaart laboratorium en zijn er meer dan vier grotere en kleinere luchtvaart maatschappijen. Tenslotte moeten nog genoemd worden de Rijks Luchtvaart Dienst, de Koninklijke Luchtmacht en de Koninklijke Marine Luchtvaart Dienst.

Zo is het dan niet verwonderlijk dat de Faculteit der Luchtvaart- en Ruimtevaart techniek van deze Technische Universiteit een bloeiende is, met nu in totaal meer dan 1200 ingeschreven studenten. Als nieuw benoemde hoogleraar zal ik werkzaam zijn op het vakgebied van de Stabiliteit en Besturing van Lucht- en Ruimtevaartuigen. Ik zal dat mogen doen als voorzitter van de vakgroep Stabiliteit en Besturing.

Dames en Heren,

In mijn intrede wil ik U een overzicht geven van het vakgebied van de Stabiliteit en Besturing van vliegtuigen en zal ik U trachten te schetsen welke boeiende ontwikkelingen ons in dit vakgebied te wachten staan. Uit de titel van mijn rede mag blijken dat het gaat om een vakgebied waarin theorie gepaard gaat met de praktijk. Dat moet vanzelfsprekend in het onderwijs dan ook duidelijk naar voren komen. Voor wat betreft het onderzoek betekent het dat, om daadwerkelijk aan de ontwikkelingen te kunnen bijdragen, we de beschikking moeten blijven houden over excellente experimentele faciliteiten. In het vervolg van mijn rede zal ik U de plannen tonen voor twee *nieuwe* experimentele faciliteiten, die ook in de toekomst onderzoek op hoog niveau mogelijk moeten maken.

We hebben nu in de vakgroep onze onderzoek inspanning geconcentreerd in vier projectgroepen. Drie projectgroepen zijn gericht op de luchtvaart. De volgende vier onderwerpen komen daar aan de orde:

- Dynamische vliegproeven,
- Vluchtsimulatie,
- Geavanceerde besturing en
- De menselijke factor.

Ik zal deze vier onderwerpen hier achtereenvolgens behandelen. In het gehele vakgebied echter, spelen de zogenaamde bewegingsvergelijkingen een centrale rol. Ze zijn in feite het theoretische uitgangspunt, en het onderwijs in de Stabiliteit en Besturing *begint* dan ook met een grondige behandeling van de bewegingsvergelijkingen. Zo ook in deze rede, die begint met de bewegingsvergelijkingen.

In één van onze vier projectgroepen houden we ons bezig met de

dynamische eigenschappen en besturing van ruimtevaartuigen. Dat onderwerp valt buiten de context van deze rede, maar het betekent niet dat we onze ruimtevaart inspanningen van minder belang achten dan die op het gebied van de luchtvaart. Integendeel zelfs, het is duidelijk dat op de langere termijn de ruimtevaart een steeds belangrijker plaats zal innemen.

DE BEWEGINGSVERGELIJKINGEN

De beweging van het vliegtuig in de atmosfeer kan wiskundig worden beschreven met behulp van de zogenaamde bewegingsvergelijkingen. Ze kunnen worden afgeleid uit de tweede wet van Newton. Het vliegtuig heeft zes graden van bewegingsvrijheid en daarom zijn er ook zes bewegingsvergelijkingen. Als de op het vliegtuig werkende luchtkrachten en momenten bekend zijn is het zonder meer mogelijk de vergelijkingen numeriek op te lossen met computers. Uit de oplossing volgen de baan, snelheid en stand van het vliegtuig als functie van de tijd. Maar hoe kunnen de voor de oplossing noodzakelijke luchtkrachten en momenten worden bepaald?

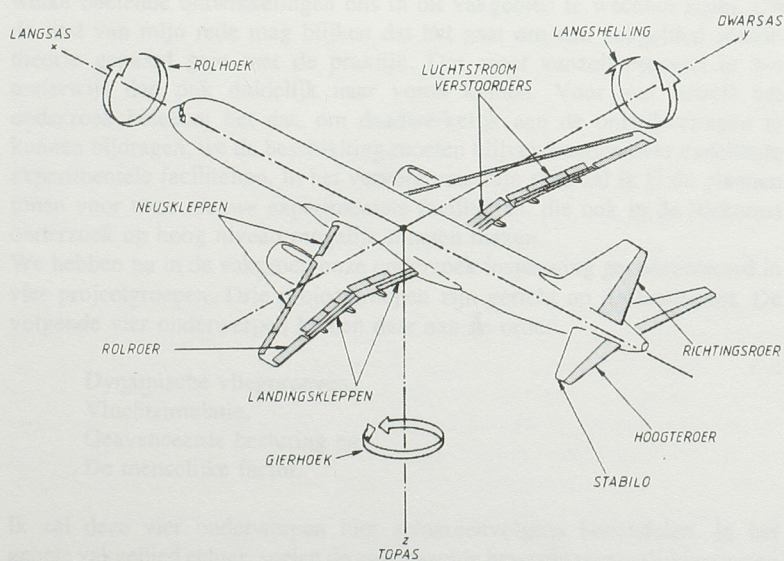


Fig. 1: De stroming om het vliegtuig kan vanuit de cockpit worden beïnvloed met roeren, kleppen en verstoorders.

De vlieger kan vanuit de stuurhut het stromingsveld om het vliegtuig op een tamelijk directe wijze beïnvloeden met het hoogteroer, de rolroeren en het richtingsroer, zie Fig. 1. De door de roeren gegenereerde aërodynamische moment veranderingen zijn afhankelijk van de grootte van de roeruitslagen en van de dynamische druk (dus snelheid) van de luchtstroming. De momenten resulteren in overeenkomstige hoekversnellingen waardoor dus standveranderingen ontstaan.

De bewegingen van het vliegtuig in de vlucht kunnen echter niet worden begrepen door alleen de met de roeren opgewekte momenten om het zwaartepunt te beschouwen. Door de verandering van de stand van het vliegtuig verandert tevens de richting van de aanstromende lucht, die bepaald wordt door de invalshoek en de sliphoek. De invalshoek en de sliphoek blijken grote invloed te hebben op de eerder met de roeren opgewekte aërodynamische momenten. Ook de rotatiesnelheden van het vliegtuig, en de veranderingen *snelheid* van de invalshoek en de sliphoek zijn van invloed.

Het is mogelijk de invloed van de genoemde grootheden op de op het vliegtuig werkende krachten en momenten wiskundig te beschrijven met wat wordt genoemd een aërodynamisch model. Als nu het aërodynamische model van de krachten en momenten wordt toegevoegd aan de bewegingsvergelijkingen ontstaat een mathematische beschrijving van de bewegingen van het vliegtuig door de lucht. Voor het uitvoeren van manoeuvres, zoals bijvoorbeeld het inzetten van een bocht op constante hoogte, zijn nauwkeurig gedoseerde uitslagen nodig van het hoogteroer, de rolroeren en het richtingsroer. De *zelfde* roeruitslagen kunnen worden gesubstitueerd in het mathematische model.

De aldus afgeleide bewegingsvergelijkingen vormen een niet-lineair stelsel van differentiaalvergelijkingen, en kunnen daarom alleen numeriek worden opgelost met behulp van een computer. Ze worden in deze niet-lineaire vorm veelvuldig gebruikt, met name ook voor vluchtsimulatie, waarover straks meer.

Analytische oplossingen echter zijn ook mogelijk als de bewegingsvergelijkingen worden gelineariseerd. Dat betekent dat ze in principe alleen geldig zijn voor kleine afwijkingen van een bepaalde nominale vliegconditie. De aërodynamische modellen krijgen nu ook een lineaire vorm met als parameters de zogenaamde stabiliteits- en besturings afgeleiden. In zijn boek 'Stability in Aviation' geeft G.H. Bryan al een gedetailleerde beschrijving van deze gelineariseerde bewegingsvergelijkingen. Het boek werd gepubliceerd in 1911, en geeft de bewegingsvergelijkingen in een vorm die ook nu nog dagelijks wordt gebruikt. De gelineariseerde bewegingsvergelijkingen zijn van een bijzondere schoonheid en elegantie en wel om de volgende redenen. Het blijkt in de eerste plaats dat voor symmetrische vliegtuigen de bewegingsvergelijkingen uiteenvallen in twee groepen die volledig onafhankelijk zijn. Er is één groep die de symmetrische responsies beschrijft op symmetrische roeruitslagen, dus het hoogteroer. De tweede groep beschrijft de asymmetrische responsies op asymmetrische

roeruitslagen, dus op de uitslagen van de rolroeren en het richtingsroer. Hoewel in principe de vergelijkingen alleen gelden voor oneindig kleine afwijkingen van de nominale vliegconditie, blijkt in de praktijk een veel grotere mate van geldigheid. Zo kan bijvoorbeeld iedere vlieger bevestigen dat de onafhankelijkheid van de symmetrische en asymmetrische bewegingen inderdaad op gaat.

Als de vliegtuigresponsies met lineaire bewegingsvergelijkingen kunnen worden beschreven is bekend dat de vrije responsies van het vliegtuig, dus bewegingen waarbij de roeren na excitatie van de beweging weer terug gekeerd zijn naar de uitgangspositie, in feite een som is van verschillende zogenaamde eigenbewegingen. Zo zijn de symmetrische bewegingen opgebouwd uit twee periodieke, dus slingerbewegingen, namelijk de zogenaamde snelle- en de langzame slingering. De asymmetrische bewegingen zijn in het algemeen opgebouwd uit een periodieke beweging, de zogenaamde zwierbeweging, en twee aperiodieke bewegingen, genoemd de spiraalbeweging en de rolbeweging. Voor de handbesturing van conventionele vliegtuigen moeten de snelle periodieke en aperiodieke bewegingen stabiel zijn en voldoende goed gedempt. Het blijkt dat de ontwerper van het conventionele vliegtuig in ieder geval moet zorg dragen voor zogenaamde *statische stabiliteit* als noodzakelijke voorwaarde voor dynamische stabiliteit, dat wil zeggen voldoende demping van de eigenbewegingen. Voor een gegeven ligging van het vliegtuigzwaartepunt ontstaat statische stabiliteit bij een conventioneel vliegtuig door de werking van de staartvlakken. In feite kan de werking van de staartvlakken worden vergeleken met die van een windvaan.

In de eerste periode van de luchtvaart verwachtte men dat stabiliteit van alle eigenbewegingen essentieel zou zijn voor het door de mens bestuurde vliegtuig. Het blijkt echter dat als de eigenbewegingen maar voldoende langzaam verlopen de *mens* door terugkoppeling van de beweging naar de stuurorganen kan zorgen voor stabiliteit. Zo blijkt bijvoorbeeld een onstabiele asymmetrische spiraalbeweging in de praktijk geen wezenlijk probleem op te leveren.

De gelineariseerde bewegingsvergelijkingen spelen nog steeds een belangrijke rol in ons vakgebied. Niet-lineaire bewegingsvergelijkingen moeten worden gebruikt daar waar grote afwijkingen van een gegeven nominale vliegconditie moeten worden beschreven.

Het nadeel van de niet-lineaire bewegingsvergelijkingen is dat het fysisch inzicht in de aard van de beweging verloren kan gaan. Dat is in het bijzonder het geval bij de beschrijving van het gedrag van moderne jachtvliegtuigen bij zeer grote invalshoeken. Dan wordt het aërodynamische gedrag duidelijk niet-lineair door het ontstaan van ingewikkelde wervelconfiguraties. Men probeert nu door toepassing van nieuwe theoretische ontwikkelingen op het gebied van niet-lineaire dynamische systemen, men spreekt hier wel van chaotische systemen, het dynamisch gedrag van zulke vliegtuigen beter te begrijpen.

DYNAMISCHE VliegPROEVEN

Natuurlijk is het de vraag in hoeverre de bewegingsvergelijkingen het werkelijke gedrag van het vliegtuig in de vlucht beschrijven. Gedeeltelijk kan die vraag direct worden beantwoord. Voor het als star veronderstelde vliegtuig volgden de bewegingsvergelijkingen uit de tweede wet van Newton. Over de geldigheid daarvan bestaat geen twijfel. Het bleek echter noodzakelijk aan de bewegingsvergelijkingen modellen toe te voegen voor op het vliegtuig werkende aërodynamische krachten en momenten. Het zijn nu deze aërodynamische modellen, die de mate van geldigheid van het theoretische model voor de vliegtuig responsies bepalen.

Hoe ingenieus ook, en met hoeveel zorg ook uitgevoerd, windtunnel proeven hebben slechts een beperkte nauwkeurigheid. Uiteindelijk zijn er daarom vliegproeven nodig om het aërodynamische model te toetsen aan de praktijk. De moderne aanpak is gebruik te maken van de zogenaamde dynamische vliegproeftechniek.

Geachte toehoorders,

We betreden nu het terrein van wat is gaan heten de vliegtuigparameter identificatie. Voor wat betreft de theorie gaat het om wiskundige en numerieke technieken die bekend staan onder de verzamelnaam van *stysteemidentificatie*. Het is niet moeilijk het basisprincipe van de systeemidentificatie te begrijpen. Een systeem is bijvoorbeeld een vliegtuig. De door de vlieger gegeven roeruitslagen zijn de ingangssignalen van het systeem. We zouden de baan en stand van het vliegtuig vanuit een bepaalde beginpositie kunnen meten, dat zijn de zogenaamde uitgangssignalen. We hebben gezien, dat we met behulp van de bewegingsvergelijkingen de baan en stand van het vliegtuig ook kunnen *berekenen*, als we de door de vlieger gegenereerde stuursignalen kennen en numerieke waarden kiezen voor de parameters in het aërodynamische model. We zouden het resultaat van de berekening voor een aantal verschillende parameter waarden kunnen uitzetten als functie van de tijd in een figuur. Als we in de zelfde figuur de in de vlucht *gemeten* waarden van de zelfde variabele uitzetten, kunnen we een verstandige uitspraak kunnen doen over de waarde van de gezochte parameter in het aërodynamische model. De parameter waarde die de beste overeenstemming geeft tussen de berekende en de gemeten responsies is de meest waarschijnlijke.

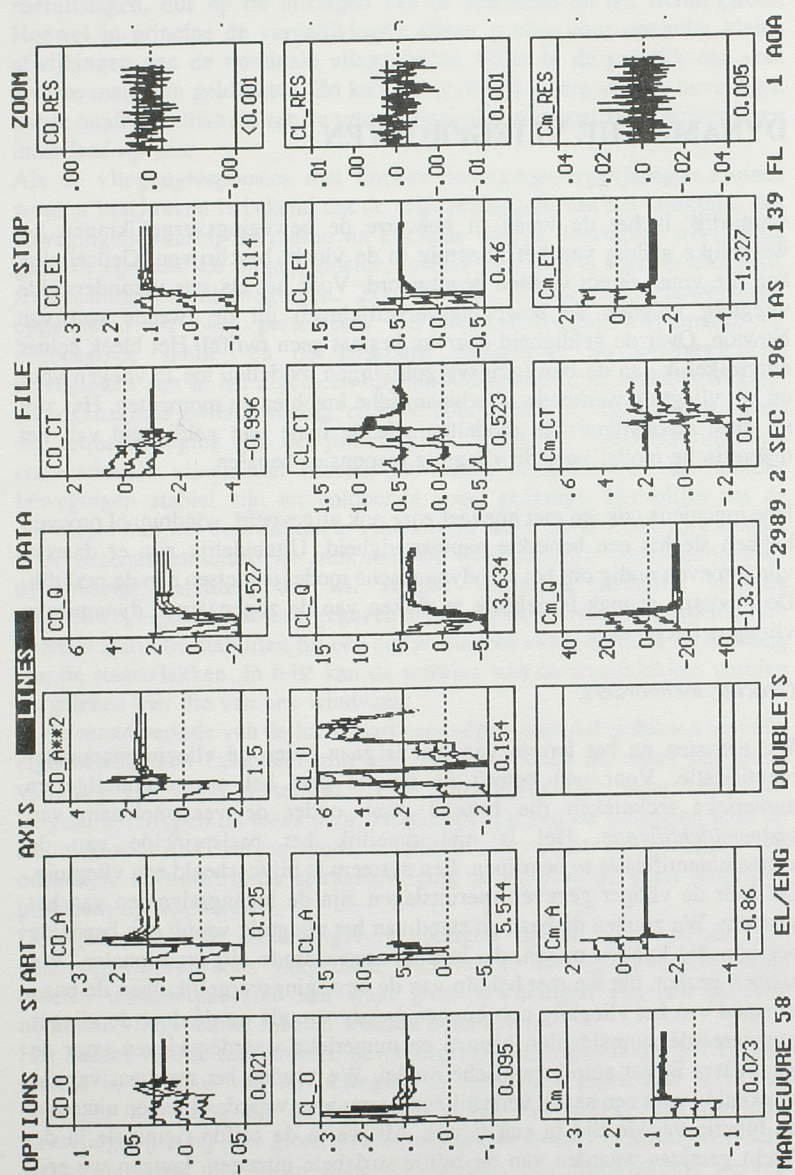


Fig. 2: Tijdens een dynamische vliegproefmanoeuvre berekende en gepresenteerde waarden van een aantal aërodynamische model parameters.

In principe kunnen zo stabiliteits- en besturingsafgeleiden, maar ook de parameters in niet-lineaire aërodynamische modellen, worden bepaald uit in de vlucht gemeten responsies op in principe willekeurige, maar wel nauwkeurig gemeten stuursignalen. Omdat we parameter waarden afleiden niet uit zoals vroeger metingen in stationaire vlucht maar uit metingen in manoeuvres, wordt gesproken over dynamische vliegproeven.

Het is nu mogelijk het aërodynamische gedrag van het vliegtuig voor een groot aantal nominale vliegcondities 'in kaart te brengen' door bij ieder van die nominale vliegcondities vliegproefmanoeuvres uit te voeren.

De vliegproef ingenieur die zich bezig houdt met de dynamische vliegproef techniek construeert in feite daaruit een aërodynamisch model van het vliegtuig voor alle van belang zijnde vliegtoestanden. Hij moet daarom kennis van de vliegtuigaërodynamica paren aan kennis van zowel de schattingstheorie als de vliegtuiginstrumentatie techniek. Dat maakt het vak niet gemakkelijk, maar aan de andere kant is het moeilijk de diepe voldoening te beschrijven als een door ons gemaakt model de kwaliteit blijkt te hebben een niet eerder geanalyseerde manoeuvre nauwkeurig te voorspellen. Het is duidelijk dat een dergelijk model kan worden gebruikt voor bijvoorbeeld vluchtsimulatie, waarover zo dadelijk meer.

De eerlijkheid gebiedt te zeggen dat wij in de vakgroep onze sporen hebben verdiend met de ontwikkeling van de dynamische vliegproeftechniek. We hebben daarbij gewerkt aan efficiënte algoritmen en aan verfijnde meettechnieken, de laatste jaren in nauwe samenwerking met het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium. Er zijn nog steeds nieuwe ontwikkelingen. Eén daar van wil ik U nog tonen. In een recent vliegproeven programma hebben we gedemonstreerd dat het mogelijk is de parameters in zowel lineaire- als niet-lineaire aërodynamische modellen te berekenen tijdens het uitvoeren van de manoeuvre zelf, dus in wat wordt genoemd werkelijke tijd. Aan boord zien we op het beeldscherm van een aan het meetsysteem gekoppelde PC hoe de geschatte waarden van de parameters convergeren naar een eindwaarde als meer meetgegevens binnenkomen, zie Fig. 2. De buitenste twee lijnen in ieder plaatje zijn een maat voor de nauwkeurigheid. We zien dat de nauwkeurigheid toeneemt als de tijd voortschrijdt en meer metingen zijn verwerkt. Het grote voordeel is dat nu nog tijdens de vlucht kan worden vastgesteld of de parameters goed zijn bepaald en bijvoorbeeld kan worden besloten een manoeuvre te herhalen of om de *vorm* van de manoeuvre te veranderen.

VLUCHTSIMULATIE

U weet *Geachte Toehoorders* nu voldoende van bewegingsvergelijkingen in niet-lineaire of in gelineariseerde vorm om in te zien dat zij de centrale rol moeten spelen in de vluchtsimulatie. In de cockpit van een moderne vluchtnabootser, zoals er nu honderden in de wereld intensief in gebruik zijn, genereert de vlieger met de hand of met een automatisch besturingssysteem stuursignalen waarna de responsie van het vliegtuig berekend kan worden. Voor een natuurgetrouwe nabootsing, dat wil zeggen zonder een ontoelaatbaar grote vertraging, moeten de bewegingsvergelijkingen tussen de 30 en 60 maal per seconde worden doorgerekend. De zo berekende stand en baan van het vliegtuig worden vanuit de computer teruggestuurd naar de vluchtnabootser en daar gebruikt voor de besturing van vlieginstrumenten en beeldschermen.

Het aansturen van alleen de instrumenten en beeldschermen is onvoldoende voor een natuurgetrouwe nabootsing van de vlucht. Een essentieel element zijn de door de vlieger met het vestibulaire systeem waargenomen bewegingen. Daarom zijn moderne vluchtnabootsers uitgerust met bewegingssystemen waarop de cockpit is gemonteerd. Het is natuurlijk niet mogelijk de beweging van het vliegtuig precies te reproduceren met de vluchtnabootser: het vliegtuig verplaatst zich met grote snelheid terwijl de vluchtnabootser een bewegingsmogelijkheid van op z'n hoogst enkele meters heeft. Gelukkig kan de vlieger uniforme beweging niet, maar slechts de verandering van beweging waarnemen. Het is de *verandering* van beweging die gebruikt wordt om het bewegingssysteem te besturen, en er wordt slim gebruikt gemaakt van de menselijke waarnemingsdrempels om ongemerkt het bewegingssysteem steeds terug te sturen naar een middenstand.

De moderne vluchtnabootser is ook uitgerust met digitale zichtsystemen waarmee de vlieger omgevingsbeelden kan waarnemen. Het is dan bijvoorbeeld mogelijk een visuele landing uit te voeren of te taxiën naar de startbaan.

De simulatie van stuurkrachten is zeer belangrijk, en tenslotte blijkt ook akoestische simulatie van belang te zijn. De vlieger krijgt bijvoorbeeld door het windgeruis een indruk van de vliegsnelheid, en wordt direct gealarmeerd als het in de cockpit plotseling te rustig wordt. Evenals de zichtsimulatie, gebeurt de acoustische simulatie in de moderne vluchtsimulator digitaal.

Nu we hebben gezien hoe een moderne vluchtnabootser is opgebouwd, is het interessant een korte blik te werpen op het verleden. Tot onze verassing stellen we vast dat de geschiedenis van de vluchtsimulatie bijna net zo lang

is als die van de bemande luchtvaart. De eerste vluchtnabootser was de 'Antoinette trainer', die door de instructeurs lijfelijk werd bewogen voor het nabootsen van de effecten van langshelling en rolhoek, Fig. 3.

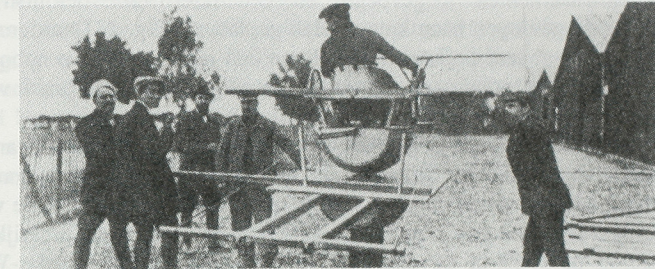


Fig. 3: De 'Antoinette trainer', 1910.

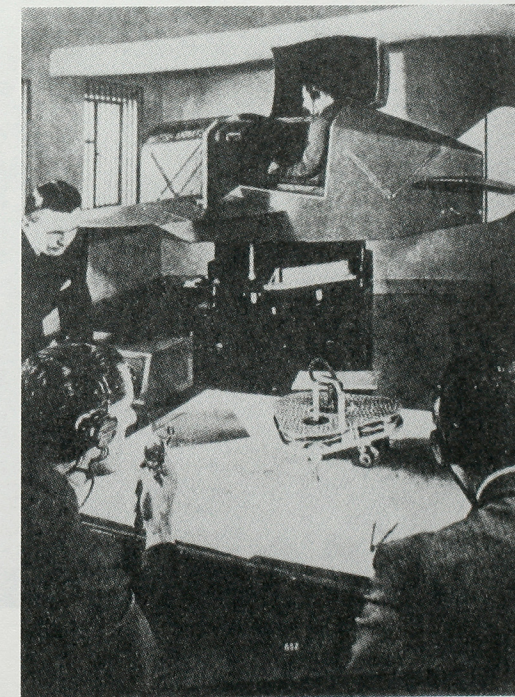


Fig. 4: De 'Link trainer', 1930.

Het jaar is 1910, slechts zeven jaar na de eerste succesvolle motorvlucht. De eerste echt succesvolle vluchtnabootser werd ontwikkeld door Edwin Link tussen 1927 en 1929. Ook deze vluchtnabootser was uitgerust met een bewegingssysteem. Er konden rotaties worden uitgevoerd om drie assen. Link was van huis uit een orgelbouwer en zo verbaast het ons niet dat het bewegingssysteem pneumatisch werd aangedreven. In 1930 werden blindvlieginstrumenten toegevoegd, en een tafel voor de instructeur waarmee de gevlogen baan kon worden geplot, zie Fig. 4. Daardoor werd de 'Link trainer' zeer populair hoewel van een natuurgetrouwe nabootsing van de vliegtuigresponsies op stuuruitslagen nog nauwelijks sprake was.

De tweede wereld oorlog gaf de ontwikkeling te zien van de analoge computer waarmee in principe de bewegingsvergelijkingen van een vliegtuig konden worden opgelost. Dat betekende dat de theorie - die van de bewegingsvergelijkingen - nu kon worden toegepast in de praktijk. Dat resulteerde in 1948 in de door het Amerikaanse bedrijf Curtiss-Wright gebouwde vluchtnabootser voor

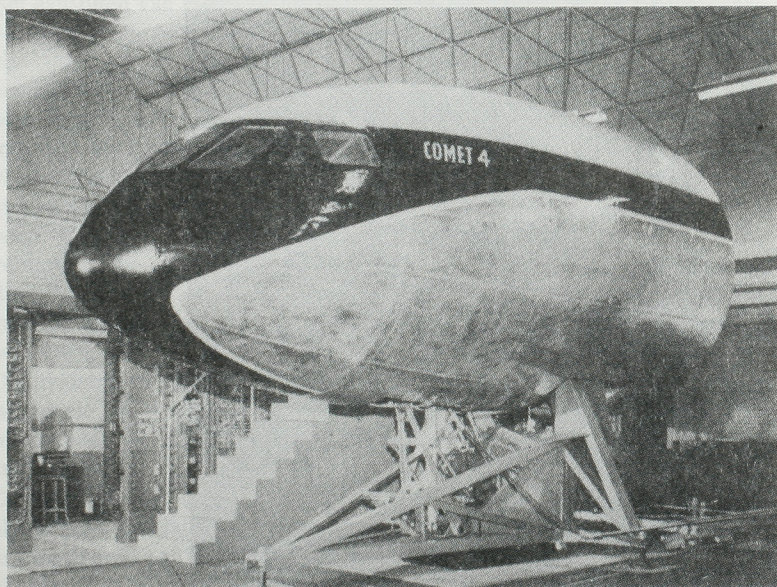


Fig. 5: COMET IV vluchtnabootser met één graad van bewegingsvrijheid, 1958.

de Boeing 377 Strato Cruiser. Deze vluchtnabootser was in zekere zin een stap terug vergeleken bij de Link trainer. De communis opinio was dat de vlieger met behulp van de vlieginstrumenten het vliegtuig zou moeten besturen en dat daarom simulatie van de effecten van beweging onbelangrijk was. De vluchtnabootser stond daarom vast opgesteld op de grond.

Het waren nu vliegers die duidelijk maakten dat er nu een wezenlijk verschil was met de werkelijke vlucht door de afwezigheid van de zogenaamde 'motion cues'. Het eerste commerciële bewegingssysteem met één graad van bewegingsvrijheid werd in 1958 gebouwd door Rediffusion voor de Comet IV vluchtnabootser van de Engelse luchtvaartmaatschappij BOAC, zie Fig. 5. Dit bewegingssysteem kon alleen rotaties uitvoeren om de dwarsas. Na 1958 werd in feite het belang van bewegingssimulatie erkend en volgden al snel bewegingssimulatoren met 3-, 4- en 6 graden van bewegingsvrijheid.

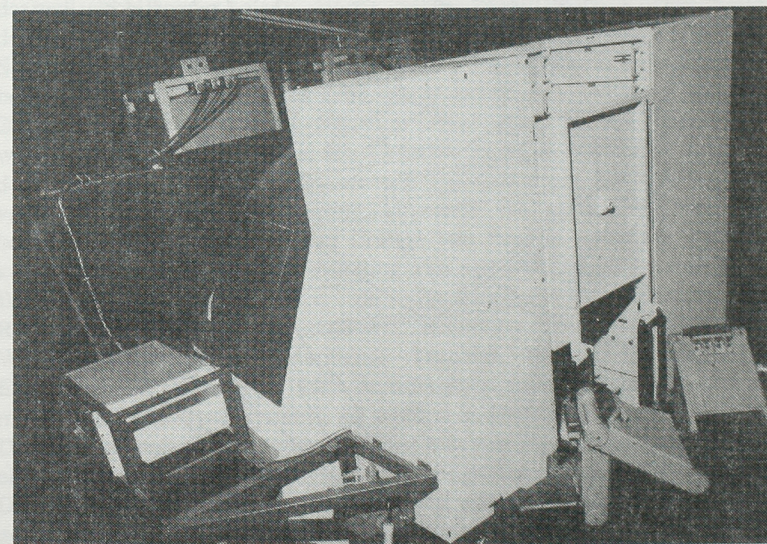


Fig. 6: Vluchtnabootser met drie graden van bewegingsvrijheid ontwikkeld en gebouwd in de Technische Hogeschool Delft, 1969.

In Delft werd in 1969 een bewegingssysteem met 3 graden van bewegingsvrijheid operationeel, Fig. 6. Het systeem was ontworpen door Viersma en Blok van de Afdeling der Werktuigbouwkunde van de toenmalige Technische Hogeschool. Het betekende een doorbraak in de techniek van de bewegingssimulatie omdat het was uitgerust met een nieuw type elektrohydraulische servomotor met hydrostatische lagering. We vinden nu dit type servomotor terug in praktisch alle in de wereld in gebruik zijnde bewegingssystemen.

De in de jaren vijftig voor het eerst toegepaste digitale computers hebben nu de analoge computers bijna geheel verdrongen.

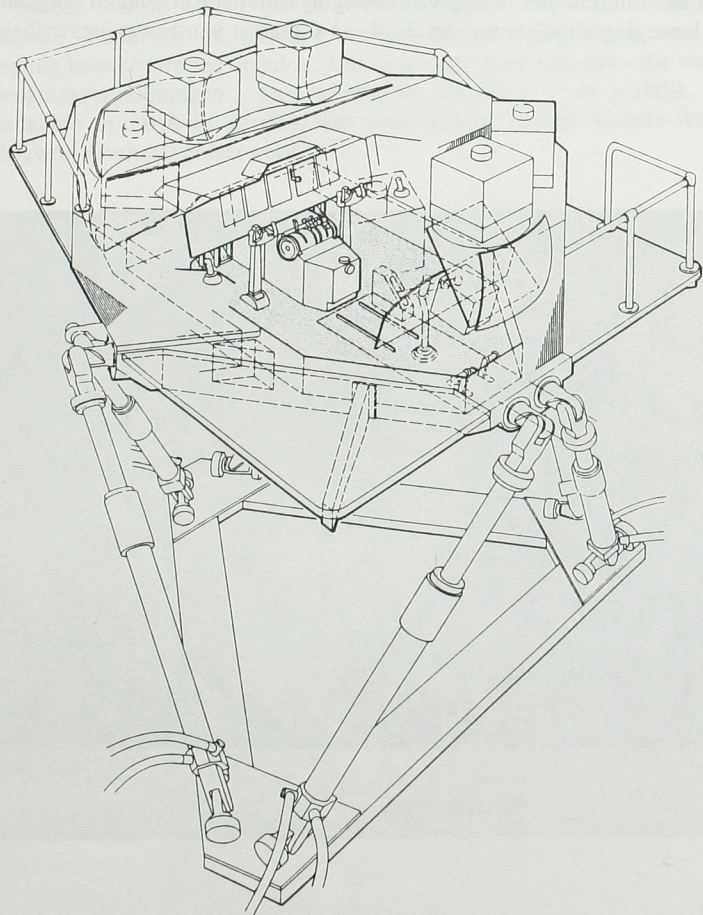


Fig. 7: Ontwerp van de 'BASic REsearch SIMulator'.

Grote voortgang werd geboekt met de generatie van het zicht vanuit de stuurhut. Natuurgetrouwe beelden van de start en de landing kunnen nu met snelle grafische computer systemen worden gegenereerd. Vliegers kunnen nu worden omgeschoold op een nieuw vliegtuigtype zonder ook maar één trainings vlucht op het vliegtuig zelf te hebben gemaakt. Hun eerste vlucht op het nieuwe type wordt dan dus uitgevoerd met passagiers!

Dames en Heren,

Het is duidelijk dat in de vluchtsimulatie, theorie samen gaat met de praktijk. Met theorie doel ik dan op de bewegingsvergelijkingen waarmee we nauwkeurig de responsies van het vliegtuig kunnen berekenen op stuursignalen en atmosferische verstoringen.

In de vluchtsimulatie wordt misschien niet de theorie direct *getoetst* aan de praktijk zoals bij de vliegproeven het geval is. Maar wel is het zo dat vluchtsimulatie een bij uitstek praktisch vakgebied is dat alleen kan worden geleerd, en aan de ontwikkeling waarvan alleen maar kan worden bijgedragen door intensief zelf met vluchtnabootsers te werken. Het is daarom van bijzonder belang, dat we in de vakgroep gekozen hebben voor de bouw van een nieuwe, geavanceerde vluchtnabootser, de 'BASic REsearch SIMulator', afgekort BARESIM, zie Fig. 7. We zullen bij het ontwerp en de bouw van BARESIM dankbaar gebruik maken van onze, in een periode van 20 jaar opgebouwde ervaring met onze eerste vluchtnabootser. Essentieel was dat we in die periode altijd nauw konden samen werken met anderen in deze Universiteit en dat willen we ook nu weer doen. Het is bijzonder verheugend dat die samenwerking, uitgaande van goedkeuring door de betrokken Faculteitsraden en het College van Bestuur, een meer formeel karakter zal krijgen door de instelling van een interfacultaire werkgroep BARESIM, waarin behalve de Faculteit der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek ook zullen deelnemen de Faculteit der Werktuigbouwkunde en Maritieme Techniek en de Faculteit der Elektrotechniek. Belangrijk is dat de werkgroep door de industrie, en wel met name Hydraudyne Systems, zal worden ondersteund.

De vluchtnabootser zal worden uitgerust met een zogenaamd synergetisch elektrohydraulisch bewegingssysteem met zes graden van bewegingsvrijheid. Dat bewegingssysteem zal in de werkgroep worden ontworpen en worden gebouwd door de werkplaatsen van onze Universiteit. Het hierop gemonteerde platform, het zogenaamde 'flight-deck', zal worden opgebouwd uit geavanceerde materialen zoals koolstofvezel versterkte composieten en wellicht ook het nieuwe gelamineerde materiaal ARALL. Dankzij een lichtgewicht constructie van het platform zal de responsie snelheid van het bewegingssysteem worden geoptimaliseerd. Het platform zwaartepunt wordt zo laag mogelijk gehouden waardoor parasitaire effecten in de besturing kunnen worden geminimaliseerd. Door zijn modulaire opbouw zal het kunnen worden benut voor een verscheidenheid aan toepassingen, zoals de

simulatie van verkeersvliegtuigen met twee vliegers naast elkaar, de simulatie van hefschroefvliegtuigen of wegvoertuigen, maar ook voor meer fundamentele studies op het gebied van de vestibulaire en visuele perceptie. Voor zulke studies kan het platform worden uitgerust met een extra bewegingsmogelijkheid zodat de totale lengte van een lineaire beweging aanzienlijk kan toenemen tot iets minder dan 3 meter. Het platform zal worden uitgerust met eenvoudig te programmeren beeldschermen, waarvan de software in samenwerking met de Faculteit der Elektrotechniek is ontwikkeld. Het principe van de hydrostatische lagering zal worden toegepast in de servomotoren van het bewegingssysteem en in een veel kleinere vorm in de actief gestuurde sidesticks in de cockpit.

Glasvezels zullen worden gebruikt voor het transport van gegevens vanuit de vluchtsimulatie computer naar de simulator en terug. Voor de besturing van het bewegingssysteem zal gebruik gemaakt worden van de moderne multivariabele regeltheorie. Wat we willen bereiken, *waarde toehoorders*, is niet alleen een breed toepasbare experimentele faciliteit. We willen een nieuwe norm stellen voor de kwaliteit van de bewegingssimulatie van vluchtnabootsers. Voor wat betreft de beweging zal BARESIM daarom de beste vluchtnabootser ter wereld moeten worden.

GEAVANCEERDE BESTURING

Het inzicht van de gebroeders Wright dat een efficiënte besturing essentieel zou zijn bleek de sleutel tot succes. Met de eerste geslaagde motorvlucht in 1903 lieten zij zien dat vliegtuigresponsies niet perse stabiel behoeften te zijn als de vlieger maar in staat werd gesteld zelf de beweging te stabiliseren, dus te fungeren als regelsysteem. Zo als reeds gezegd zijn ook eigentijdse vliegtuigen niet stabiel: het huidige vliegtuig is indifferënt voor de vlieghoogte en de koers, en is bovendien meestal ook bochtonstabiel.

De al vroeg ingevoerde klassieke besturing met hoogteroer, richtingsroer en rolroeren, die met stangen en kabels direct verbonden werden met in de cockpit opgestelde stuurorganen vinden we eigenlijk nog steeds terug in vele eigentijdse verkeersvliegtuigen. De stuurkrachten kunnen in dergelijke vliegtuigen echter zo groot worden dat de door de vlieger gegeven stuuruitslagen met behulp van hydraulische servomotoren worden versterkt. Bij de grote vliegtuigen, worden de roeren zelfs volledig hydraulisch bestuurd en zijn de door de vlieger bediende stuurorganen nog slechts verbonden met de stuurkleppen op de servomotoren.

Het succes van de gebroeders Wright toonde aan dat automatische besturingssystemen voor de vlucht in feite overbodig waren. Toch ontwikkelde tussen 1910 en 1912 Dr. Sperry samen met zijn zoon Lawrence een succesvolle automatische piloot. Hoekverdraaiingen van een gyroscoop werden mechanisch versterkt met een luchturbine en gebruikt voor de besturing van ailerons en hoogteroer. In 1914 volgde een dramatische demonstratie. Op lage hoogte vliegend langs de Seine in de buurt van Parijs, stond Lawrence rechtop in zijn Curtiss vliegboot, handen op z'n hoofd, terwijl zijn boordwerktuigkundige over de vleugel naar buiten liep. Desondanks werden automatische piloten niet populair omdat er in feite geen behoefte aan was. Pas in de dertiger jaren, de periode dat de luchtvaartmaatschappijen lange afstandsvluchten gingen uitvoeren, werd de zogenaamde A2 automatische piloot van Sperry alom ingevoerd. Onderweg was koers en hoogte houden met de hand niet meer noodzakelijk en kregen de vliegers meer de taak de voortgang van de vlucht te *controleren*. Na de tweede wereld oorlog kregen de automatische piloten van verkeersvliegtuigen ook de mogelijkheid voor het uitvoeren van automatische naderingen, zoals in de A12 automatische piloot van Sperry, en automatische besturing van de vliegsnelheid, zoals in de automatische piloot van Bendix. Tenslotte volgde nog de mogelijkheid voor het uitvoeren van automatische

landingen. Hier werd vooral in Engeland in de zestiger jaren pionierswerk verricht.

Tussen het gebied van de pure handbesturing en de besturing met behulp van een automatische piloot bevindt zich het zogenaamde 'Stability Augmentation System' of SAS. Dergelijke systemen zijn ingevoerd om de dynamische eigenschappen van het vliegtuig te verbeteren, bijvoorbeeld door de demping van bepaalde eerder genoemde 'eigenbewegingen' van het vliegtuig te vergroten. Ze werken in feite in serie met het handbesturingssysteem. Een voorbeeld is de zogenaamde 'yaw damper', die in bijna ieder verkeersvliegtuig is terug te vinden en waarvan het doel is de demping van de zwierbeweging te verbeteren. Meestal wordt een SAS gezien als onderdeel van de automatische piloot. Als meer moderne naam voor een met een SAS gecombineerde automatische piloot wordt ook wel gebruikt AFCAS: Automatic Flight Control and Augmentation System. De Fokker 100 bijvoorbeeld is uitgerust met een zeer modern AFCAS dat door de vlieger kan worden gebruikt vanaf direct na de start tot en met de landing en de uitloop.

Het is nu tijd terug te keren tot het besturingssysteem zelf. Eén stap verder dan het zojuist genoemde 'irreversible control system' is een besturingssysteem waarbij geen enkele mechanische verbinding meer bestaat tussen de stuurorganen in de cockpit en de aan de roeren verbonden servomotoren. De door de vlieger gegenereerde stuuruitslagen worden direct omgezet in elektrische signalen die naar één of meerdere flight control computers worden gevoerd. In de computers worden vervolgens gewenste stuuruitslagen berekend die, na weer omzetting in elektrische signalen, dienen voor de besturing van elektrohydraulische servomotoren. De Airbus A-320 is het eerste verkeersvliegtuig dat met een dergelijk zogenaamd 'fly-by-wire' besturingssysteem is uitgerust. Toepassing van fly-by-wire besturingssystemen levert in principe een aantal belangrijke voordelen, afgezien van een niet te verwaarlozen gewichtsvoordeel. Ik noem er enkele:

de vliegtuigontwerper hoeft niet meer te zorgen voor statische stabiliteit, zodat kleinere staartvlakken kunnen worden toegepast,

onafhankelijk van door de vlieger gegeven stuursignalen zorgt het besturingssysteem ervoor dat bijvoorbeeld de rolhoek, de normale belastingsfactor en de vliegsnelheid altijd binnen veilige grenzen blijven,

bij het uitvoeren van manoeuvres in de vlucht worden de extra krachten op de constructie geminimaliseerd en

het comfort van de passagiers wordt aanmerkelijk verbeterd door verzwakking van de responsie op atmosferische turbulentie.

Geachte toehoorders,

Tot nu toe was het betoog over geavanceerde besturing in feite eenzijdig. Nog niet aan de orde is geweest is hoe de automatische piloot de stuurorganen, de roeren dus, moet besturen onder invloed van de bewegingstoestand van het vliegtuig. In en na de tweede wereldoorlog kwam de ontwikkeling van de regeltheorie opgang, die voor het ontwerp van de automatische piloot bijzonder goed toepasbaar bleek te zijn. De theorie werd geformuleerd in het zogenaamde frequentie domein, en de resultaten konden betrekkelijk gemakkelijk worden geïmplementeerd in de toenmaals toegepaste analoge computers. De theorie wordt tot op de dag van vandaag intensief toegepast door onder andere de ontwerpers van automatische besturingssystemen voor vliegtuigen. Ook onze studenten krijgen een grondige scholing in de klassieke theorie en de toepassing op de vliegtuigbesturing.

Nieuwe ontwikkelingen echter in de regeltheorie geven de mogelijkheid sneller betere regelsystemen te ontwerpen dan vroeger. Er is nu veel aandacht voor de zogenaamde robuuste regelaars, die ongevoelig zijn voor onzekerheden in het bij het ontwerp gebruikte mathematische model. Dergelijke moderne regelconcepten beginnen meer en meer toegepast te worden in vliegtuigbesturingssystemen.

Het zal U uit mijn betoog duidelijk geworden zijn dat nieuwe ontwikkelingen in de besturingstechnologie van toekomstige verkeersvliegtuigen een belangrijke invloed zullen hebben op de operationele en economische kwaliteiten van het vliegtuig. Het gaat om fly-by-wire besturing waarbij het vliegtuig niet meer direct, maar via computers wordt bestuurd. Om de nieuwe technologie meester te worden, en haar mogelijkheden te exploreren moeten we haar toegepassen in de praktijk.

Het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium en onze Faculteit der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek hebben besloten over te gaan tot de gemeenschappelijke aanschaf en operatie van een nieuw laboratorium vliegtuig. Eén van de kanshebbers is een klein tweemotorig straalvliegtuig, de Cessna Citation II, zie Fig. 8. Het zal begin 1993 op Schiphol moeten staan en dan gebruikt gaan worden voor een verscheidenheid van taken. Maar het zal ook worden uitgerust zodanig dat het geschikt wordt voor de evaluatie van fly-by-wire technologie. We hebben het dan ook in goed Nederlands genoemd het 'National Fly-by-wire Testbed', afgekort: NFT. Dit National Fly-by-wire Testbed is de tweede experimentele faciliteit die ik in het begin van mijn rede aankondigde. Het vliegtuig zal worden uitgerust met kleine elektrohydraulische servomotoren voor de besturing van de roeren en de vleugelkleppen. Ook de stuwkracht van de motoren kan worden gestuurd met servomotoren. De rechter bestuurders plaats wordt uitgerust met pro-

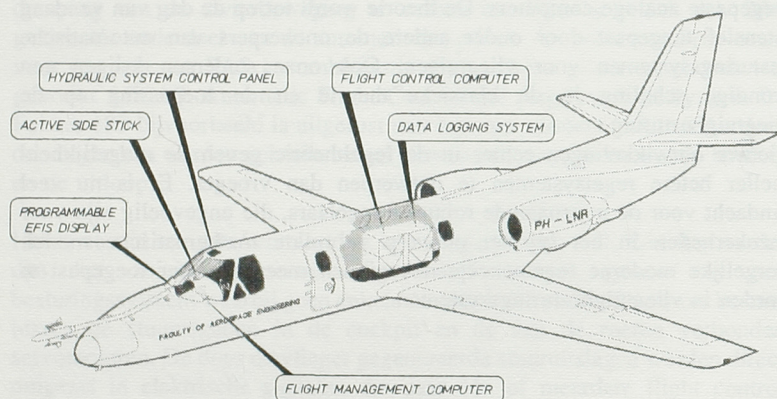


Fig. 8: Het 'National Fly-by-wire Testbed'.

grammeerbare beeldschermen en een zogenaamde 'sidestick' voor de besturing. In de cabine bevinden zich een multiprocessor computersysteem en de meetinstrumentatie. Samen met het NLR zullen wij met dit National Fly-by-wire Testbed onderzoek gaan doen op het gebied van geavanceerde besturing. Maar het zal als onderzoeksinstrument ook toegankelijk moeten zijn voor derden. Voor onze studenten betekent het NFT een fascinerende uitdaging om theoretische concepten te toetsen in de harde praktijk!

DE MENSELIJKE FACTOR

In de cockpit speelt de menselijke factor een grote rol. Hoe belangrijk die is volgt uit het feit dat het grootste deel van ongelukken en incidenten in de civiele en militaire luchtvaart wordt toegeschreven aan door de mens gemaakte fouten.

Van groot belang voor de veiligheid zijn cockpit procedures, waaraan door de bemanningsleden strak de hand moet worden gehouden. Maar niet minder belangrijk zijn wellicht meer subtiele zaken als de 'sfeer' in de cockpit, en de juiste mate van wat is genoemd de autoriteitsgradiënt tussen de gezagvoerder en de copiloot'.

Ook in het geautomatiseerde vliegtuig speelt de vlieger nog steeds een essentiële rol. Dat die rol een andere is dan in het conventionele vliegtuig wordt duidelijk als we de conventionele cockpit vergelijken met die van een in verre gaande mate geautomatiseerd vliegtuig. Een voorbeeld van een conventionele cockpit is die van de Fokker F-28, Fig. 10. Het vliegtuig maakte zijn eerste vlucht in 1967. De taak van de vlieger is de regeling van de langshelling en rolhoek als mede de stuwkracht zó dat het vliegtuig met de gewenste vliegsnelheid bijvoorbeeld op konstante hoogte en de gewenste koers vliegt. Verschillende navigatie systemen hebben een min of meer direct aanwijsinstrument op het instrumentpaneel. Er is een automatische piloot die een aantal taken van de vlieger kan overnemen.

De Fokker 100 is een modern vliegtuig dat in verre gaande mate is geautomatiseerd. Hier zien we beeldschermen in plaats van individuele instrumenten, Fig. 11. De bemanning wordt er op getraind voor de besturing in principe gebruik te maken van het automatische besturingssysteem, het AFCAS. Ook wordt er gebruik gemaakt van zogenaamde Flight Management Computers waaraan dan het AFCAS kan worden gekoppeld. Hoewel moderne besturingssystemen als van de Fokker 100 een grote vooruitgang betekenen met betrekking tot zowel de veiligheid als de economie zijn er toch ook nieuwe problemen. De vlieger wordt geacht de goede voortgang van de vlucht te controleren, en het probleem vooral bij langere vluchten is verveling tegen te gaan en de aandacht van de vliegers vast te houden. Ook is er het probleem van wat is genoemd 'situational awareness': de vlieger realiseert zich niet meer volledig wat de automaat met het vliegtuig aan het doen is, hij is 'out of the loop' geraakt.

De introductie van beeldschermen geeft nieuwe mogelijkheden voor de presentatie van informatie aan de vlieger. De optimale presentatie hangt echter nauw samen met de besturingseigenschappen van het fly-by-wire

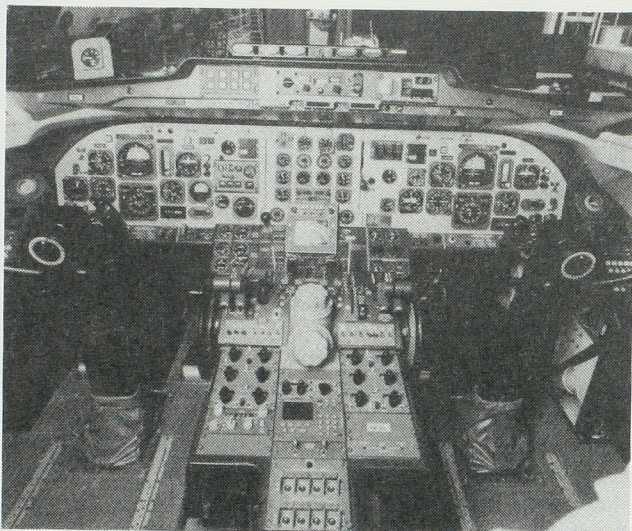


Fig. 9: Cockpit van de Fokker F-28, eerste vlucht 1967.

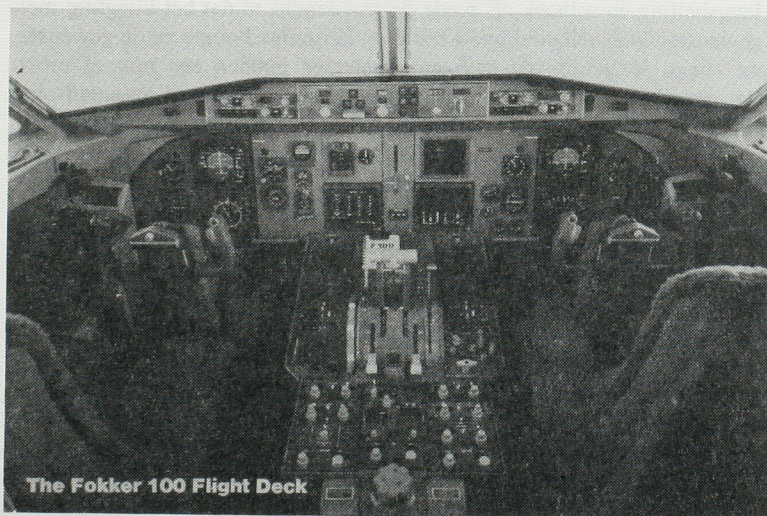


Fig. 10: Cockpit van de Fokker 100, eerste vlucht 1986.

vliegtuig. We hebben het plan die samenhang de komende jaren intensief te bestuderen. Het zal U niet verbazen dat daarbij onze nieuwe experimentele faciliteiten een essentiële rol zullen spelen.

TOT BESLUIT

Geachte Toehoorders, In mijn rede heb ik de deelgebieden van het vakgebied van de Stabiliteit en Besturing van vliegtuigen de revue laten passeren. De bewegingsvergelijkingen spelen de centrale rol in het vakgebied. Ik heb U proberen te laten zien dat het een vakgebied is waar bij uitstek theorie gepaard gaat met de praktijk. Dat moet dan in het onderwijs en het onderzoek duidelijk tot uiting komen. Het is daarom van bijzonder belang dat we de komende jaren zullen werken aan de verwezenlijking van twee nieuwe experimentele faciliteiten. We zullen dat gaan doen in nauwe samenwerking met anderen binnen en buiten de Technische Universiteit. Door de bouw en het gebruik van de nieuwe faciliteiten zullen we op hoog niveau kunnen bijdragen aan de ontwikkelingen in het vakgebied.

Gekomen aan het einde van mijn rede wil ik dank betuigen aan een ieder die mijn benoeming tot hoogleraar in de bewegingsleer van vliegtuigen heeft mogelijk gemaakt, in het bijzonder het College van Bestuur van de Technische Universiteit Delft.

Geachte hoogleraren van de Faculteit der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek. Mijn eerste periode als Uw kollega in de Faculteit is een bijzonder prettige en vruchtbare periode geweest. Ik dank dat met name aan Uw vriendelijke en welwillende houding. Ik beschouw het als een eer mij Uw kollega te mogen noemen. U kunt er van verzekerd zijn, dat ik in de Faculteit altijd mijn uiterste best zal doen de samenwerking tussen de vakgroepen zowel bij het geven van onderwijs als het doen van onderzoek nog verder te verdiepen.

Geachte voorzitter van het bestuur van de stichting NLR, geachte directie van het NLR. Er is altijd een goede samenwerking geweest tussen het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium en de Faculteit der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek, en met name ook met de vakgroep Stabiliteit en Besturing. Door de gemeenschappelijke aankoop van het nieuwe laboratoriumvliegtuig, en de gezamenlijke ontwikkeling van het National Fly-by-Wire Testbed, zal die samenwerking een nieuwe dimensie krijgen. Ik ben er van overtuigd dat onze toekomstige samenwerking bijzonder vruchtbaar zal zijn.

Hooggeleerde Gerlach, beste Otto. Als jouw opvolger als hoogleraar en

voorzitter van de vakgroep Stabiliteit en Besturing dank ik je van harte voor het in mij gestelde vertrouwen.

Hooggeleerde van Oosterom, beste Teus. Je grote enthousiasme voor de luchtvaart en met name de vliegerij zijn voor mij een bron van inspiratie geweest. De wijze waarop je kollege gaf in de vliegtuiginstrumentatie heeft wezenlijk bijgedragen tot mijn vorming als ingenieur. Ik wil je daarvoor van harte danken.

Hooggeleerde van Emden, beste Maarten. Wij kennen elkaar reeds uit onze studenten tijd. We hebben vele wetenschappelijke discussies gevoerd. Het idee voor de berekening van optimale testsignalen ontstond tijdens één van die discussies. Ik hoop op een lange voortzetting van onze vriendschap.

Hooggeleerde Bosgra, beste Okko. Ik beschouw het als een voorrecht in de komende jaren te mogen samenwerken onder andere bij de toepassing van de nieuwe regeltheorie. Dat die samenwerking naar alle verwachting ook een formeel karakter krijgt door participatie van de Faculteit der Werktuigbouwkunde en Maritieme Techniek in de interfacultaire werkgroep BARESIM, zie ik als een bekroning van een al vele jaren bestaande feitelijke samenwerking. Ik zou daarbij graag met name willen noemen *Ir. Teerhuis* en *Dr.ir. van der Weiden* van de vakgroep Meet- en Regeltechniek, de vakgroep waarvan jij de voorzitter bent.

Hooggeleerde van Willegen, beste Durk. Ik heb je leren kennen als een inspirerende kollega met een diepe belangstelling voor de luchtvaart. Je bent in Delft één van de trekkers van de avionica opleiding. Het verheugt mij bijzonder, dat met jouw steun naar verwachting ook de Faculteit der Elektrotechniek zal deelnemen in de interfacultaire werkgroep BARESIM. Ik verheug me zeer op onze samenwerking in de voor ons liggende jaren.

Hooggeleerde van den Bosch, beste Paul. In je eigen inaugurele rede lanceerde je het Delftse samenwerkingsverband voor de regeltechniek onder de naam 'Delft Control'. Het is nu al een belangrijk en succesvol initiatief gebleken dat we vanuit onze vakgroep van harte ondersteunen.

Geachte leden van de vakgroep Stabiliteit en Besturing. Mijn eerste periode als hoogleraar en voorzitter van de vakgroep is nu achter de rug. Er is een groei geweest van zowel het aantal studenten als stafleden, en er is nu een Vakgroep Onderwijs en Onderzoek Plan. De twee nieuwe experimentele faciliteiten die daarin zijn aangekondigd zullen ons in staat stellen onderzoek te doen van hoge kwaliteit. We zullen dat echter alleen kunnen in nauwe samenwerking met elkaar en met anderen. Wat mij betreft, ik verheug me op die samenwerking en kijk uit naar, wat ik verwacht te worden een buitengewoon vruchtbare periode.

Geachte dames en heren studenten. Het is vanaf dit kathedraker vaker gezegd, en ik zeg het ook: om U is het uiteindelijk allemaal begonnen. Dat geldt voor onze inspanningen voor het onderwijs en onderzoek, maar ook voor onze plannen voor de ontwikkeling van BARESIM en het National Fly-by-wire Testbed. Ze moeten U de kans geven kennis te maken met niet alleen de theorie, maar ook de praktijk van het vakgebied van de Stabiliteit en Besturing. Ik verheug me op Uw enthousiasme en inzet.

Geachte kollega vliegers. Ons bindt de liefde voor het vliegen, de samen meegemaakte avonturen en de voldoening van een goed verlopen vlucht. Ik beschouw het als een voorrecht me één van U te mogen noemen.

Beste vrienden. Ik wil jullie bedanken voor alle vriendschap, die onaantastbaar blijkt te zijn ook als ik wel eens wat weinig op kom dagen.

Beste familieleden. Ik heb steeds ervaren dat jullie mij alle vergeten verjaardagen nooit echt hebben kwalijk genomen. Daar staat tegenover mijn onvoorwaardelijke trouw.

Lieve Annemarie. Ik wil je bedanken voor alle kameraadschap in de afgelopen jaren.

Mam, het verheugt mij zeer dat juist jij hier aanwezig bent, hartelijk gefeliciteerd met je verjaardag.

Ik dank U voor Uw aandacht.

GERAADPLEEGDE LITERATUUR

M. Baarspul, 'A review of flight simulation techniques', Prog. Aerospace Sci., Vol. 27, pp. 1-120, 1990.

M. Baarspul, J.A. Mulder, eds., 'Essays on Stability and Control', *Liber Amicorum, dedicated to Prof.dr. O.H. Gerlach on occasion of his retirement as professor of the Faculty of Aerospace Engineering of Delft University of Technology*, Rapport LR-600, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek, oktober 1989.

G.P. Beasley, compiler, 'NASA Aircraft Controls Research', NASA Conference Publication 2296, NASA Langley Research Center, October, 1983.

H.W. Broer, F. Verhulst, 'Dynamische Systemen en Chaos, een revolutie vanuit de wiskunde', Epsilon Uitgaven, Utrecht, 1990, ISBN 90 5041 020 0.

G.H. Bryan, 'Stability in Aviation', MacMillan and co., Limited, Londen, 1911.

P. Eykhoff, 'System Identification', John Wiley & Sons, 1974, ISBN 0 471 24980 7.

F.H. Hawkins, 'Human Factors in Flight', Gower Technical Press, 1987, ISBN 0-291-39739-5 (pbk.).

D. McRuer, I. Ashkenas, D. Graham, 'Aircraft Dynamics and Automatic Control', Princeton University Press, 1973, ISBN 0-691-08083-6.

D. McRuer, D. Graham, 'Eighty Years of Flight Control: Triumphs and Pitfalls of the System Approach', Journal of Guidance and Control, July - August 1981, Vol. 4.

S. Oskamp, S. Spacapan, eds., 'People's Reactions to Technology', The Claremont Symposium on Applied Psychology, Sage Publications, The International Professional Publishers, 1990, ISBN 0-8039-3852-7/0-8039-3853-5(pbk.).

