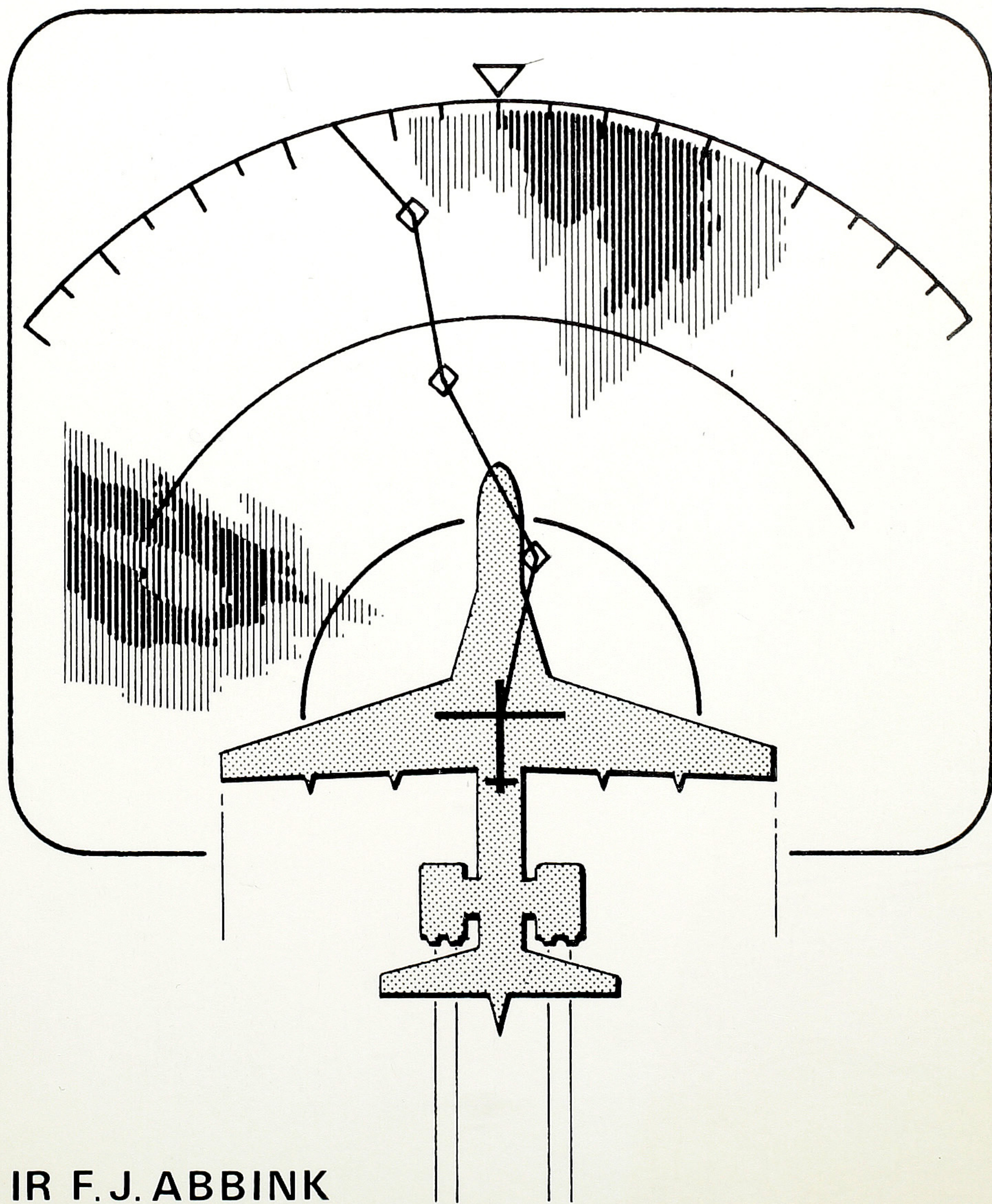


LUCHTVAART EN ELEKTRONICA

GROEI IN DE DERDE DIMENSIE



IR F. J. ABBINK

274899
Joi 4604

~~Red~~

Red. 19/12

LUCHTVAART EN ELEKTRONICA

Groei in de derde dimensie

Abbink_
red_
1982

LUCHTVAART EN ELEKTRONICA

Groei in de derde dimensie

Rede,

uitgesproken bij de aanvaarding van
het ambt van buitengewoon hoogleraar
in de vliegtuiginstrumentatie
aan de Afdeling der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek
van de Technische Hogeschool te Delft
op woensdag 22 september 1982
door

ir. F.J. Abbink

*At pater infelix, nec iam pater, "Icare" dixit,
"Icare", dixit, "ubi es, qua te regione requiram?"*

Metamorphoses VIII, 231–232
P.Ovidius Naso

*De droeve vader roept, helaes geen vader meer:
"Och Ikarus, mijn zoon, waer vlieghtge nu dus veer?
Waer zijtge, och Ikarus, waer zijtge, ô zoon, gebleven?"*

Publius Ovidius Nasoos Herscheppinge
vertaelt door J.v. Vondel
MDCLXXI

Dames en heren van het College van Bestuur,
dames en heren van de Hogeschoolraad,
mijnheer de Rector Magnificus en mijne heren Dekanen,
dames en heren medewerkers van de Technische Hogeschool,
dames en heren studenten,
dames en heren medewerkers van het Nationaal Lucht- en Ruimte-
vaartlaboratorium,
en verder u allen die hier aanwezig bent en daardoor blijk geeft van uw
belangstelling;

zeer geachte toehoorders,

Sinds het ontstaan van de mensheid is het transport van personen, vracht en informatie voor de mens van levensbelang geweest. Aan het begin van de twintigste eeuw waren er reeds grote vorderingen gemaakt op het gebied van de transportmiddelen. De stoommachine had ervoor gezorgd dat men per trein redelijk comfortabel de continenten kon doorkruisen en dat men per schip, onafhankelijk van de wind, de zeeën en oceanen kon oversteken.

In de twintigste eeuw kwam een geheel nieuw transportmiddel tot ontwikkeling, namelijk het vliegtuig. Ten gevolge van zijn grote snelheid en concurrerende exploitatiekosten heeft het vliegtuig, vooral over de middellange en lange afstand, de scheepvaart en het railvervoer voor het transport van passagiers, van post, en van beperkt houdbare en per volume-eenheid kostbare vracht geheel overvleugeld. In uren kunnen nu bestemmingen worden bereikt waar vroeger dagen of weken voor nodig waren. Zo vervoerden in 1981 de luchtvaartmaatschappijen van de 150 landen, aangesloten bij de "International Civil Aviation Organization" (ICAO), ongeveer 725 miljoen passagiers, 11 miljoen ton vracht en 1,5 miljoen ton post. Het aantal geproduceerde passagier-kilometers bedroeg ongeveer 1100 miljard (1).

De enorme groei van de luchtvaart in een periode van minder dan driekwart eeuw kan toegeschreven worden aan de snelle ontwikkeling van twee relatief jonge technologieën: de *vliegtuigbouwkunde* en de *elektronica*.

De *vliegtuigbouwkunde* concentreerde zich op aërodynamische vormgeving en de dynamica van het vliegtuig en op de nieuwe technieken van constructie en voortstuwing. De *elektronica* leverde de hulpmiddelen waarmee het vliegtuig tot een missie-georiënteerd voertuig kon uitgroeien.

In deze rede wil ik U een inzicht trachten te geven in de betekenis van de elektronica voor met name de ontwikkeling van de burgerluchtvaart. De *elektronica* kan worden gezien als een *derde dimensie in de ontwikkeling van de luchtvaart*, die aanvankelijk beperkt was tot het vliegtuigcasco ("airframe") en de voortstuwing. De elektronica leverde onder meer de mogelijkheid tot *communicatie tussen het vliegtuig en de grond*, waardoor de vlieger vanaf de grond instructies en berichten over de weerscondities kon krijgen, leverde de *radionavigatie- en landingshulpmiddelen*, waardoor navigatie en naderingen in slecht zicht konden worden gerealiseerd, en leverde de *radar*, waarmee vanaf de grond vliegtuigen gedetecteerd konden worden. De elektronica leidde verder tot *geavanceerde automatische besturings- en waarschuwingssystemen*, waardoor de werkbelasting van de vliegtuigbemanning werd verminderd. In de moderne verkeersvliegtuigen wordt de informatie aan de vlieger zelfs op

computergestuurde beeldschermen gepresenteerd. De digitale computer biedt thans ook de mogelijkheid tot het optimaliseren van vliegbanen, bijvoorbeeld met betrekking tot het brandstofverbruik.

Kenmerkend voor tot dusver genoemde toepassingen van de elektronica is dat deze apparatuur nog achteraf in het vliegtuig kan worden geïnstalleerd. Recente ontwikkelingen in de elektronica zullen echter in de toekomst een ingrijpende invloed op het vliegtuigontwerp als geheel gaan uitoefenen. Door elektronische regelsystemen toe te passen is het mogelijk via roeruitslagen de gewenste stabiliteitseigenschappen en structurele eigenschappen te verkrijgen langs kunstmatige weg. Hierdoor kan de luchtweerstand en het gewicht van het vliegtuig worden gereduceerd, hetgeen tot een lager brandstofverbruik leidt.

Aan de luchtvaartelektronica, die veelal met de term "Avionica" (naar het na-oorlogse Angelsaksische woord "avionics": een samentrekking van "aviation" en "electronics") aangeduid wordt, worden naast de functionele eisen een groot aantal additionele eisen gesteld met betrekking tot het milieu waarin de apparatuur moet werken, het gewicht en de belastingen tijdens de vlucht, de elektrische voeding, en het energieverbruik en de daarmee gepaard gaande warmteontwikkeling.

Omdat vele avionicasystemen onmisbaar zijn voor een veilige vluchtuitvoering, worden hieraan bovendien zeer hoge eisen gesteld op het gebied van de bedrijfszekerheid. De genoemde aspecten en de ontwikkelingen in de micro-elektronica hebben ervoor gezorgd dat de avionica in de jaren zestig en zeventig een enorme vlucht heeft genomen en is uitgegroeid tot een aparte discipline.

De eerste kwart eeuw: het ontstaan van het verkeersvliegtuig

Op donderdag 17 december 1903 startte Orville Wright bij Kill Devil Hills in North Carolina voor de eerste succesvolle bemande vlucht met een bestuurbaar motorvliegtuig. Deze vlucht duurde slechts 12 seconden, werd met een snelheid van 48 km/h op slechts enkele meters boven het aardoppervlak uitgevoerd, en eindigde op ca. 36 meter van de startplaats. Maar, zoals Orville Wright het zelf stelde, deze vlucht was *"the first in the history of the world in which a machine carrying a man had raised itself by its own power into the air in full flight, had sailed forward without reduction of speed, and had finally landed at a point as high as that from which it started"* (2).

Het vliegtuig van de gebroeders Wright was alleen maar ontworpen om één man, die op de onderste vleugel moest liggen om de luchtweerstand te beperken, gedurende korte tijd van de aarde te kunnen verheffen. De gebroeders Wright hadden hun project op wetenschappelijke wijze aangepakt en de problemen op het gebied van stabiliteit en besturing, aërodynamische vormgeving, constructie, en voortstuwing opgelost. Voor hun vliegtuigontwerp maakten ze op ingenieuze wijze gebruik van een zelfgebouwde windtunnel. Voor de verificatie van hun ontwerp voerden ze ook reeds vliegproeven uit met gebruik van vliegproefinstrumenten.

Sinds 1903 is er veel veranderd in de luchtvaart. De vliegtuigconstructie werd robuuster, de motoren werden krachtiger, lichter en bedrijfszekerder. Op 25 juli 1909 waagde Louis Blériot het om met zijn éénmotorige

Blériot XI ééndekker over ruim 35 km water van Calais naar Dover te vliegen.

Voor de Eerste Wereldoorlog gaf een enorme impuls op het gebied van de vliegtuigbouw. De snelle ontwikkeling van het vliegtuig in deze periode wordt goed geïllustreerd door het feit dat Alcock en Brown nog geen tien jaar na de eerste Kanaalvlucht, met een in de nadagen van de oorlog ontworpen, aangepaste Vickers Vimy bommenwerper de eerste trans-atlantische non-stop vlucht uitvoerden, waarbij zij een afstand van 3092 km aflegden.

Tijdens de Eerste Wereldoorlog zijn er ca. 200.000 vliegtuigen gebouwd, waarvan een groot aantal de oorlog overleefde. Het grote surplus aan militaire vliegtuigen en een groot aantal getrainde vliegers, waarvan velen wilden blijven vliegen, vormden de basis voor de na de oorlog opgerichte luchtvaartmaatschappijen, die op commerciële basis post, passagiers en vracht gingen vervoeren. Eén van de eerste luchtvaartmaatschappijen was de op 7 oktober 1919 opgerichte Koninklijke Luchtvaartmaatschappij voor Nederland en Koloniën, de KLM, die startte met gecharterde De Havilland DH-9 vliegtuigen.

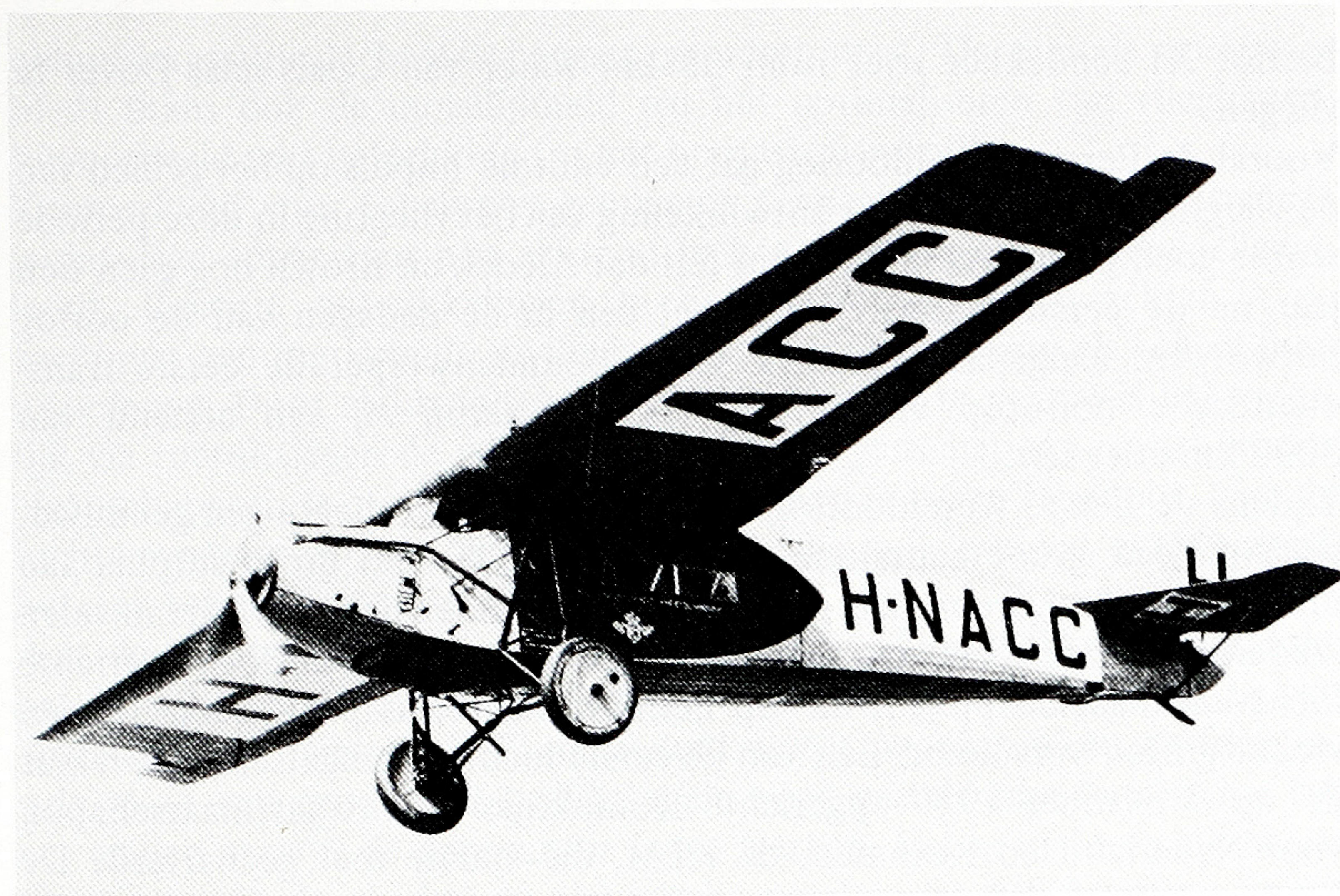
Niet alleen in de verkeersluchtvaart maar ook in de bouw van verkeersvliegtuigen nam Nederland al spoedig na de oorlog een bijzondere plaats in. Anthony Fokker en Frits Koolhoven hadden tijdens de oorlog een enorme ervaring opgebouwd in het ontwerpen en bouwen van militaire vliegtuigen. Bij het ontwerp hiervan lag de nadruk vooral op hoge vliegprestaties, zoals een grote stijgsnelheid, een hoge maximum snelheid en het bereiken van grote hoogten. Bovendien moest de constructie, aangezien deze bestand moest zijn tegen scherpe vliegmanoeuvres, relatief zwaar worden uitgevoerd.

Zowel Fokker als Koolhoven realiseerden zich dat de luchtvaartmaatschappijen behoefte hadden aan speciaal voor de burgerluchtvaart ontworpen vliegtuigen. De eisen bij het ontwerp van een *verkeersvliegtuig* zouden vooral moeten zijn (3):

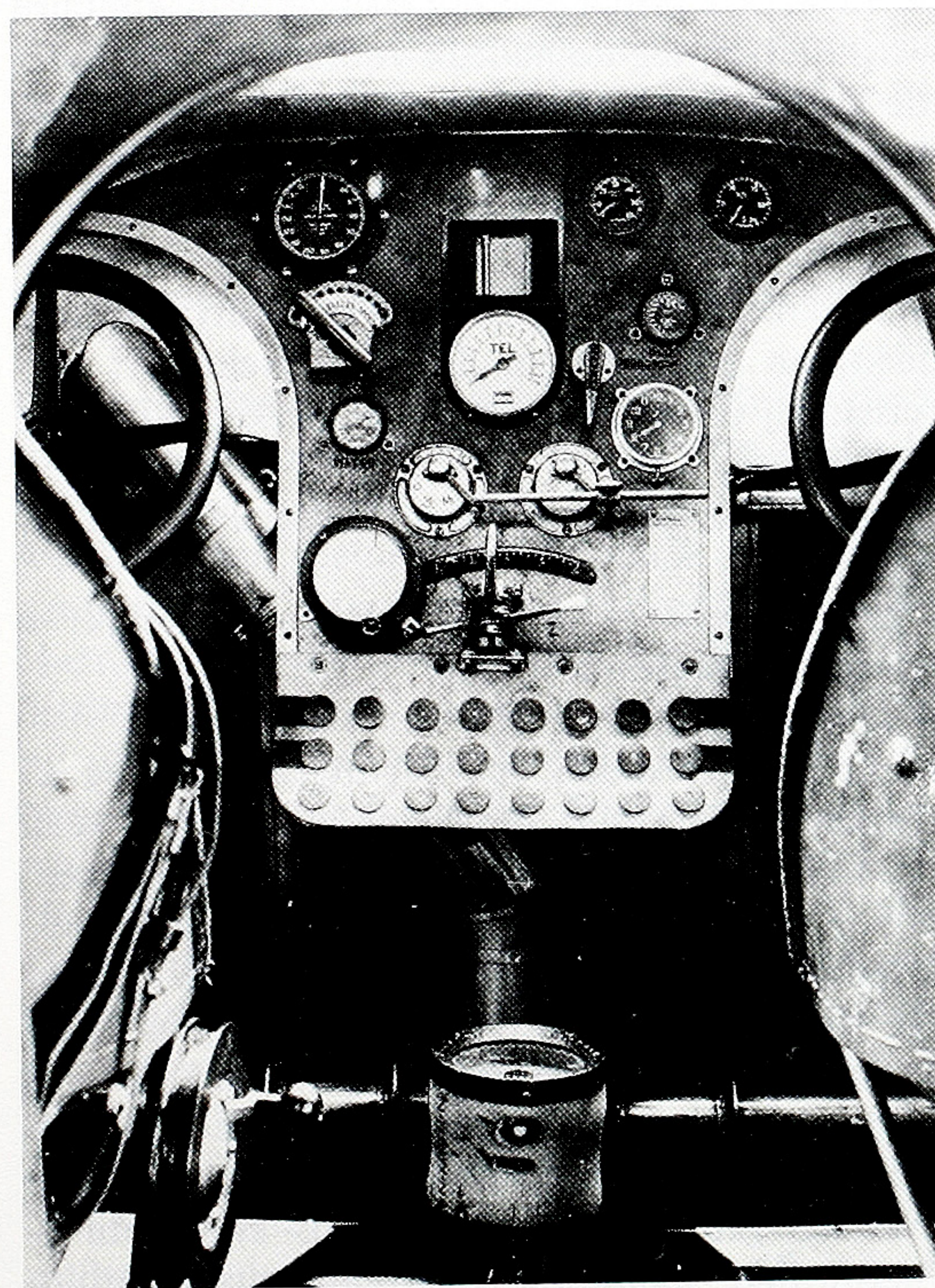
- *uitstekende vliegeigenschappen*, hetgeen van overwegend belang is voor de vliegveiligheid;
- een *eenvoudige en betrouwbare constructie*, die gemakkelijk te onderhouden is en een lange levensduur heeft;
- een *hoog economisch rendement*.

Uitgaande van deze eisen ontwierp Fokker de vliegtuigen waarmee de KLM opereerde als ééndekkers volgens de "gemengde bouwwijze": een houten vleugel en een romp van gelaste stalen buis, bespannen met linnen.

Een bekend Fokker verkeersvliegtuig uit de jaren twintig was de in 1924 ontworpen Fokker F VII (fig. 1), waarmee 8 passagiers op een kruishoogte van ca. 1000 meter met een maximale kruissnelheid van 150 km/h over een afstand van ca. 900 km vervoerd konden worden. Een twaalfcilinder zuigermotor dreef de houten schroef aan. Het vliegtuig was zo ontworpen dat het over het gehele hoogte-, snelheids- en beladingsgebied een voldoende "natuurlijke stabiliteit" had. Ook qua stuurhutinstrumentatie was de F VII nog zeer eenvoudig (fig. 2). Luchtsnelheid, barometrische hoogte, motortoerental, kompaskoers, en temperaturen en drukken van smeerolie en koelwater werden door fysisch-mechanische instrumenten gepresenteerd. Gevlogen werd uitsluitend onder condities van relatief goed zicht, zodat de vlieger de stand van het vliegtuig kon



Figuur 1 – Fokker F VII (1924)



Figuur 2 – Instrumentenpaneel van de Fokker F VII (1924)

bepalen via de "ware" horizon en door een voortdurend "uitkijken" kon zorgen voor een voldoende separatie van terrein, obstakels en andere vliegtuigen. Voor de navigatie werd gebruik gemaakt van luchtsnelheid, kompaskoers, klok en kaartlezen. Indien beschikbaar, werden goed herkenbare punten in het terrein, zoals kustlijnen, rivieren en spoorwegen, gebruikt bij de positiebepaling en voor het volgen van de gewenste route.

Met de Fokker F VII maakte de KLM in 1924 de eerste vlucht van Amsterdam naar het toenmalige Batavia. De 15.373 km werd afgelegd in 127 vliegreizen, verdeeld over 25 vliegdagen.

De introductie van de elektronica in de luchtvaart

Hoewel in principe alleen in condities met relatief goed zicht werd gevlogen, was, net als tegenwoordig, het weer niet altijd juist te voorspellen. Door onbekendheid met een verslechterende weersituatie kon een vlieger in moeilijkheden komen. In 1924 verdween het Fokker F III vliegtuig H-NABS van de KLM dat op weg was van Croydon naar Waalhaven, zonder een spoor achter te laten. Bij de verkeersluchtvaart werd daarom steeds sterker de behoefte gevoeld aan de mogelijkheid om rechtstreeks berichten tussen grondstations en vliegtuigen te kunnen uitwisselen. De oplossing hiervoor was de radio.

Heinrich Hertz toonde al in 1886 het bestaan van eerder door James Clerk Maxwell voorspelde elektromagnetische golven aan met behulp van een vonkzender. Guglielmo Marconi ontwikkelde de vonkzender verder en slaagde erin om in 1901 een transatlantische radiotelegrafieverbinding tot stand te brengen. Een enorme verbetering in de radiocommunicatie werd mogelijk door de uitvinding van de elektronenbuis. In 1904 ontdekte Ambrose Fleming dat, met een gloeidraad en een positief geladen plaat (anode) in een vacuüm gezogen buis, een gelijkrichter (diode) geconstrueerd kon worden, die zeer goed als detector voor de radiogolven gebruikt kon worden. In 1906 plaatste Lee de Forest een derde elektrode tussen de gloeidraad en de anode en ontwikkelde daarmee de triode, die als versterker kon worden gebruikt.

Met de diode, de triode en passieve componenten zoals inductiespoelen, condensatoren en weerstanden beschikte Marconi over alle elementen die hij nodig had voor het bouwen van zenders en ontvangers voor zowel radiotelegrafie als radiotelefonie. Al in 1910 voerde Marconi proeven uit met radiocommunicatie tussen vliegtuigen en de grond. Tijdens de Eerste Wereldoorlog werd de radio gebruikt als communicatiemiddel tussen de waarnemers in de verkenningsvliegtuigen en de grond. Hierdoor werden de tot die tijd meegenomen postduiven overbodig.

Na de oorlog bouwde Marconi, behalve apparatuur voor radiocommunicatie tussen vaste objecten en schepen, ook de eerste commerciële radioapparatuur voor vliegtuigen. Toen in 1924, na het ongeval met de Fokker F III H-NABS, de KLM behoefte aan radiocommunicatie gevoelde, overtuigde Willem Vogt (de toenmalige verkoopleider van de Nederlandse Seintoestellen Fabrik (NSF), die als Nederlandse vertegenwoordiger voor Marconi optrad) Albert Plesman ervan dat er proeven met een Marconi AD-2 radioset in KLM vliegtuigen uitgevoerd moesten worden. De AD-2 inbouwset bestond uit een radio, die aan de zijkant van het



Figuur 3 — Radiocommunicatieapparatuur in de Fokker F VII (1924)

vliegtuig werd ingebouwd, een ongeveer zestig meter lange sleepantenne, die tijdens de vlucht werd uitgevierd, en een door een luchtschroef aangedreven dynamo, die de elektrische energie voor de radioset leverde (fig. 3). De communicatie werd uitgevoerd op een frequentie van 330 kHz.

De introductie van deze eerste elektronische apparatuur in verkeersvliegtuigen verliep echter niet zonder problemen. De ontsteking van de motor veroorzaakte ernstige storing op de radio-ontvangst. (Later zou dit probleem met "elektromagnetische interferentie" (EMI) worden aangeduid.) Motortrillingen, schokken tijdens start en landing, het opereren onder verschillende temperatuurs- en vochtigheidscondities, en de variërende voedingsspanning hadden tot gevolg dat de bedrijfszekerheid nog zeer beperkt was. Verder was de radio relatief zwaar. Na afloop van de proevenserie besloot de KLM niettemin om haar vliegtuigen toch van radiocommunicatieapparatuur te voorzien (4).

De KLM liep met deze ontwikkeling vooraan. Pas in 1927 schreef de "Commission Internationale pour la Navigation Aérienne" (CINA) voor, dat vliegtuigen met vijf of meer inzittenden op vluchten van meer dan 150 km over land of 25 km of meer over zee een radiotelefonie-installatie aan boord moesten hebben.

De jaren dertig: blindvliegen en metalen vliegtuigen

Door de radiocommunicatie werd het mogelijk om de vlieger tijdens de vlucht te waarschuwen voor verslechterende weerscondities, waardoor hij tijdig zijn route en bestemming kon aanpassen. Voor de passagiers, maar ook voor de luchtvaartmaatschappij, was deze grote invloed van het weer op het vluchtschema echter zeer storend. Er werd dan ook gericht gezocht naar hulpmiddelen om dit probleem te elimineren. Deze hulpmiddelen dienden informatie te geven voor de besturing en de navigatie om ook zonder visuele waarneming van de horizon en de grond een veilige en effectieve vluchtuitvoering mogelijk te maken. Voor de besturing in slecht-zicht condities werden een *gyroscopische kunstmatige horizon*, een *koerstol*, en een *gevoelige barometrische hoogtemeter* ontwikkeld. Om in deze condities ook nauwkeurig te kunnen navigeren werden radionavigatiehulpmiddelen ontwikkeld. Al in 1929 maakte James Doolittle een blinde start, vlucht en landing, en demonstreerde hiermee dat blindvliegen met de juiste hulpmiddelen voor een ervaren vlieger zonder grote problemen mogelijk was (5).

De gyroscopische instrumenten en de gevoelige drukhoogtemeter werden vanaf die tijd standaardinstrumentatie in vrijwel alle vliegtuigen. Om de vliegers in het blindvliegen te trainen werd in 1929 door Ed Link de eerste zogenaamde Link-trainer ontwikkeld (6).

Bij de radiocommunicatie en de radionavigatie gingen Europa en de Verenigde Staten in de jaren dertig verschillende wegen. In Europa werd algemeen overgegaan op de *radiotelegrafie*, waarmee, in de LF/MF-band over grote afstanden en door gebruikmaking van de zogenaamde Q-code met relatief weinig Morsetekens, op betrouwbare wijze berichten overgezonden konden worden. Voor de telegrafie werd een apart bemanningslid: de radiotelegrafist of marconist, geïntroduceerd.

Voor de positiebepaling werd gebruik gemaakt van radiopeilers op de grond. De vlieger meldde zich elk kwartier en werd dan vanuit verschillende stations gepeild. Door peilingen te combineren werd de vliegtuigpositie bepaald en via de radiotelegrafieverbinding aan de vlieger doorgegeven. Op de grond konden zo de posities van meerdere vliegtuigen bijgehouden worden. Hiermee was het ook mogelijk om botsingsgevaar te onderkennen en de vliegers in dat geval te adviseren koers of hoogte aan te passen. Op deze wijze kwam de eerste luchtverkeersleiding tot stand.

In de Verenigde Staten verliep de ontwikkeling anders. Daar werd vertrouwd op de *radiotelefonie*, eveneens in de LF/MF radioband. Voor de radionavigatie werden de eerste zogenaamde LF/MF "four-course radio-range bakens" ontwikkeld. Elk baken genereerde een stralingspatroon, waardoor de vlieger via vier verschillende vaste banen naar het baken kon vliegen. Eind 1939 waren er in de Verenigde Staten

ruim 300 van deze radio-range bakens, waarmee de luchtwegen tussen de grote steden gedefinieerd werden (7).

Zowel in Amerika als in Europa werden de vliegtuigen geleidelijk aan ook voorzien van een radiopeiler (ADF). Hiermee kon de vlieger via meerdere peilingen zelfstandig zijn positie bepalen.

In de jaren dertig voltrok zich ook een grote verandering in de bouwwijze van verkeersvliegtuigen. De Amerikaanse vliegtuigbouwers Douglas, Boeing en Lockheed richtten zich op het ontwerp van tweemotorige, metalen verkeersvliegtuigen, waarbij de metalen huid een essentiële bijdrage in de sterkte van vleugel en romp ging leveren; hierdoor werd een lichtere constructie mogelijk. De vliegtuigen werden voorzien van de in Amerika geperfectioneerde, luchtgekoelde steromotor met de weerstand-reducerende NACA-kap en metalen propellers met variabele spoedhoek. Deze vliegtuigen werden zo ontworpen dat bij het uitvallen van één motor veilig doorgevlogen kon worden. Dat was essentieel om veilig in slecht-zicht condities en over grote wateroppervlakken te kunnen vliegen. Op de motoren werden elektrische generatoren geïnstalleerd voor de verlichting en voeding van elektrische boordsystemen en radioapparatuur. Bovendien werden de vliegtuigen voorzien van een intrekbaar onderstel en van vleugelkleppen.

Hydraulische systemen werden geïntroduceerd voor de bediening van onderstel en kleppen. Een aantal vliegtuigen werd voorzien van een relatief eenvoudige, hydraulische of pneumatische stuurautomaat, waardoor de werkbelasting van de vlieger, vooral op de langere vluchten, aanzienlijk werd gereduceerd. Ten behoeve van de radioapparatuur werden vaste antennes geïnstalleerd. Het bekendste voorbeeld van deze nieuwe ontwikkeling is ongetwijfeld de Douglas DC-3, waarvan er ca. 12.000 zijn gebouwd. In 1936 konden met de DC-3 21 passagiers met een kruissnelheid van 280 km/h op een kruishoogte van 3000 m over een afstand van 2000 km worden vervoerd (8). Vergeleken met de Fokker F VII waren in 12 jaar de prestaties van verkeersvliegtuigen met betrekking tot snelheid, kruishoogte, bereik en aantal passagiers ongeveer verdubbeld.

De Tweede Wereldoorlog: radar, straalvoortstuwing en digitale computers

Tijdens de Tweede Wereldoorlog werd het vliegtuig als een belangrijk tactisch en strategisch wapen ingezet. Met name voor Engeland was het van levensbelang om vroegtijdig de aanvallende vliegtuigen te kunnen detecteren en te identificeren, en om de eigen vliegtuigen naar die van de tegenstander te kunnen geleiden. Engeland werd dan ook de bakermat van de ontwikkeling en de effectieve toepassing van *radar* (9).

Voor de presentatie van de radarecho werd een door Karl Braun in 1897 ontwikkelde elektronenstraalbuis gebruikt: een speciale vorm van de elektronenbuis, waarmee een elektronenstraal als een lichtstip zichtbaar gemaakt kon worden op de met fosfor bedekte voorzijde (radarscherm) van de buis. Door de eigen vliegtuigen te voorzien van een zogenaamde transponder, die bij detectie van een radarpuls een gecodeerd bericht kon uitzenden, kon op het radarscherm het verschil tussen vriend en vijand duidelijk worden gemaakt. Later in de oorlog werden kleine, lichte

radarsystemen ontwikkeld, die in het vliegtuig konden worden geïnstalleerd. Hiermee kon de vlieger dan, als hij vanaf de grond tot relatief dicht bij zijn doel was gebracht, zelf het doel zoeken.

Tijdens de oorlog werden op grote schaal bij de vliegvelden speciale radiobakens geïnstalleerd, waarmee de vlieger onder slecht-zicht condities het vliegtuig tot voor de landingsbaan kon brengen. Dit zogenaamde "Standard Beam Approach System", de voorloper van het huidige "Instrument Landing System" (ILS), was een verdere ontwikkeling van het radio-range baken.

Ook op het gebied van de vliegtuigbouw werden grote stappen voorwaarts gemaakt. Lange-afstandsbommenwerpers werden ontwikkeld en in dienst gesteld. *Door straalmotoren voorgestuwde jachtvliegtuigen* verschenen op het strijdtoneel. Voor deze zware en snelle vliegtuigen werden bovendien een groot aantal vliegvelden met lange, verharde banen gebouwd. Ten slotte verscheen er tijdens de Tweede Wereldoorlog een toepassing van de elektronica die een revolutie tot stand zou brengen op vele fronten en niet in de laatste plaats in de luchtvaart: *de digitale computer*.

Met de digitale computer konden gecompliceerde berekeningen met een grote nauwkeurigheid en snel uitgevoerd worden. De programmeerbaarheid maakte het verder mogelijk om verschillende problemen met dezelfde apparatuur op te lossen door alleen een ander programma te "laden". De eerste digitale computers werden ontwikkeld voor militaire toepassingen, zoals het breken van de Duitse radiotelegrafiecodes (10) en het berekenen van de banen van ballistische projectielen. Deze computers waren uitgevoerd met elektronenbuizen. Eén van de eerste Amerikaanse digitale computers, de ENIAC, had ongeveer 17.000 elektronenbuizen, verbruikte 170 kW, had een volume van 15 x 15 x 6 kubieke meter, en woog circa 30 ton. De gemiddelde tijd tussen twee storingen bedroeg slechts enkele uren (11). Hoewel er in het vliegtuig ook toen reeds verschillende toepassingsgebieden waren voor digitale computers, belette de uitvoeringsvorm nog de algemene introductie.

De ontwikkelingen tijdens de Tweede Wereldoorlog, zowel op vliegtuigbouwkundig als op elektronisch gebied, leverden de elementen waarmee de naoorlogse burgerluchtvaart snel op een geavanceerd niveau kon worden gebracht.

De jaren vijftig: internationale standaardisatie

Reeds in de jaren na de Tweede Wereldoorlog verschenen nog door zuigermotoren en propellers voorgestuwde lange-afstandsverkeersvliegtuigen, zoals de Douglas DC-6 en de Lockheed Constellation, waarmee, afhankelijk van de uitvoering, circa 40 tot 60 passagiers met een snelheid van 500 km/h en op een kruishoogte van ruim 7 km over de Atlantische Oceaan konden worden vervoerd. Deze vliegtuigen kregen steeds meer elektronische systemen. Naast de radiocommunicatie- en radionavigatie-apparatuur en de elektronische landingshulpmiddelen werden bij de inmiddels steeds groter wordende vliegtuigen ook elektronische systemen geïntroduceerd ten behoeve van het vliegtuiginstrumentarium en het besturingssysteem. De fysisch-mechanische stuurhutinstrumenten van de vooroorlogse vliegtuigen werden vervangen door elektro-mechanische

instrumentsystemen. Hierbij werden dicht bij de signaalbronnen sensoren geplaatst, die de gemeten grootheden omzetten in elektrische signalen. Deze signalen werden via elektrische leidingen en veelal via elektronische versterkers naar de elektro-mechanische aanwijsinstrumenten geleid. De invoering van elektrisch signaaltransport binnen het vliegtuig betekende een aanzienlijke vermindering van gewicht en een vergroting van de bedrijfszekerheid van de vliegtuiginstrumentatie.

In de besturingssystemen was het vooral de *stuurautomaat* en het *stuurcommandosysteem*, waarin de elektronica zijn intrede deed. Hierdoor werd het namelijk mogelijk om complexe *stuurautomaten* te realiseren, die niet alleen standstabilisatie leverden, maar ook konden worden gekoppeld aan radionavigatie- en landingshulpmiddelen. Op deze wijze konden nauwkeurige en-route navigatie en naderingen automatisch worden uitgevoerd. Met behulp van *stuurcommandosystemen* kon de goede werking van de stuurautomaat worden bewaakt en, indien gewenst, ook op eenvoudige wijze "met de hand" worden gevlogen.

De ontwikkeling van vliegtuigen die over de gehele wereld gebruikt zouden worden en de steeds toenemende hoeveelheid elektronische apparatuur in de verkeersvliegtuigen gaven aanleiding tot de behoefte aan standaardisatie.

Om te komen tot een internationale standaardisatie van normen betreffende brevettering van personeel, certificatie van vliegtuigen, te gebruiken radiocommunicatie- en radionavigatieapparatuur, luchtverkeersleidingsapparatuur en procedures, ongevallenonderzoek etc., werd in 1944 de "International Civil Aviation Organization" (ICAO) opgericht. Via ICAO werden de frequenties en functies internationaal gestandaardiseerd van onder meer de VHF- en HF-radiotelefonie, van de radionavigatiehulpmiddelen voor de lange afstand (LORAN) en voor het middellange en korte afstandsverkeer (NDB, VOR en DME), en van de landingshulpmiddelen (ILS) (12).

De luchtvaartmaatschappijen standaardiseerden verder de vorm, de aansluitingen en de functie van de diverse avionica-modules (13). Deze "Form, Fit and Function" specificaties, die door de "Airline Electronic Engineering Committee" (AEEC) van de "Aeronautical Radio Incorporated" (ARINC) werden opgesteld, hadden grote voordelen zowel voor de luchtvaartmaatschappijen als voor de vliegtuig- en avionica-industrie uit het oogpunt van rationalisatie van productie, installatie en onderhoud van de apparatuur.

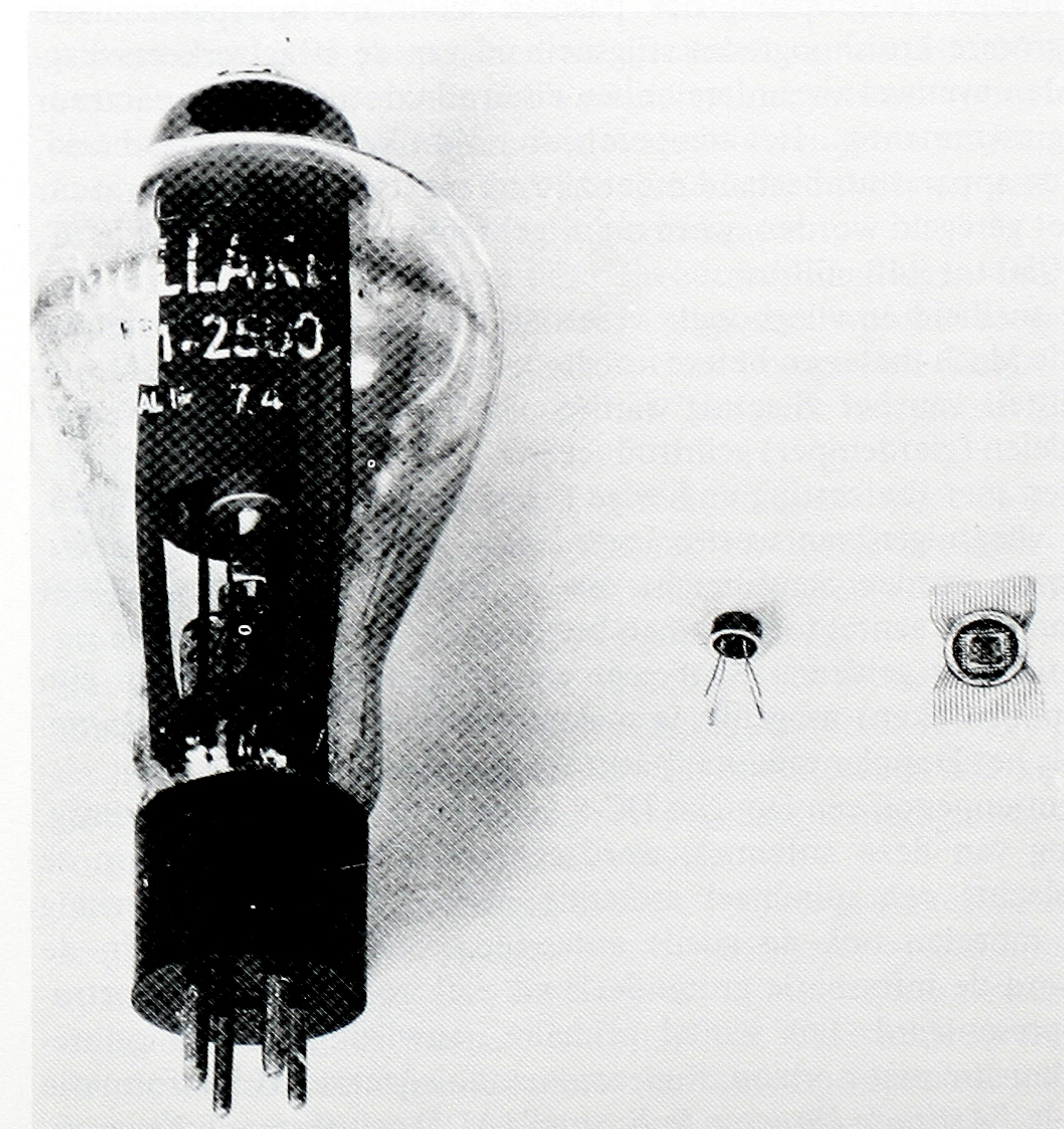
Aan de avionica-apparatuur moeten hoge eisen ten aanzien van omgevingscondities, sterkte en voeding worden gesteld. Het vliegtuig kan immers op verschillende plaatsen op aarde (van de poolstreken tot de tropen) worden gebruikt. Het komt bovendien tijdens de vlucht op verschillende hoogten, het taxiën, de motoren en de landing veroorzaken trillingen en schokken, terwijl sterke zenders en grote elektrische stromen sterke elektromagnetische velden veroorzaken. De avionica-apparatuur van vliegtuigen wordt dan ook onderworpen aan sterke variaties van de temperatuur, luchtdruk, relatieve vochtigheid en versnellingen, en aan elektromagnetische interferentie. Ook de spanning en frequentie van de elektrische voeding aan boord van de vliegtuigen variëren aanzienlijk. Deze omgevingscondities zijn verder afhankelijk van het type vliegtuig en de wijze

van voortstuwing, van de plaats in het vliegtuig, en van de bevestigingsmethode. Voor het ontwerp van de avionica-modules was het dus nodig de fabrikant te voorzien van gegevens over de omgevingscondities waarin de apparatuur zou moeten werken.

De "Radio Technical Commission for Aeronautics" (RTCA) heeft voor de diverse omgevingscondities voor vliegtuigapparatuur in de diverse typen vliegtuigen en voor de diverse lokaties en bevestigingsmethoden standaards opgesteld, evenals voor de beproevingsmethoden (14).

Microminiaturisatie van de elektronica

De eerste avionica-apparatuur was nog geheel met *elektronenbuizen* uitgevoerd. Deze apparatuur was daardoor relatief volumineus en zwaar en gebruikte veel elektrische energie, hetgeen vooral bij vliegtuigapparatuur als een groot bezwaar geldt. In het bijzonder voor de ontwikkeling van de avionica was de uitvinding van de *transistor* in 1947 door Bardeen, Brittain en Shockley dan ook van het grootste belang. Terwijl de elektronenbuis een volume van 20-60 kubieke centimeter had en een vermogen van enkele watts verbruikte, vervulde de transistor (fig. 4) dezelfde functie met een volume van slechts 0,5 kubieke centimeter en een vermogen van slechts enkele milliwatts. Doordat bovendien de bedrijfszekerheid enkele orden van grootte hoger was dan die van de elektronenbuis, werd het mogelijk om aanzienlijk complexere elektronische systemen te realiseren, die toch voldoende licht en bedrijfszeker waren.



Figuur 4 - Elektronenbuis, transistor en "Integrated Circuit"

Na deze eerste stap op het gebied van de halfgeleiderelektronica volgden er meer. Aan het einde van de jaren vijftig ontwikkelden Kilby en Hoerny de mogelijkheid om langs fotolithografische weg op een klein plakje halfgeleidermateriaal meerdere transistoren, weerstanden en condensatoren tot een "Integrated Circuit" (IC) samen te stellen (15). Deze ontwikkeling bleek zich zeer goed te lenen voor het integreren van grote hoeveelheden digitale schakelingen op één "chip".

In de jaren zeventig was het digitale IC uitgegroeid tot een complete computer. In een ontwikkelingstijd van nog geen dertig jaar was het mogelijk geworden om een computer te construeren die vijftig maal sneller was dan ENIAC, een tien maal zo grote geheugencapaciteit had, minder woog dan 500 gram, gevoed werd uit enkele kleine batterijtjes, en in een jaszak meegenomen kon worden, terwijl de prijs slechts enkele honderden guldens bedroeg (11). Ook voor de avionica betekende de ontwikkeling van de microcomputer nieuwe, ongekende mogelijkheden.

De jaren zestig: de eerste straalverkeersvliegtuigen en meer avionica

Reeds aan het einde van de jaren vijftig verschenen de eerste straalverkeersvliegtuigen. De kruissnelheid steeg tot ca. 900 km/h en de kruishoogte werd ca. 10 km, waardoor nu "boven het weer" gevlogen kon worden. Het aantal passagiers nam toe tot ca. 150. Het ontbreken van het geluid en de trillingen van de zuigermotoren en propellers, en het vliegen op grote hoogte vergrootten het passagierscomfort op spectaculaire wijze. De grotere kruishoogte en stijgsnelheid van de straalverkeersvliegtuigen stelden evenwel zwaardere milieu-eisen aan de avionica-apparatuur en vliegtuiginstrumenten. Het temperatuur- en drukgebied, bijvoorbeeld, waartegen de apparatuur bestand moet zijn op plaatsen waar temperatuur en druk niet geregeld worden, werd nu uitgebreid van -55°C tot $+70^{\circ}\text{C}$, resp. van 1050 tot 240 millibar.

De grotere snelheid en vlieghoogte vereisten ook een nieuwe instrumentatie (o.a. de Mach-meter en betere hoogtemeters). Ter verbetering van de eigen stabiliteit van het vliegtuig werden elektronische stabiliteitsverhogende middelen (gierdemper) geïntroduceerd.

Om gebieden met ijsafzetting en hevige turbulentie te kunnen vermijden, werden de vliegtuigen van *weerradar* voorzien. *Automatische waarschuwingssystemen* werden aangebracht om de vlieger te assisteren bij het bewaken van de in aantal toegenomen boordsystemen.

Om navigatie over gebieden waar geen radionavigatiehulpmiddelen zijn (oceanen, poolstreken) mogelijk te maken, werden *autonome navigatiesystemen* als het Doppler-radarnavigatiesysteem ontwikkeld.

Het aantal antennes op een Douglas DC-8 bedroeg inmiddels ruim twintig. De plaatsing van deze antennes, werd een steeds groter probleem: ze mochten slechts een minimaal storende invloed op elkaars werking hebben en moesten ook de goede antennepatronen behouden. In de stuurhut werd de informatie grotendeels via elektro-mechanische instrumenten gepresenteerd. Een aantal primaire aanwijzingen werd geïntegreerd. De kunstmatige horizon, stuurcommandowijzers en ILS-informatie werden in de "Attitude Director Indicator" (ADI) geïntegreerd. Kompas-koers en radionavigatie-informatie werden gecombineerd op een "Hori-

zontal Situation Indicator" (HSI) gepresenteerd. Hierdoor kon de vlieger met minder oogbewegingen (kortere "scanning cycle") en geringere mentale belasting de informatie opnemen en verwerken.

Door de toegenomen snelheid van de verkeersvliegtuigen en het toegenomen aantal vliegtuigen werd de taak van de luchtverkeersleiding steeds zwaarder. De procedurele verkeersleiding, waarbij met behulp van radiopeilers regelmatig de voortgang werd gecontroleerd, was te inefficiënt voor het moderne luchtverkeer.

In de jaren vijftig kreeg de verkeersleider de beschikking over radar, waardoor continu het luchtverkeer en de onderlinge separatie tussen de vliegtuigen kon worden bewaakt. Op het radarscherm konden echter niet de identificatie en de hoogte waarop de vliegtuigen zich bevonden worden getoond. Hiervoor was het nodig dat het vliegtuig manoeuvres uitvoerde en dat er radiocommunicatie plaatsvond. De hoge snelheid van de straalverkeersvliegtuigen vereiste echter een directe identificatie en hoogtepresentatie. Hiertoe werden de vliegtuigen voorzien van een *transponder* die bij iedere ondervraging van een op de grond gestationeerde, secundaire rondzoek-radar deze informatie digitaal naar de grond terugzond. Tevens kreeg de luchtverkeersleider in de jaren zestig de beschikking over een digitale computer die de vliegplangegevens verwerkte en op een geschikte wijze aan hem presenteerde (16).

De jaren zeventig: digitale computers in grote vliegtuigen

In 1970 verschenen de eerste "breedromp"-straalverkeersvliegtuigen waarmee ca. 350 passagiers over afstanden van ca. 10.000 km vervoerd konden worden. Deze Jumbo's werden voortgestuwd door straalmotoren met een hoge omloopverhouding, waardoor een grote stuwkracht gepaard kon gaan met een verminderde geluidsproductie en een verminderd brandstofverbruik per eenheid van stuwkracht.

Op avionica gebied hadden deze breedrompvliegtuigen ook een aantal nieuwe systemen, waarin digitale computers werden toegepast. Voorbeelden hiervan zijn de "Digital Airdata Computer" (DADC), het traagheidsnavigatiesysteem (INS), en het "Aircraft Integrated Data System" (AIDS).

De "Digital Airdata Computer" berekent onder meer de luchtsnelheid, drukhoogte, statische luchttemperatuur en de relatie tussen de luchtsnelheid en de geluidssnelheid (getal van Mach), en zorgt ervoor dat deze grootheden aan de vlieger worden gepresenteerd.

Het *traagheidsnavigatiesysteem* berekent uit de signalen van gevoelige versnellingsmeters en gyroscopen de snelheidsvector van het vliegtuig. Uit de beginpositie, de snelheidsvector, en de verstreken tijd kan vervolgens de momentane positie en de stuurinformatie, benodigd om naar gegeven routepunten te vliegen, berekend worden.

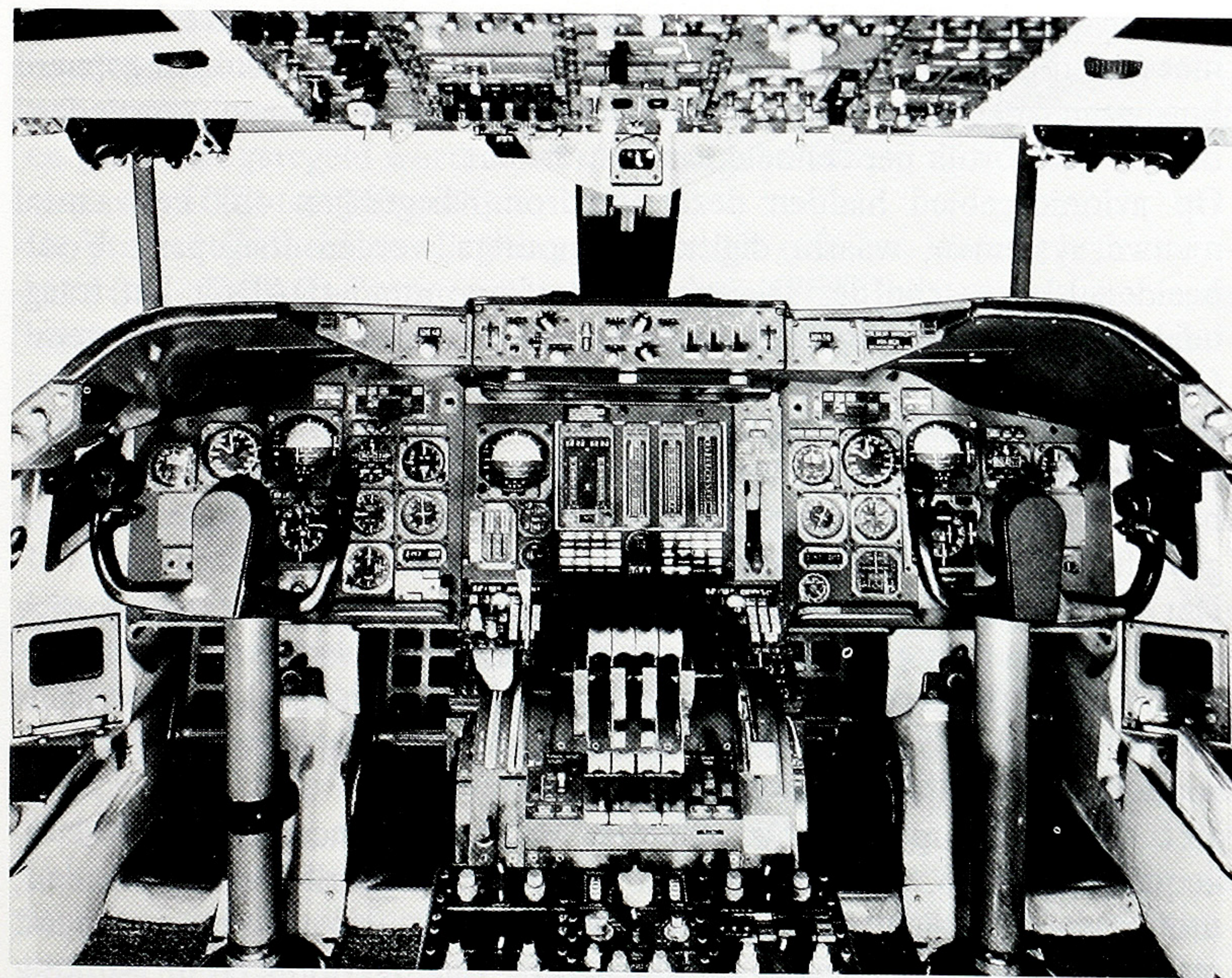
Het "Aircraft Integrated Data System" is een geavanceerd digitaal data-acquisitiesysteem, dat signalen van de sensoren van alle boordsystemen, motoren en de vliegtuigconfiguratie op adaptieve wijze op magneetband registreert. Hiermee kan na de vlucht het vluchtverloop en de werking van de motoren en boordsystemen van het vliegtuig worden geanalyseerd. Een deel van de AIDS-gegevens gaat eveneens naar een "crash-proof" recorder: de "zwarte doos", die in werkelijkheid altijd fel oranje of geel

is. In combinatie met de gegevens van een recorder die alle geluiden in de stuurhut registreert, geven deze gegevens vaak een indicatie over de oorzaak van een ongeval.

Verder zijn deze nieuwe vliegtuigen uitgerust met *automatische landingsystemen*, waarmee zelfs in weerscondities zonder enig verticaal zicht volledig automatisch kan worden geland. De ontwikkeling van automatische landingsystemen is grotendeels het werk van de Engelse "Blind-Landing Experimental Unit" (BLEU), die vanaf het einde van de jaren veertig onderzoek op dit gebied heeft uitgevoerd. Vliegtuigen, uitgerust met deze zogenaamde "autoland-systemen", kunnen thans onder *alle* zichtcondities landen op adequaat toegeruste landingsbanen. Hierdoor behoeven verkeersvliegtuigen niet meer uit te wijken wegens slecht zicht, hetgeen grote kostenbesparingen met zich meebrengt. Aan deze systemen worden vanzelfsprekend de allerhoogste eisen op het gebied van de bedrijfszekerheid gesteld. Om deze reden zijn deze autoland-systemen vaak drievoudig of zelfs viervoudig uitgevoerd.

De stuurhut van de Boeing 747 (fig. 5) lijkt nog veel op die van de in het begin van de jaren zestig geïntroduceerde straalverkeersvliegtuigen, zoals de DC-8 en B-707. Elektro-mechanische instrumenten leveren de vlieger het overgrote deel van de benodigde informatie voor de besturing en de navigatie en over de motoren en boordsystemen.

Door de verdere toename van het aantal boordsystemen nam het aantal waarschuwingssignalen enorm toe. De B-747 kent ca. 15 verschillende akoestische waarschuwingssignalen en ca. 275 verschillende waarschuwingsslampjes, waarvan de belangrijkste centraal in het instrumentenpaneel zijn gegroepeerd.



Figuur 5 — stuurhut van een Boeing 747 van de KLM

Heden: digitale avionica voor de nieuwe verkeersvliegtuigen

De bemanning van een modern verkeersvliegtuig moet een groot aantal taken uitvoeren, die alle betrekking hebben op een goede vluchtvoorbereiding en vluchttuitvoering. Hoewel door de introductie van systemen zoals de stuurautomaat, het stuurcommandosysteem en geautomatiseerde navigatiesystemen, en waarschuwingssystemen de werkbelasting van de stuurhutbemanning aanzienlijk werd gereduceerd, bleef er toch een aantal situaties over waarin de werkbelasting zeer hoog kon worden. Voorbeelden hiervan zijn start en landing, optredende storingen, en wijzigingen in het vliegplan. Veelal zal de vlieger in deze situaties gebruik moeten maken van navigatiekaarten en het zogenaamde "Aircraft Operations Manual", waarin de prestatiegegevens van het vliegtuig en de aanwijzingen voor de bediening van de systemen bij storingen kunnen worden gevonden.

Tussen 1970 en 1980 is de prijs van de vliegtuigbrandstof met een factor tien gestegen. Hierdoor werden ook hogere eisen aan de bemanning gesteld met betrekking tot navigatie en vluchttuitvoering ten einde zo economisch mogelijk te vliegen. Verder werden de eisen met betrekking tot de geluidshinder strenger. Ook hieruit ontstonden extra eisen met betrekking tot navigatie en motorregeling in start en landing.

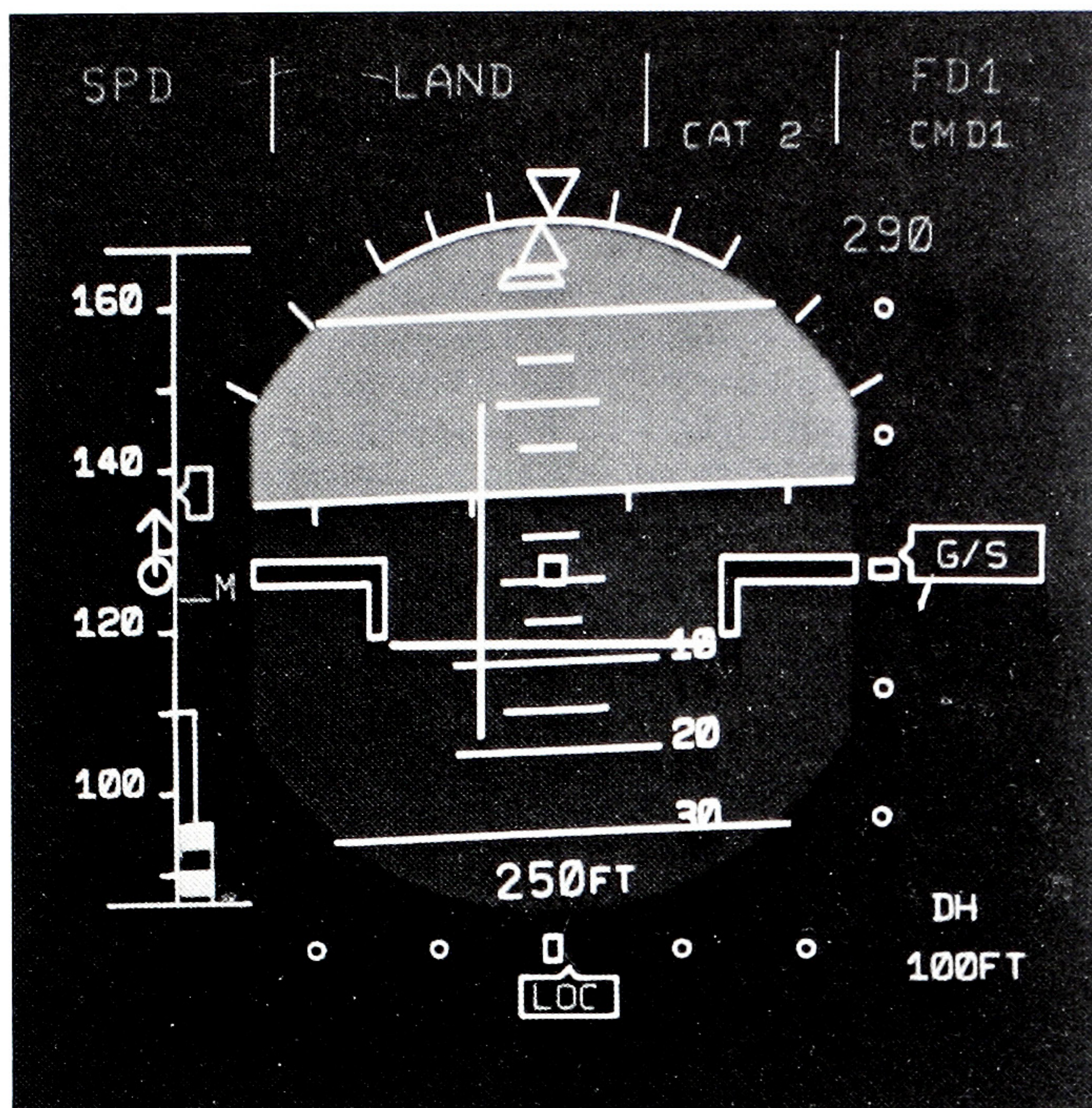
Het is duidelijk dat, toen aan het einde van de jaren zeventig gedacht werd aan de vervanging van de eerste generatie straalverkeersvliegtuigen voor de middellange afstand, reductie van het brandstofverbruik en de geluidshinder en vermindering van de werkbelasting van de bemanning de primaire uitgangspunten waren.

Reductie van brandstofverbruik en geluidsoverlast was vooral mogelijk door gebruikmaking van nieuwe straalmotoren met hoge omloopverhouding. Om de vlieger in staat te stellen nauwkeurig de optimale driedimensionale vliegbaan te vliegen en bovendien de werkbelasting van de bemanning te reduceren, waren echter nieuwe avionicasystemen noodzakelijk.

De ontwikkeling van de micro-elektronica (in het bijzonder de micro-computer en de halfgeleidergeheugens) en van de kleurenbeeldschermen maakten de realisering van deze nieuwe systemen mogelijk, zonder dat gewicht, volume en elektrisch energieverbruik prohibitief hoog werden. Studies van de AEEC gaven aan dat bekabeling aanzienlijk kon worden verminderd (voor de Boeing 747 zelfs 1300 kg), indien de verschillende parameters niet langer elk via twee of meer draden gelijktijdig overgebracht werden, maar na elkaar als getallen over een tweedraads digitale seriële databus (17). Dit betekende evenwel dat de oude ARINC 500 specificaties niet langer bruikbaar waren. Van 1976 tot heden heeft de AEEC reeds 34 nieuwe "ARINC 700" specificaties voor de nieuwe generatie avionicasystemen ontwikkeld, waarbij de digitale databus als standaard-communicatiemedium wordt gebruikt (18, 19).

De belangrijkste nieuwe avionicasystemen zijn het "Flight Management Computer System" (FMCS), het "Electronic Flight Instrument System" (EFIS) en het "Flight Warning Computer System" (FWCS).

Het "Flight Management Computer System" verzorgt de horizontale en verticale navigatie langs een geselecteerde route als functie van door de



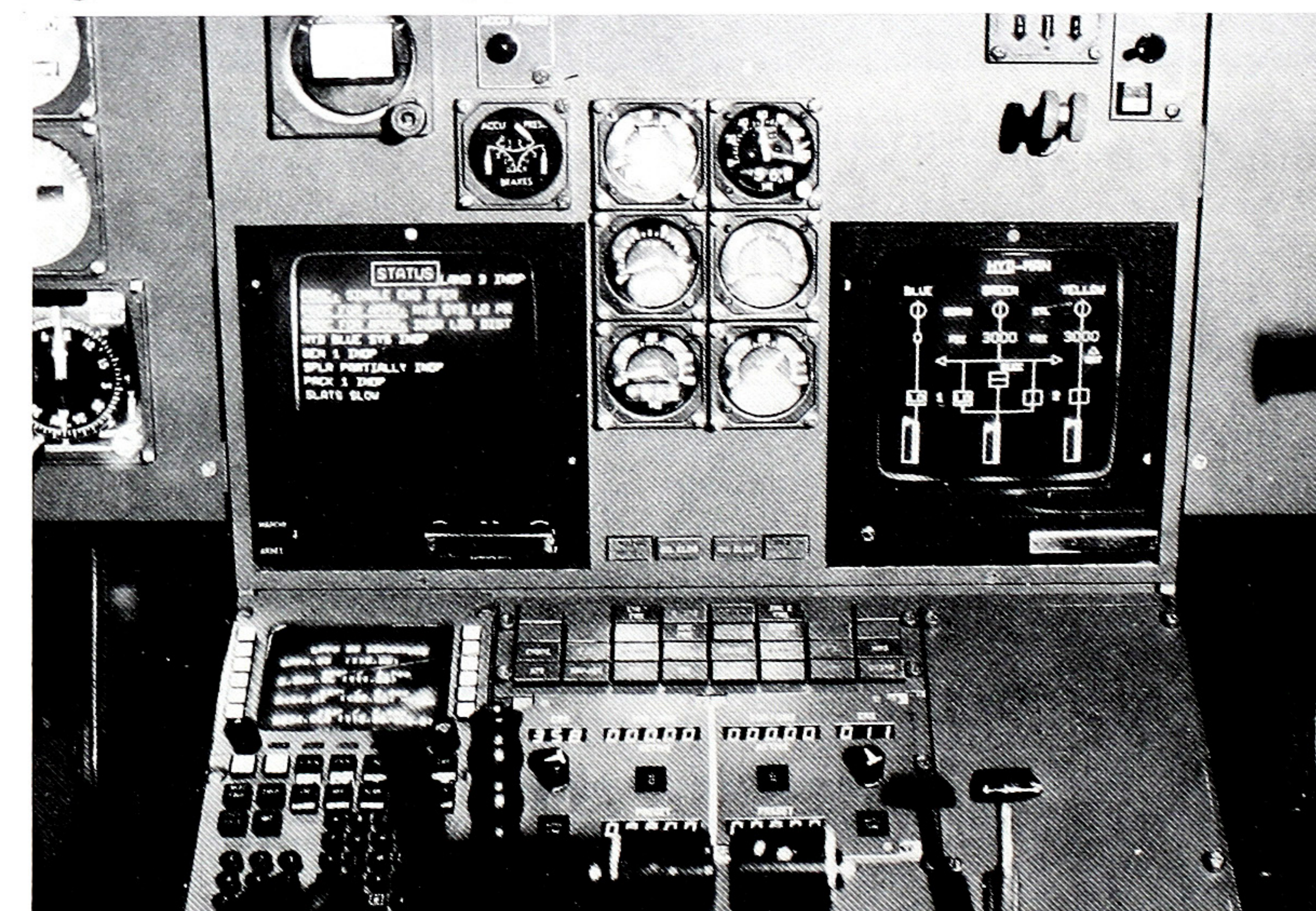
Figuur 6 - "Primary Flight Display" van de Airbus A-310



Figuur 7 - "Navigation Display" van de Airbus A-310

vlieger ingevoerde optimalisatiegegevens (minimum brandstof, minimum totale kosten of minimum tijd). Het FMCS krijgt hiertoe via de desbetreffende sensoren gegevens omtrent navigatie, brandstofhoeveelheid en motorprestaties. Het systeem levert stuursignalen voor de stuurautomaat en motorregeling. Tevens berekent het FMCS de benodigde brandstof en de tijd om een geselecteerd routepunt te bereiken, de nog resterende brandstof bij aankomst, en diverse andere voor de vlieger belangrijke gegevens in geval van motorstoring of vliegplanwijzigingen. Het FMCS bevat hiertoe een geheugen waarin de maatschappijroutes, de vliegtuig- en motorprestatiegegevens, frequentie en positie van de radionavigatiebakens, en de programma's voor de gewenste berekeningen zijn opgeslagen. Het "Electronic Flight Instrument System" verzorgt een geïntegreerde presentatie van de vlieggegevens en van navigatie- en weerradarinformatie op kleurenbeeldschermen die door digitale computers worden gestuurd. Het systeem presenteert uitsluitend gegevens die op de actuele vliegfase betrekking hebben. Op het zogenaamde "Primary Flight Display" (PFD) worden gegevens over de stand, snelheid en hoogte van het vliegtuig, stuurcommando's, ILS-afwijkingen, en de geselecteerde actuele modus van de stuurautomaat gepresenteerd (fig. 6). Op het "Navigation Display" (ND) worden de gevlogene koers en gegevens over de navigatie, het vliegplan, de heersende wind en desgewenst ook de weerradargegevens gepresenteerd (fig. 7). Door deze integratie van selectief gepresenteerde gegevens kan de vlieger de benodigde informatie directer en met minder inspanning assimileren dan met de eerdere elektro-mechanische instrumenten mogelijk was.

Het "Flight Warning Computer System" is een geavanceerd automatisch waarschuwingssysteem dat verschillende gedetecteerde storingen als functie van de vliegfase en de onderlinge prioriteit zowel in alfanumerieke vorm als in systeemschema's weergeeft (fig. 8). De ernst van de storing kan, behalve uit de kleur van de alfanumerieke melding, ook worden afgeleid uit de eveneens gegenereerde akoestische signalen. Het feit dat de



Figuur 8 - "Warning and System Displays" van de Airbus A-310



Figuur 9 — Stuurhut van de Airbus A-310

storingsmelding afhankelijk gemaakt is van de vluchtfase, is vooral van belang tijdens de start en de landing. De vlieger mag tijdens deze periodes van hoge werkbelasting alleen "gestoord" worden met berichten die direct de vliegveiligheid betreffen. De minder belangrijke storingsmeldingen worden opgeslagen en pas op een rustiger moment onder de aandacht van de vlieger gebracht (20).

De nieuwe verkeersvliegtuigen, zoals de Boeing 767 en 757 en de Airbus A-310, zullen met de genoemde digitale avionicasystemen worden uitgerust. Figuur 9 toont de stuurhut van de A-310 waarmee de KLM in 1983 zal gaan opereren. Vóór de vliegers bevinden zich de beide EFIS-beeldschermen, in het centrale instrumentenpaneel de twee displays van het "Flight Warning Computer System", en in het pedestal, horizontaal tussen de beide vliegers, de bedieningseenheid van het "Flight Management Computer System". De elektronische beeldschermen in de stuurhut leveren extra flexibiliteit in geval van storingen. In tegenstelling tot de elektro-mechanische displays is de presentatie van de informatie hierbij

niet aan één beeldscherm gebonden, maar kan, bij het falen van één der beeldschermen, overgeschakeld worden op een ander beeldscherm. Deze flexibiliteit betekent een vergroting van de bedrijfszekerheid van het systeem.

Naast de computergestuurde beeldschermen bevinden zich in het instrumentenpaneel ook nog elektro-mechanische instrumenten, die hoofdzakelijk een "stand-by" functie hebben.

De bediening van de radiocommunicatieapparatuur alsmede die van de elektrische, hydraulische, pneumatische en mechanische boordsystemen geschiedt nog via individuele schakelaars en bedieningseenheden in het pedestal en het zogenaamde "overhead panel".

Ook voor het onderhoud is getracht een aantal verbeteringen aan te brengen. Alle avionica-modules zullen worden uitgerust met geavanceerde zelf-testmogelijkheden ("Built-In Test Equipment" — BITE). Het onderhoudspersoneel kan hiermee op eenvoudige wijze voor en na de vlucht de defecte eenheid identificeren en verwisselen. In totaal zullen in deze nieuwe avionicasystemen per vliegtuig ca. 120 digitale computers toegepast worden. Hieruit moge blijken dat de digitale computer in deze nieuwe verkeersvliegtuigen gemeengoed is geworden.

En de toekomst.....?

De Amerikaanse "Energy Information Administration" verwacht dat de prijs van een vat ruwe olie van het huidige prijspeil (ca. 35 dollar) in 1985 opgelopen zal zijn tot 46 dollar en in 1995 zelfs 82 dollar zal bedragen (21). (Deze prijzen zijn gebaseerd op de waarde van de US dollar in 1982.) Dit betekent dat bij de ontwikkeling van nieuwe vliegtuigen een verdere *vermindering van het brandstofverbruik* als primair ontwerpcriterium gehandhaafd zal blijven.

Hiertoe zijn op het gebied van de *aërodynamische vormgeving*, de *voortstuwing*, de *constructie*, en ook op het gebied van de *luchtverkeersleiding* inmiddels verschillende onderzoeksprogramma's gestart. Bij de meeste van deze nieuwe ontwikkelingen zal de avionica een essentiële rol spelen. De *aërodynamische vormgeving* kan vanuit het oogpunt van brandstofverbruik verbeterd worden door *integratie van avionicasystemen met de vliegtuigconstructie*. Zo kan door aan de rolroeren gelijkgerichte opwaartse uitslagen te geven, afhankelijk van de vleugelbelasting, de vleugel bij zware remous ontlast worden. Hierdoor kan de vleugel slanker worden uitgevoerd bij gelijkblijvend maximaal buigmoment aan de vleugelwortel, met als gevolg een geringere geïnduceerde weerstand. Deze techniek wordt doorgaans aangeduid met de term "Active Control Technology" (ACT). Een andere vorm van ACT is de vervanging van de natuurlijke langsstabiliteit van het vliegtuig door een kunstmatige stabilisatie via uitslagen van het hoogteroer. Hierdoor kan het horizontale staartvlak kleiner en lichter worden en zelfs een positieve draagkracht gaan leveren, zodat ook de vleugel kleiner en lichter kan worden (22). In dit geval zullen de stuurorganen niet meer direct met de roeren gekoppeld zijn. Dit gebeurt dan via een elektronisch regelsysteem, waardoor deze vorm van besturing wordt aangeduid met "fly-by-wire" (FBW). Deze techniek wordt reeds toegepast in het General Dynamics F-16 gevechtsvliegtuig, dat bij de Koninklijke Luchtmacht in gebruik is.

Elektronische systemen zullen ook op het gebied van de *voortstuwing* verbeteringen tot gevolg hebben. De nieuwe generatie straalmotoren zal worden uitgerust met geavanceerde digitale brandstof- en motorregel-systemen, waardoor een betere regeling en daardoor ook een beter rendement mogelijk wordt. Verder kan een rendementsverbetering bereikt worden door voor de ontijzing en de klimaat- en drukregeling van de cabine niet langer gebruik te maken van afgetapte compressorlucht ("bleed-air"). Deze functies kunnen efficiënter worden vervuld door gebruik te maken van elektrische energie, elektrische verwarmingselementen, en elektrisch aangedreven koelmachines en compressoren. Dit is mogelijk geworden door de ontwikkelingen op het gebied van de sterk-stroomelektronica en de magnetische materialen, waardoor krachtige en toch lichte elektrische generatoren en elektromotoren geconstrueerd kunnen worden. Met deze elektromotoren kunnen eveneens de roeren, kleppen en het onderstel worden bediend, waardoor het tot nu toe hiervoor gebruikte hydraulische systeem kan vervallen. Hierdoor kan een gewichtsbesparing en een eenvoudiger onderhoud bereikt worden. De geschetste ontwikkeling leidt tot het zogenaamde "*all-electric aircraft*" (23).

Voor de *constructie* van de toekomstige verkeersvliegtuigen zal uit het oogpunt van gewichtsbesparing meer en meer composietmateriaal worden gebruikt. Voor de avionica zal dit enige problemen opleveren. Het metalen vliegtuig vormt namelijk een kooi van Faraday, waardoor effecten van blikseminslag en buiten het vliegtuig opgewekte elektromagnetische velden de werking van de avionica niet of nauwelijks kunnen verstoren. De metalen vliegtuighuid vormt ook een uitstekend aardvlak voor de vele tientallen antennes van het vliegtuig. Voor de nieuwe vliegtuigen zullen speciale maatregelen getroffen moeten worden om deze problemen op te lossen. Eén van deze maatregelen zal wellicht de introductie van digitale datatransmissie via glasvezels ("fibre optics") zijn.

Naast de ontwikkelingen die direct betrekking hebben op het energieverbruik en de produktie van het vliegtuig, vinden er veel ontwikkelingen plaats in de avionica die gericht zijn op een zo efficiënt mogelijk gebruik van het luchtruim en de luchthavens. Deze ontwikkelingen zijn gericht op een verdere vervolmaking van de *luchtverkeersleiding*.

In de jaren zeventig is het luchtverkeer sterk toegenomen, terwijl het aantal luchthavens en landingsbanen nauwelijks toenam. Verder is het probleem van de geluidshinder steeds zwaarder gaan wegen. Deze factoren hebben ertoe geleid dat vooral tijdens piekperiodes vertragingen kunnen ontstaan, die momenteel in de Verenigde Staten de luchtvaartmaatschappijen jaarlijks meer dan 1 miljard dollar kosten (24). In Europa bedragen deze extra kosten alleen al aan brandstof jaarlijks meer dan 100 miljoen dollar (25). Oplossing van dit probleem door het creëren van meer luchthavens en landingsbanen is zeer kostbaar en veelal onmogelijk. De oplossing van dit probleem moet dan ook gezocht worden in een *betere planning en regeling van het luchtverkeer*. Hiervoor zijn betere navigatie- en landingshulpmiddelen, communicatiehulpmiddelen, en geautomatiseerde verkeersleidingssystemen nodig.

Bij de verbeteringen op het gebied van de *navigatiehulpmiddelen* dient zeker de ontwikkeling van het uit 18 satellieten en de bijbehorende grondsystemen bestaande Navstar/GPS navigatiesysteem vermeld te

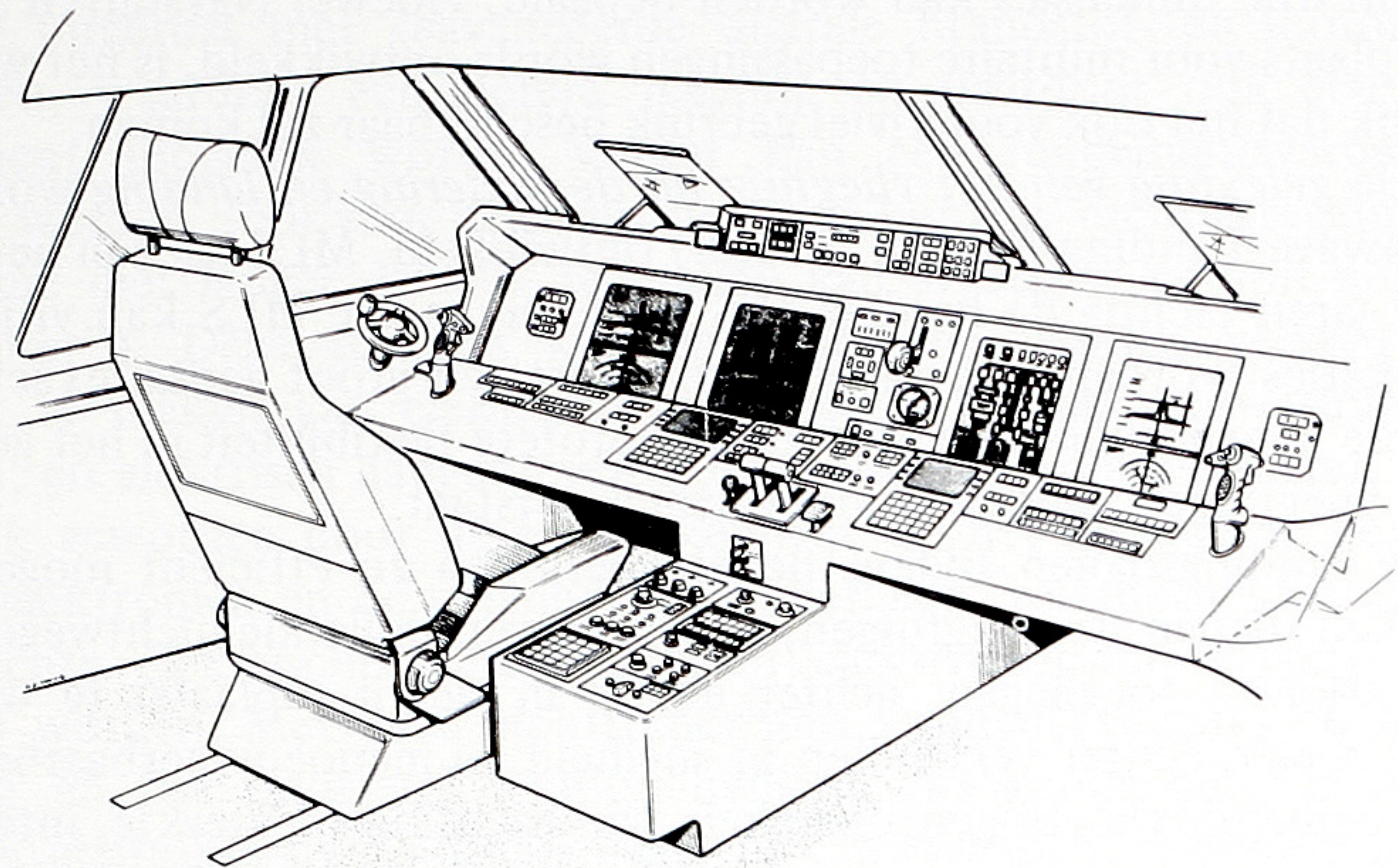
worden, waarmee de positie met een nauwkeurigheid van 30 tot 100 meter in drie dimensies kan worden bepaald. Hoewel Navstar/GPS in de eerste plaats voor militaire toepassingen wordt ontwikkeld, is het wellicht mogelijk dat het ook voor civiel gebruik beschikbaar zal komen.

Voor de *geleiding van het vliegtuig bij de nadering en landing* wordt het "Microwave Landing System" (MLS) ontwikkeld. MLS zal aan het einde van de jaren tachtig de huidige ILS gaan vervangen. MLS kan vrijwel op alle lokaties worden geïnstalleerd en levert een groot aantal exact gedefinieerde aanvliegbanen, waardoor een grotere flexibiliteit in het geleiden van de vliegtuigen naar de landingsbanen ontstaat.

Om de landingsbanen tijdens de piekperiodes zo efficiënt mogelijk te gebruiken dienen de vliegtuigen, die via de verschillende luchtwegen naar de luchthaven toevliegen, achter elkaar in de rij geplaatst te worden. Hierbij spelen echter verschillen in snelheid en manoeuvreerbaarheid van de verschillende vliegtuigen, obstakels, windrichting en -sterkte, intensiteit van de zogenaamde tipwervels, windschering, enz., een rol. Door de vliegtuigen te voorzien van navigatiesystemen waarmee het mogelijk wordt om op een door de verkeersleiding vooraf gegeven tijdstip bij het beginpunt van de nadering te zijn (het zogenaamde 4-D navigatiesysteem, waarbij de tijd als vierde dimensie geldt), wordt een effectievere verkeersleiding mogelijk.

Bij een verdere *automatisering van de luchtverkeersleiding* zal er echter behoefte zijn aan een mogelijkheid om vrijwel continu de informatie over de gevlogen koers, actuele snelheid, resterende hoeveelheid brandstof, vliegtuigconfiguratie, windrichting en snelheid ter plaatse van het vliegtuig, eventuele storingsen enz. op de grond ter beschikking te hebben. Hiermee kan de luchtverkeersleiding zich een vollediger beeld vormen van de toestand van het vliegtuig en kan exacter voorspeld worden wat zijn baan zal zijn. Hiervoor zal een *digitale communicatieverbinding* tussen de vliegtuigen en luchtverkeersleiding nodig zijn in aanvulling op de radiotelefonieverbinding. Over deze zogenaamde "digitale datalink" kan aan de vliegers informatie verstrekt worden over het actuele weer, welke landingsbaan in gebruik is, de lokale atmosferische druk enz. Tevens kunnen instructies in digitale vorm naar de vliegtuigen gestuurd worden, waar ze via een beeldscherm aan de vlieger gepresenteerd kunnen worden. Na acceptatie door de vlieger zouden de instructies automatisch in de betreffende avionicasystemen ingevoerd kunnen worden. De digitale datalink is mogelijk door een uitbreiding van de reeds aanwezige communicatieverbinding via de secundaire radar (SSR mode-S) of via een VHF-communicatieverbinding (ACARS). Deze verregaande integratie van de avionicasystemen in de vliegtuigen met de luchtverkeersleidingssystemen en de uitgebreide toepassing van digitale computers zal een verdere vergroting van de economie van het luchtverkeer mogelijk maken.

Deze nieuwe verkeersleidingssystemen zullen voorlopig alleen in Noord-Amerika, West-Europa en Japan verschijnen. De verkeersvliegtuigen zullen echter ook buiten deze gebieden veilig moeten kunnen opereren. Om deze redenen wordt onderzocht in hoeverre additionele avionicasystemen kunnen assisteren bij landingen op vliegvelden zonder MLS of ILS (bijvoorbeeld door middel van het "Head-Up Display" — HUD) en indicaties kunnen geven over de botsingskans met vliegtuigen in de omgeving ("Threat Advisory and Collision Avoidance System" — TCAS). De introductie van deze nieuwe avionicasystemen zal echter nog uitge-



Figuur 10 – Stuurhut van de toekomst volgens Lockheed

breide veiligheidsanalyses en operationele analyses vereisen, aangevuld met vliegproeven. De veiligheidsanalyses zullen niet alleen uitgevoerd moeten worden voor de apparatuur, zoals in het verleden gebruikelijk was, maar ook voor de programmatuur van de vele digitale computers en voor de mens. Hiernaast komen vooral vragen naar voren als: welke handelingen kunnen zinvol geautomatiseerd worden en welke niet, hoe kunnen zowel vlieger als verkeersleider zo goed mogelijk bij het proces betrokken blijven, welke informatie moet hiertoe zowel in het vliegtuig als op de grond gepresenteerd worden en op welke wijze, wat zijn de degradatiemogelijkheden bij storingen, hoe passen vliegtuigen met eenvoudiger avionica-uitrusting nog in dit nieuwe scenario, hoe zal de overgang van de oude naar de nieuwe situatie zo soepel mogelijk gerealiseerd kunnen worden, enz. Het zijn alle vragen die nog een uitgebreid onderzoek vereisen. In de Verenigde Staten is men een aantal jaren geleden gestart met het zogenaamde "Terminal-Controlled Vehicle" (TCV) programma, waarbij een Boeing 737 van een tweede stuurhut met geavanceerde avionica-systemen werd voorzien om operaties bij nieuwe vormen van luchtverkeersleiding te kunnen onderzoeken. Als vervolg hierop worden nu door Lockheed Georgia, in opdracht van NASA, onderzoeks-vluchtnabootsers gebouwd waarmee zowel nieuwe stuurhutinrichtingen, datapresentatie aan de vlieger en data-invoersystemen, als nieuwe luchtverkeersleidings-situaties gesimuleerd en geanalyseerd kunnen worden. Men hoopt hiermee richtlijnen voor zowel de stuurhutinrichting als de luchtverkeersleiding voor de jaren negentig te vergaren (26). De bedoeling is om de resultaten van deze vluchtnabootserproeven later te verifiëren door vliegproeven uit te voeren met een Lockheed L-1011 verkeersvliegtuig, dat net als de Boeing 737 TCV voorzien zal worden van een tweede stuurhut. Figuur 10 geeft een indruk hoe een dergelijke stuurhut er uit zou kunnen zien. Betreffende de stuurhutinrichting zal onder meer worden onderzocht hoe grootbeeld-kleurenbeeldschermen en data-invoer via gesproken commando's en via computergestuurde beeldschermen met "touch panel" in de praktijk zullen voldoen.

Avionica in Nederland en de rol van het onderwijs

In het voorafgaande heb ik geprobeerd om U een indruk te geven van de vele aspecten van de avionica. Tot slot wil ik trachten om het belang van deze ontwikkelingen voor Nederland aan te geven.

Allereerst heeft Nederland een *zelscheppende vliegtuigindustrie* met een indrukwekkend verleden, namelijk Fokker, die met ondersteuning van de Nederlandse overheid niet alleen de succesvolle F27 en F28 ontwikkelde, maar ook sinds vele jaren in licentie moderne gevechtsvliegtuigen voor de Koninklijke Luchtmacht en de NATO-partners bouwt.

Verder zijn er de *civiele vliegtuiggebruikers*, te weten onze nationale luchtvaartmaatschappij de KLM, haar dochtermaatschappijen de NLM en KLM Helikopters, en verder de belangrijkste chartermaatschappijen: Martinair, Transavia en Schreiner. Te zamen hebben deze maatschappijen ruim 65 straalverkeersvliegtuigen en ruim 110 helikopters in gebruik, terwijl ze nog 13 Airbus A-310 vliegtuigen in bestelling hebben.

De *militaire vliegtuiggebruikers*, te weten de Koninklijke Luchtmacht, de Marine Luchtvaartdienst en de Koninklijke Landmacht, beschikken samen over ca. 250 vliegtuigen en over ruim 130 helikopters.

Ten slotte heeft Nederland in de Hollandse Signaalapparaten B.V. een *elektronische industrie* die geavanceerde luchtverkeersleidingssystemen ontwerpt en realiseert (waaronder het door de Rijksluchtvaartdienst gebruikte SARP systeem), inclusief de radars en computersystemen. Verder spelen de *Rijksluchtvaartdienst (RLD)* en het *Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (NLR)* een zeer belangrijke rol. De RLD is verantwoordelijk voor de veiligheidsnormen voor het ontwerp en het gebruik van de Nederlandse civiele vliegtuigen en houdt toezicht op de naleving hiervan. Bovendien verzorgt de RLD de luchtverkeersleiding boven Nederland en de opleiding van de Nederlandse verkeersvliegers. Het NLR beschikt onder meer over de expertise en de faciliteiten die nodig zijn voor de ontwikkeling en beproefing van nieuwe vliegtuig-prototypen (of modificaties) en voor analyses van het operationele gebruik van vliegtuigen. Veelal moeten hierbij vliegproeven worden uitgevoerd, waarvoor het NLR vaak zelf de apparatuur ontwikkelt en samenstelt. Aan deze speciale instrumentatie worden dikwijls nog veel hogere eisen gesteld met betrekking tot milieu, elektrische voeding, gewicht, volume, energieverbruik en warmteontwikkeling dan aan de eerder genoemde avionica-systemen voor operationeel gebruik. Deze zwaardere eisen worden veroorzaakt door de extreme condities bij vliegproeven en de vaak beperkte mogelijkheden voor installatie, voeding en koeling van de apparatuur. Alle instanties en organisaties die betrokken zijn bij de Nederlandse luchtvaart, zullen in de komende decennia in steeds sterkere mate geconfronteerd worden met steeds complexere avionica. *Het zal duidelijk zijn dat de genoemde instanties dan ook moeten kunnen beschikken over op adequate wijze geschoold personeel, dat belast kan worden met de specificatie, het ontwerp, de realisatie, het gebruik en het onderhoud van de nieuwe vliegtuigen en hun avionicasystemen.*

Tot voor kort was er in Nederland geen mogelijkheid om op het gebied van de avionica op academisch niveau opgeleid te worden. Om toch in de groeiende behoefte aan avionica-ingenieurs te voorzien, lieten de genoemde instanties meestal elektrotechnische ingenieurs de noodzakelijke

kennis "on-the-job" opdoen, hetgeen leidde tot een lange inwerkperiode. Een grote verbetering in deze situatie is bereikt op initiatief van mijn voorganger in de leerstoel "Vliegtuiginstrumentatie", prof.ir. T. van Oosterom, door het invoeren van de richting Avionica bij de Afdeling der Elektrotechniek van deze Hogeschool (27) met ingang van het studiejaar 1979-1980. Bij deze opleiding krijgen de studenten naast en gedeeltelijk in plaats van hun elektrotechnische vakkenpakket een aantal colleges die door de Afdeling der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek worden verzorgd. De studieopdrachten en het afstudeerwerk worden eveneens in nauw overleg tussen de beide afdelingen uitgevoerd. Dat er voor deze specialisatie grote belangstelling bestaat blijkt uit het aantal studenten dat zich hiervoor heeft aangemeld. Momenteel zijn de eerste acht avionica-ingenieurs afgestudeerd en zijn er ruim 60 studenten bezig met hun derde-, vierde- en vijfdejaars studieprogramma.

Ook de vliegtuigbouwkundig ingenieur zal zowel bij het ontwerp, de realisatie, het onderhoud en het gebruik van de nieuwe generatie vliegtuigen met steeds meer geavanceerde avionicasystemen in aanraking komen. Ook voor hem is het van groot belang om de principes volgens welke deze systemen werken te kennen, en de taal van de meer elektrotechnisch georiënteerde avionica-ingenieur te kunnen verstaan.

Dat de Afdeling der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek het belang van deze ontwikkeling inziet blijkt wel uit de intensieve participatie in en ondersteuning van de avionica-opleiding. Vooral de samenwerkingsprojecten zijn in dit opzicht stimulerend voor de beide afdelingen en verlenen aan deze ontwikkeling een extra dimensie.

De beschikbaarheid van jonge elektrotechnische ingenieurs die al tijdens hun opleiding een eerste oriëntatie op het gebied van de avionica hebben uitgevoerd en van jonge vliegtuigbouwkundige ingenieurs met kennis van en begrip voor het belang van deze nieuwe avionica-ontwikkelingen zal er zeker toe bijdragen dat Nederland zijn vooraanstaande plaats in de luchtvaart kan behouden en uitbouwen.

Indien men de industriële activiteit op het gebied van de avionica in Nederland overziet, dan moet worden geconstateerd dat deze tot dusverre nagenoeg beperkt is gebleven tot de ontwikkeling en produktie van luchtverkeersleidingssystemen (hoewel reeds in de jaren twintig de Nederlandse Seintoestellen Fabriek de eerste boordavionica - *avant la lettre* - produceerde). De potentiële markt voor deze apparatuur bestaat echter op dit moment, naast de genoemde Nederlandse markt, uit een internationale markt, waarin momenteel ca. 8500 verkeersvliegtuigen, ca. 300.000 vliegtuigen voor de kleine luchtvaart, ca. 10.000 helikopters, en ca. 35.000 tot 40.000 militaire vliegtuigen worden gebruikt. In dit beeld zou er in Nederland, met zijn lange industriële traditie in het bouwen van vliegtuigen enerzijds en elektronische systemen anderzijds, plaats zijn voor een *zelfscheppende avionica-industrie*. Naar mijn mening kan, bij het tot stand brengen van een dergelijke industrie, de nieuwe Avionica-opleiding aan deze Technische Hogeschool een sterke stimulans bieden.

Geachte toehoorders,

Aan het einde van deze rede wil ik in de eerste plaats Hare Majesteit de Koningin bedanken voor mijn benoeming als buitengewoon hoogleraar aan deze Technische Hogeschool.

Verder wil ik allen die aan deze benoeming hebben meegewerkt danken voor het in mij gestelde vertrouwen. Graag geef ik hen de verzekering dat ik mij volledig er voor zal inzetten dit vertrouwen niet te beschamen. De directie van het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium ben ik zeer erkentelijk voor het feit dat zij het mogelijk heeft gemaakt om mijn ambt te aanvaarden en mij ook ruimschoots in de gelegenheid stelt, dit naar behoren te vervullen.

Mijne heren docenten aan deze Hogeschool,

Het is voor mij een grote eer en een voorrecht om in Uw kring te worden opgenomen. De vele nuttige en prettige contacten die ik in de voorafgaande periode met een aantal van u mocht hebben, geven mij vertrouwen dat deze in de toekomst verder versterkt zullen worden.

Graag wil ik een persoonlijk woord richten tot enkele docenten van de Afdeling der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek waarmee ik in de afgelopen periode meer uitgebreid contact heb gehad.

Allereerst wil ik U, hooggeleerde Van Oosterom, bedanken voor de aanstekelijke en enthousiaste wijze waarop u de liefde voor het vliegen en de vliegtuiginstrumentatie op mij hebt overgebracht. De wijze waarop u zich altijd heeft ingezet en ook nu nog inzet voor de luchtvaart is niet alleen voor mij, maar voor de velen die u mogen kennen, een voorbeeld. U, hooggeleerde Gerlach, ben ik dankbaar voor de sympathieke wijze waarop u me in de vakgroep Stabiliteit en Besturing hebt ontvangen en geïntroduceerd en waar u kon hebt gesteund. Ik hoop lange tijd in deze enthousiaste vakgroep mee te mogen werken.

U, hooggeleerde Wittenberg, wil ik danken voor het feit dat u mij direct bij mijn komst in Delft inschakelde in de werkzaamheden van de Avionica-begeleidingscommissie. Uw enthousiasme voor de Avionica-opleiding en bereidheid u er voor in te zetten werken stimulerend op alle leden van deze commissie.

Dames en heren, werkzaam bij de afdeling der Luchtvaart- en Ruimtevaart-techniek,

In de afgelopen tijd heb ik velen van u en in het bijzonder de medewerkers van de vakgroep Stabiliteit en Besturing nader leren kennen en waarderen. Een speciaal woord van waardering wil ik uitspreken voor de dames van het secretariaat, die mij op voortreffelijke wijze assistentie hebben verleend in mijn aanvangsperiode.

Dames en heren vliegtuigbouwkundige en elektrotechnische studenten,

De avionica is een vakgebied waarvan de belangrijkheid in de toekomst steeds meer zal toenemen. Ik wil er door middel van het college Vliegtuiginstrumentatie en de begeleiding van de studieopdrachten graag toe bijdragen u althans in een deel van dit interessante vakgebied enigszins thuis te doen geraken.

Ik dank u voor uw aandacht.

LIJST VAN GEBRUIKTE AFKORTINGEN

ACARS	ARINC Communication, Addressing and Reporting System
ACT	Active Control Technology
ADF	Automatic Direction Finder
ADI	Attitude Director Indicator
AEEC	Airline Electronic Engineering Committee
AIDS	Aircraft Integrated Data System
ARINC	Aeronautical Radio Incorporated
BITE	Built-In Test Equipment
BLEU	Blind-Landing Experimental Unit
CINA	Commission Internationale pour la Navigation Aérienne
DADC	Digital Airdata Computer
DME	Distance Measuring Equipment
EFIS	Electronic Flight Instrument System
EMI	Electro-Magnetic Interference
ENIAC	Electronic Numerical Integrator and Computer
FBW	Fly-By-Wire
FMCS	Flight Management Computer System
FWCS	Flight Warning Computer System
GPS	Global Positioning System
HF	High Frequency (3 – 30 MHz)
HSI	Horizontal Situation Indicator
HUD	Head-Up Display
IC	Integrated Circuit
ICAO	International Civil Aviation Organization
ILS	Instrument Landing System
INS	Inertial Navigation System
KLM	Koninklijke Luchtvaart Maatschappij
LF	Low Frequency (30 – 300 kHz)
LORAN	Long-Range Navigation
MF	Medium Frequency (300 kHz – 3 MHz)
MLS	Microwave Landing System

NACA	National Advisory Committee on Aeronautics
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NATO	North Atlantic Treaty Organization
ND	Navigation Display
NDB	Non-Directional Beacon
NLM	Nederlandse Luchtvaartmaatschappij
NLR	Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium
NSF	Nederlandse Seintoestellen Fabriek
PFD	Primary Flight Display
RLD	Rijksluchtvaartdienst
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
SARP	Signaal Automatic Radar Processing
SSR	Secondary Surveillance Radar
TCAS	Threat advisory and Collision Avoidance System
TCV	Terminal-Controlled Vehicle
VHF	Very High Frequency (30 – 300 MHz)
VOR	VHF Omnidirectional Radio Range

REFERENTIES

- (1) ICAO, ICAO Doc. 9180/7: Civil Aviation Statistics of the world; 1981.
- (2) McFarland, Marvin, The papers of Wilbur and Orville Wright. McGraw Hill; 1953.
- (3) Fokker, A.H.G., De ontwikkeling van het vliegtuig na den oorlog en van het verkeersvliegtuig in het bijzonder. De Ingenieur No. 44; 1925.
- (4) Klaauw, B. v.d. en Houtkoper, K., Het onsterfelijk alfabet. Wedrego B.V.; 1981.
- (5) Doolittle, James H. Flying an airplane in fog. SAE Journal, Vol. XXVI; March 1930.
- (6) Parrish, Lex, Space-flight simulation technology. Howard Sams Inc.; 1969.
- (7) White, Frank C., Air-ground communications; history and expectations. IEEE Transactions on Communications, Vol. COM 21, No. 5; May 1973.
- (8) Douglas, Donald W., The developments and reliability of the modern multi-engine airliner. Journal of the Royal Aeronautical Society; Nov. 1935.
- (9) Watson-Watt, R.A., Three steps to victory. Odhams, London; 1957.
- (10) Lavington, Simon, Early British computers. Manchester University Press; 1980.
- (11) Puckett, Allen E., Electronics, aeronautics and space. Aerospace; February 1981.
- (12) ICAO, Aeronautical Telecommunications; Annex 10 to The Convention of International Civil Aviation. Third Edition; 1972.
- (13) ARINC, Series 500 ARINC Characteristics. Aeronautical Radio Incorporated; 1950 – 1977.
- (14) RTCA, RTCA Do-160A, Environmental conditions and test procedures for airborne equipment. Radio Technical Commission for Aeronautics; January 1980.
- (15) Warner, R.M. en Fordemwalt, J.N., Integrated circuits. McGraw-Hill; 1965.
- (16) Smit, J.S., Verkeersleiding in de luchtvaart. De Ingenieur; 3 oktober 1974.
- (17) Anon., Boeing studies digital 747 avionics. Aviation Week and Space Technology; November 12, 1979.
- (18) ARINC, ARINC Specification 429-4, Mk 33 Digital Information Transfer System DITS. Aeronautical Radio Incorporated; August 1980.
- (19) ARINC, Series 700 ARINC Characteristics. Aeronautical Radio Incorporated; 1978 – 1982.
- (20) Veitengruber, J.E., Boucek, G.P. and Smith, W.D., Aircraft alerting criteria study. FAA-RD-76-222; May 1977.
- (21) Ott, James, Eased push for synthetic fuel worries researchers. Aviation Week and Space Technology; June 26, 1982.
- (22) Poisson-Quinton, Ph. et Wanner, J.C., Evolution de la conception des avions grace aux commandes automatiques généralisées. L'Aéronautique et l'Astronautique, No. 71; 1978.
- (23) Cronin, Michael J., The all-electric airplane as an energy-efficient transport. SAE paper 801131; 1980.

- (24) Haines, A.L. and Sinka, A.N., Airport capacity enhancement by innovative use of runway geometry. 1981 International Air Transportation Conference, Atlantic City, N.J.; May 26–28, 1981.
- (25) Leavens, John M. ed., The outlook for advanced transport aircraft. *Astronautics and Aeronautics*; February 1982.
- (26) Hatfield, Jack J., Robertson, James B., and Batson, Vernon M., Advanced crew station concepts, display and input-output technology for civil aircraft of the future. Third Digital Avionics Systems Conference; 1979.
- (27) Oosterom, T. van, e.a. Voorstel tot invoering van de richting Avionica in de studie voor elektrotechnisch aan de TH Delft; juni 1978.

Figuren met medewerking van:

KLM foto-archief Schiphol (figuren 1, 2 en 5);

Philips' Telecommunicatie Industrie, Hilversum (figuur 3);

Smith Industries, Londen; Engeland (figuur 4);

Thomson-CSF, Issy-Les-Moulineaux; Frankrijk (figuren 6, 7 en 8);

Airbus Industrie, Blagnac; Frankrijk (figuur 9);

Lockheed Georgia Company, Marietta; Ga. USA (figuur 10).