Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 54 (1963)

Heft: 3

Artikel: Doppler-Radar als modernes Langstrecken-Navigationsmittel

Autor: Willi, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916453

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

in Form eines Leuchtstriches vorgenommen werden. Sie dienen für Kursumleitungen, zum Kennzeichnen von besonderen Gebieten usw.

Etwas vom Wesentlichsten in der Verkehrsabwicklung mit Radar ist die Identifikation der Flugzeuge. Als Identifikation gilt z. B. das Beobachten eines Flugzeugechos über einem Meldepunkt und das gleichzeitige Mithören der Standortmeldung des Piloten, Identifikation durch Peilung, durch Kursanweisungen usw. Zwecks eindeutiger Identifikation muss gerade das letzterwähnte Verfahren noch recht häufig angewendet werden. Diese auch nur kurzzeitige Kursänderung von mindestens 40° bringt das Flugzeug vom ursprünglichen Kurs ab und ist deshalb bei den Piloten nicht besonders geschätzt. In der Praxis warten die Verkehrsleiter auf die Einführung von Sekundärradar, welches nebst vielen andern Vorteilen eine rasche und eindeutige Identifikation ermöglicht. Eng damit verbunden ist das automatische Höhenmeldesystem, welches dem Verkehrsleiter am Boden ohne Inanspruchnahme oder Ablenkung des Piloten laufend die genaue Höhenanzeige liefert. Damit kann die Sicherheit weiter vergrössert und die Verkehrsabwicklung noch flüssiger gestaltet werden. Nachdem die technischen Normen international festgelegt sind und in den USA bereits für alle Strahlflugzeuge die entsprechende Ausrüstung als obligatorisch erklärt wurde ist zu hoffen, dass auch bei uns die finanziellen Mittel für diese Neuerung bereitgestellt und die Einrichtungen bestellt werden.

Es ist vorgesehen im Laufe des Jahres 1963 die Radareinrichtungen in Zürich noch durch eine 50-cm-Anlage mit einer Reichweite von rund 160 km zu erweitern. Jede der drei Radaranlagen soll dann an allen Arbeitsplätzen zugeschaltet werden können um die bisherigen Ausfälle infolge Wartung und Störungen zu überbrücken.

Die Radareinrichtungen am Boden dienen in erster Linie der Kollisionsverhütung und der Beschleunigung in der Verkehrsabwicklung. Als Navigationshilfsmittel für die Flugzeuge auf der Strecke sind Funkfeuer aufgestellt. In letzter Zeit wurden einige der ungerichteten Mittelwellenfunkfeuer durch die bedeutend genaueren und gerichteten UKW-Funkfeuer ersetzt. Bereits steht auch die Automation in der Verkehrsleitung vor der Türe, und es sollen den Verkehrsleitern in einer ersten Phase die vielen Schreibarbeiten abgenommen werden, damit sie sich vermehrt der eigentlichen Verkehrsabwicklung zuwenden können.

Adresse des Autors:
B. Jermann, Chef der Bezirksverkehrsleitung Zürich, Zürich 58.

Doppler-Radar als modernes Langstrecken-Navigationsmittel

Vortrag, gehalten an der 26. Hochfrequenztagung des SEV vom 13. September 1962 in Zürich,
von *E. Willi*, Kloten

621.396.962 : 621.396.933

1. Methoden der Flugnavigation

Aus Sicherheits- und betriebswirtschaftlichen Gründen ist die Flugnavigation eine wichtige Aufgabe der zivilen Luftfahrt. Die Verkehrskontrolle stellt die Forderung, dass ein Flugzeug jederzeit seinen Standort kennt und einen vorbestimmten Flugweg räumlich und zeitlich innerhalb festgelegter Toleranzen einhält. Diese Forderung kann im Kurzstreckenverkehr mit den hier zur Verfügung stehenden Radio-Navigationshilfen verhältnismässig einfach durch den Piloten selbst erfüllt werden. Schwieriger ist die Situation über Ozeanen und über unbesiedelten Gebieten. Hier war man bis vor kurzer Zeit auf verhältnismässig komplizierte und zeitraubende Navigationsverfahren angewiesen, wie z. B. Astro-Navigation, Loran — ein Langstrecken-Radio-Navigationssystem, und Pressure Pattern Navigation — ein Verfahren zur Ermittlung des Winddriftes, das auf dem Vergleich von Druckhöhe und der mittels Radarhöhenmesser festgestellten Absolut-Höhe beruht. Mit der Einführung der modernen Strahlflugzeuge wurde auch ein neues, von Bodenhilfen unabhängiges Navigationsmittel, das Doppler-Radar, eingeführt.

Um dem in Fig. 1 gegebenen Flugweg von Punkt *A* zu Punkt *B* folgen zu können, benötigt der Pilot eine Kursangabe, die er mit Hilfe seiner Instrumente einhalten kann. Dieser Kurs kann aber nicht direkt aus der geographischen Karte entnommen werden, da ja der effektive Flugweg über Grund aus der Flugzeug-Eigengeschwindigkeit, d. h. der Geschwindigkeit relativ zur umgebenden Luftmasse und der Windstärke und -Richtung ermittelt werden muss. Das heisst also, dass das Flugzeug bei Vorhandensein der Windkomponente

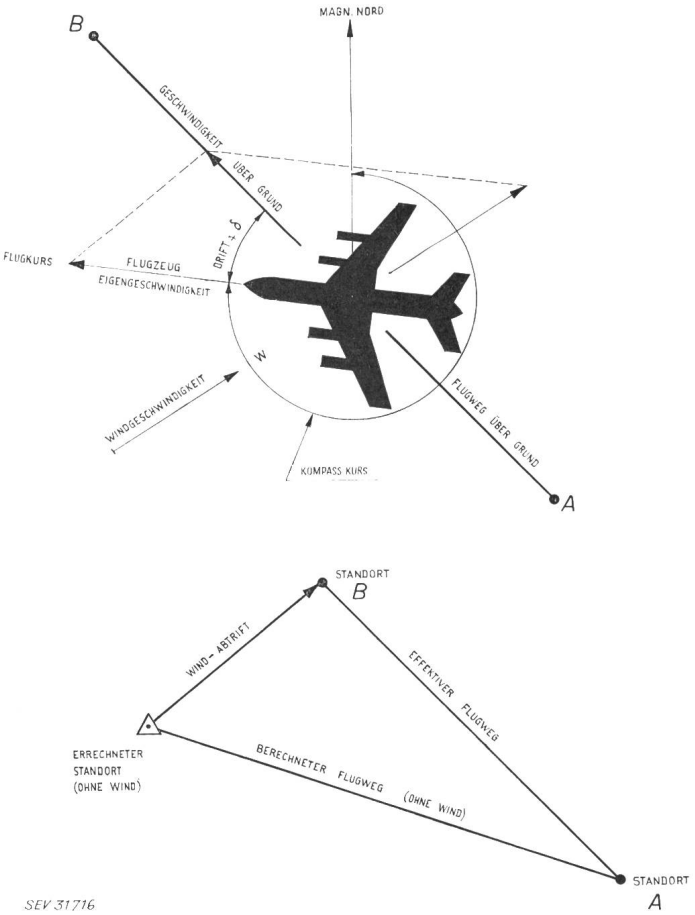


Fig. 1
Windeinfluss auf Flugnavigation

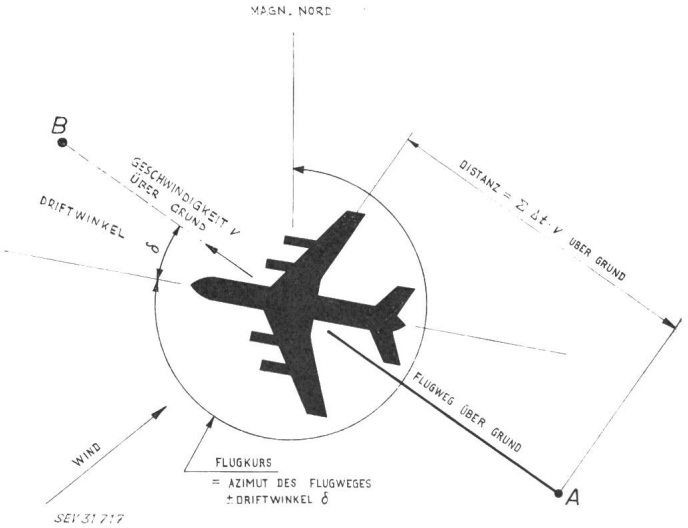


Fig. 2
Doppler-Navigation

W mit einem Driftwinkel δ entlang dem Flugweg schiebt. Da nun aber die Winddaten örtlich und zeitlich sehr variabel sind, und somit der Driftwinkel δ stark ändern kann, muss auch der Kurs in kurzen Zeitabständen korrigiert werden. Diesen Kurs kann der Navigator durch zwei Methoden berechnen:

a) Mit Hilfe von Pressure Pattern Navigation findet er den Driftwinkel δ, den er algebraisch zum Azimut des gewünschten Flugweges addiert und so den Kompasskurs ermittelt, oder

b) Der aus Flugzeug-Eigengeschwindigkeit und Kompasskurs berechnete Standort, den das Flugzeug ohne Windeinfluss erreicht hätte, wird mit dem effektiven, mit Hilfe von Astronavigation oder Loran ermittelten Standort verglichen. Aus diesen beiden Daten berechnet der Navigator die Mittelwerte von Windrichtung und -stärke des zurückgelegten Teilstückes. Die gefundenen Werte berücksichtigt er für die Kursberechnung des nächsten Teilfluges von 150...200 Meilen.

Das Doppler-Radar bringt nun, wie Fig. 2 zeigt, eine wesentliche Vereinfachung der Langstrecken-Navigation. Es liefert nämlich kontinuierlich die Geschwindigkeit über Grund v und den Driftwinkel δ. Aus diesen Daten können der einzuhaltende Kompasskurs und die geflogene Distanz berechnet werden. Durch Aufsummieren kleiner Teil-Flugwege zum bekannten Ausgangspunkt wird der momentane Standort laufend ermittelt. Die Informationen können aber auch in geeigneter Form einem Analog-Rechengerät zugeführt werden, das dann die Aufgabe ohne Zutun der Besatzung erfüllt.

Dieses Navigationsverfahren, das den momentanen Standort durch Aufsummieren des zurückgelegten Flugweges zum Ausgangspunkt ermittelt, wird in der Fachsprache als Dead-Reckoning-Methode oder zu deutsch als Koppel-Navigation bezeichnet. Im Gegensatz zur Astro-Navigation und zum Loran-Navigationssystem, die jedesmal einen vom vorherigen unabhängigen neuen Standort liefern, können sich hier Fehler von Geschwindigkeit, Driftwinkel und dem, den Hauptanteil liefernden Kurs-Fehler, über die ganze Flugzeit von mehreren Stunden summieren. Daher muss eine sehr grosse Genauigkeit der Basisinformation verlangt werden. Das Doppler-Radar selbst vermag diesen Anforderungen zwar zu genügen, doch sind die Kompass-Anlagen meist noch mit zu grossen Fehlern, z. B. Deviation, Variation oder Kreiseldrift behaftet. Auch wenn diese Fehler teilweise kompensiert werden können, verbleiben trotzdem noch Restfehler von ungefähr $\pm$ 1° bei magnetischer Kursinformation, bzw. 0,5° bei Kreisel-Kursinformation. Deshalb kommt man z. B. auf einem Nordatlantik-Flug mit den heute zur Verfügung stehenden Kompass-Systemen nicht ohne mehrere Nachprüfungen durch Gestirnsbeobachtungen aus.

Trotz der erwähnten Mängel ermöglicht das Doppler-Radar eine genauere Einhaltung des Flugweges und damit eine Einsparung von Flugzeit. Dieser Vorteil zusammen mit dem der Vereinfachung der Navigationsaufgabe rechtfertigt die hohen Investitionskosten in den Langstrecken-Strahlflugzeugen.

2. Prinzip des Doppler-Radars

Das Prinzip des Doppler-Radars beruht, wie das der Name andeutet, auf dem im Jahre 1842 durch den Physiker *Christian Doppler* entdeckten und nach ihm benannten Effekt. Bekanntlich nimmt ein Beobachter eine Änderung der Tonhöhe einer Schallquelle wahr, wenn sich Schallquelle und Beobachter relativ zueinander bewegen. Man kennt diesen Effekt von eigenen Beobachtungen, wenn man im fahrenden Zug beim Durchfahren einer Station die variierende Tonhöhe einer Signalglocke, oder vor einem Bahnübergang stehend, das Pfeifsignal einer vorüberfahrenden Lokomotive hört. Dieser hauptsächlich in der Akustik bekannte Doppler-Effekt ist bei elektro-magnetischen Wellen ebenfalls festzustellen.

Richtet ein Flugzeug einen eng gebündelten Radarstrahl auf ein Hindernis, so wird ein Teil davon wieder zum Flugzeug zurück reflektiert. Vergleicht man die Frequenz des abgestrahlten Signals mit derjenigen des reflektierten Signals, so findet man eine Frequenz-Differenz Δf. Diesen Effekt kann man wie folgt erklären (Fig. 3):

Das sich mit der Geschwindigkeit v bewegende Flugzeug strahlt elektro-magnetische Wellen der Frequenz

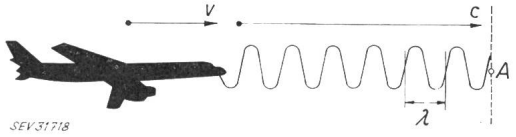


Fig. 3
Ableitung des Doppler-Effektes

v	Fluggeschwindigkeit
c	Ausbreitungsgeschwindigkeit elektro-magnetischer Wellen
f_s	Radar-Sendefrequenz
λ	Wellenlänge der Radar-Sendeanlage
A	Standort des Beobachters, bzw. des reflektierenden Hindernisses
$c + v$	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Radar-Wellenfront
f_A	Empfangsfrequenz im Punkt A
f_e	Empfangsfrequenz im Flugzeug des in A reflektierten Radarsignales

Ein Beobachter in A empfängt:

$$f_A = \frac{c}{\lambda} + \frac{v}{\lambda} \quad \text{Schwingungen pro Sekunde [Hz]}$$

Durch gleichen Effekt des in A reflektierten und im Flugzeug empfangenen Radarsignals entsteht:

$$f_e = f_A + \frac{v}{\lambda} = \left(\frac{c}{\lambda} + \frac{v}{\lambda}\right) + \frac{v}{\lambda} = \frac{c}{\lambda} + \frac{2v}{\lambda} = f_s + \frac{2v}{\lambda} \quad \text{[Hz]}$$

Die Frequenzdifferenz zwischen abgestrahltem und empfangenem Radarsignal beträgt:

$$\Delta f = f_e - f_s = \frac{2v}{\lambda} = \text{Dopplerfrequenz} \quad \text{[Hz]}$$

Durch Einsetzen von $\lambda = \frac{c}{f_s}$ und Umformen erhält man folgende Beziehung für die Fluggeschwindigkeit über Grund:

$$v = \Delta f \frac{c}{2 f_s}$$

f_s mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c aus. Die Wellenfront bewegt sich somit mit der Geschwindigkeit $c + v$. Ein Beobachter in A würde also

$$f_A = \frac{c}{\lambda} + \frac{v}{\lambda} = f_s + \frac{v}{\lambda}$$

Schwingungen/Sekunde [Hz] empfangen (λ Wellenlänge der Radar-Sendeanlage). Da nun aber die Welle am Hindernis A reflekiert und an Bord des Flugzeuges wieder empfangen wird, spielt sich der gleiche Vorgang auch auf dem Rückweg ab, so dass die Empfangsfrequenz

$$f_e = f_A + \frac{v}{\lambda} = f_s + 2\,\frac{v}{\lambda} \qquad [\mathrm{Hz}]$$

beträgt. Die Frequenz-Differenz

$$\Delta f = 2\,\frac{v}{\lambda}$$

nennt man Dopplerfrequenz. Durch Ersetzen von $\lambda = c/f_s$ kann der Ausdruck umgeformt werden in

$$\Delta f = 2\,v\,\frac{f_s}{c}\,.$$

Durch weiteres Umformen findet man:

$$v = \Delta f\,\frac{c}{2 f_s}\,,$$

woraus hervorgeht, dass die Flugzeug-Geschwindigkeit v proportional zur Dopplerfrequenz Δf ist:

$$v \sim \Delta f$$

Um eine Reflektion zu erhalten, wird der Radarstrahl nicht horizontal, sondern wie in Fig. 4 gezeigt, unter einem bestimmten Winkel α auf den Boden gestrahlt, von wo ein kleiner Teil infolge Bodenunebenheiten zum Flugzeug reflektiert und dort empfangen wird. Um Fehler, die aus einer nicht horizontalen Fluglage entstehen würden, kompensieren zu können, wendet man das Janus-Prinzip an, d. h. man strahlt in der Vorwärts- und Rückwärts-Richtung unter gleichen Winkeln α zur Flugzeug-Horizontalebene einen Radarstrahl auf den Boden, oder man stabilisiert die Antenne in der Horizontalebene. Durch einfache trigonometrische Umrechnung in einem entsprechenden elektromechanischen oder elektronischen Rechenkreis kann somit aus der Dopplerfrequenz Δf die Horizontal-Geschwindigkeit ermittelt werden.

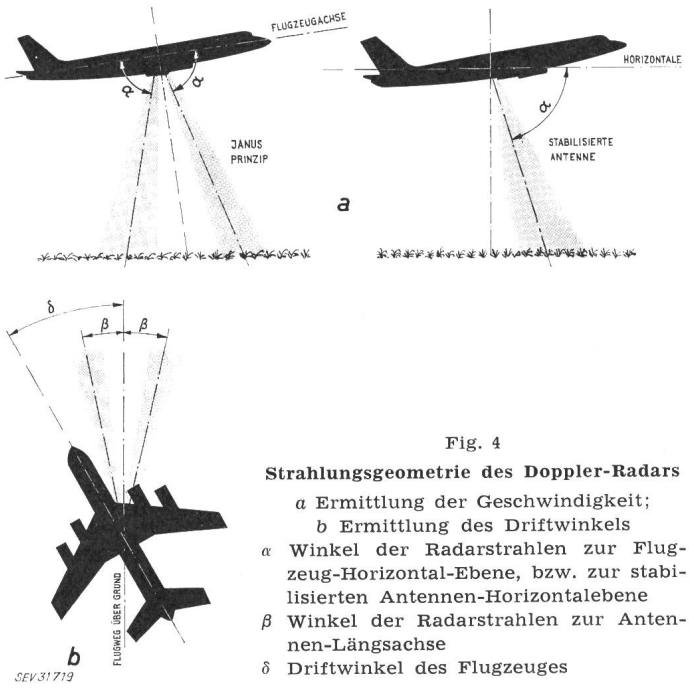


Fig. 4
Strahlungsgeometrie des Doppler-Radars
a Ermittlung der Geschwindigkeit; *b* Ermittlung des Driftwinkels
α Winkel der Radarstrahlen zur Flugzeug-Horizontal-Ebene, bzw. zur stabilisierten Antennen-Horizontalebene
β Winkel der Radarstrahlen zur Antennen-Längsachse
δ Driftwinkel des Flugzeuges

Der Driftwinkel wird gefunden, indem nicht nur ein, sondern zwei Vorwärts-Strahlen symmetrisch zur Antennenachse unter einem bestimmten Winkel β seitlich abgestrahlt werden. Wird die Antenne so gedreht, dass die Doppler-Frequenz beider Vorwärtsstrahlen gleich gross ist, so bedeutet dies, dass sie sich symmetrisch entlang dem Flugweg vorwärts bewegt. Der Verstellwinkel zwischen Flugzeug-Längsachse und Antennenachse ist dann der gesuchte Driftwinkel δ. Aus systemtechnischen Gründen werden im später beschriebenen Fabrikat total vier Strahlen verwendet.

Neben der direkten elektro-mechanischen Ermittlung des Drift-Winkels besteht auch die Möglichkeit, aus der Doppler-Frequenz-Differenz von zwei fixen, seitlich zur Flugzeug-Längsachse gerichteten Strahlen den Driftwinkel elektronisch zu ermitteln. Dieses Verfahren zusammen mit dem Janus-Prinzip hat den Vorteil, dass die Antenne keine beweglichen Teile aufweist, was aus betrieblichen Gründen oft vorgezogen wird.

Vom hochfrequenztechnischen Gesichtspunkt aus betrachtet bestehen drei Modulationsmöglichkeiten, nämlich unmodulierte, puls-modulierte und frequenzmodulierte Wellen. Im Anfang der Entwicklung, die in die 40er Jahre zurückgeht, fand man bald, dass die Anwendung unmodulierter Wellen grosse praktische Realisationsschwierigkeiten bereitet. Einerseits ist es schwierig, die Einstreuung des Senders auf die Empfangskreise zu eliminieren, anderseits treten am Flugzeug Vibrationsfrequenzen in der Grössenordnung der Doppler-Frequenz auf, die, eine mechanische Modulation der Sender- und Empfängerkreise verursachend, kaum vom Nutzsignal getrennt werden können und das Messresultat verfälschen würden. Die ersten praktisch angewandten Geräte basieren deshalb auf Puls-Modulation. Dadurch war es auch möglich, bekannte Schaltungstechnik und vorhandene Schaltelemente des konventionellen Radars zu übernehmen. Erst in einer späteren Phase der Entwicklung wurde dann das Frequenz-Modulationsverfahren angewandt.

Die heute im zivilen Luftverkehr eingesetzten Geräte wenden mehrheitlich dieses Prinzip an. Sowohl theoretische Studien, wie auch praktische Untersuchungen und Erfahrungen haben gezeigt, dass mit Puls- und Frequenz-Modulation ungefähr gleiche Genauigkeit und Systemgewinne erzielt werden können. Im praktischen Einsatz hat daher dasjenige Fabrikat den Vorrang, das bezüglich Betriebssicherheit, Einfachheit im Unterhalt, Grösse, Gewicht und Preis am vorteilhaftesten ist, also alles Charakteristiken, die mehr von den Erfahrungen und dem Können der Herstellerfirmen abhängen.

3. Beschreibung der Anlage

Nachstehend soll die in den Swissair Langstrecken-Flugzeugen DC-8 und Coronado eingebaute Doppler-Radar-Apparatur beschrieben werden.

Die Anlage besteht aus fünf Einheiten: Antenne, Sende-Empfangsgerät, Auswertegerät (oder Tracker), Anzeigeinstrument und Bedienungsgerät.

Die Antenne besteht aus einer Vierstrahl-Wellenleiter-Anordnung, die eine sehr stabile flache Kon-

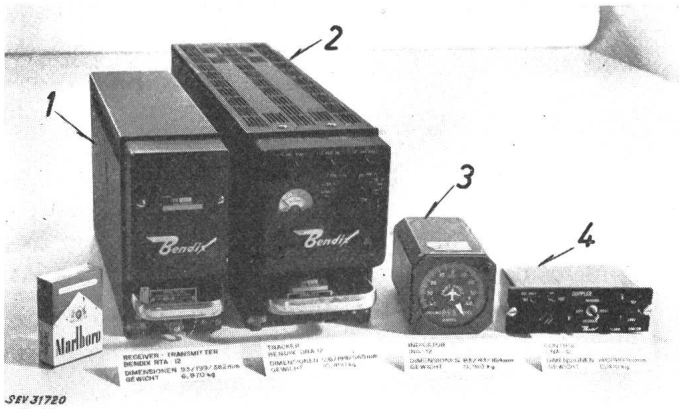


Fig. 5

Doppler-Radar-Geräte

1 Sende-Empfangsgerät; *2* Auswertegerät (Tracker); *3* Anzeige-Instrument; *4* Bedienungsgerät

struktion darstellt und keinerlei bewegliche Teile aufweist. Durch entsprechende Anordnung der Schlitze und eines Feeder-Systems entstehen vier eng gebündelte Strahlen mit einer Öffnung von ca. 4°. Die Antennen-Elemente sind so gebaut und zusammengestellt, dass bei genau horizontal und parallel zur Flugzeug-Längsachse montierter Antenne je zwei Vorwärts- und zwei Rückwärts-Strahlen mit einem seitlichen Winkel von + 10° und — 10° zur Flugzeug-Längsachse und einem Winkel von 67° zur Horizontal-Ebene nach unten gerichtet sind. Die Antenne wird an der Flugzeugrumpf-Unterseite hinter einer Fiberglas-Abdekkung montiert. Die relativ kleinen Abmessungen von ca. 670 × 590 × 110 mm und vor allem die geringe Einbautiefe erleichtern die Installation.

In Fig. 5 sind die vier Geräte gezeigt. Das Sende-Empfangsgerät kann an gut zugänglichem Ort, normalerweise im Radio-Rack installiert werden. Es wird durch einen Wellenleiter und ein Kabel mit der Antenne verbunden. Neben allen Sende- und Empfänger-Baugruppen enthält es auch die stabilisierte Stromquelle, sowie den Steuerkreis für die Ferritantennenschalter. Mit Ausnahme des Klystrons und der Stabilisator-Röhren ist das Gerät vollständig transistorisiert. Die Abmessungen betragen ca. 90 × 200 × 380 mm, das Gewicht ca. 7 kg.

Das Auswertegerät oder englisch «Tracker Unit» enthält alle zur Auswertung des Doppler-Signals notwendigen Stromkreise, sowie die Servo-Verstärker für die Instrumentierung und die Stromversorgung. Auf der Frontplatte des Gerätes befinden sich ein Instrument und ein Prüfwählschalter, die gestatten, die wesentlichen Sromkreise, inklusive die Sendeleistung und den Kristallstrom zu prüfen. Das Auswertegerät ist vollständig transistorisiert. Es wird ebenfalls im Radio-Rack montiert. Die Abmessungen betragen ca. 125 × 200 × 565 mm, das Gewicht ca. 10,5 kg.

Das Anzeige-Instrument ist ein 3-Zoll-Flugzeug-Instrument. Ein Zeiger mit Null-Stellung in der Mitte zeigt Links- und Rechts-Driftwinkel bis zu 40° auf einer die Front dominierenden Skala an. Ein in der untern Hälfte angebrachtes dreistelliges Zählwerk bringt die Geschwindigkeit über Grund (in Knoten) zur Anzeige. Ein Warnungs-Schauzeichen und eine Warnlampe, deren Funktion später erläutert wird, sind ebenfalls vorhanden.

Das Bedienungsgerät enthält alle notwendigen Bedienungselemente, nämlich einen Funktionsschalter, einen Synchronisierungsschalter für Driftwinkel- und Geschwindigkeitsanzeige, sowie einen Land/Wasser-Wählschalter und ferner eine Störungslampe.

Anzeige-Instrument und Bedienungsgerät werden an geeigneter Stelle im Cockpit installiert.

4. Funktionsbeschreibung

Die Funktion der Anlage soll am Blockschema in Fig. 6 erläutert werden. Der Sender erzeugt ein Signal mit der Frequenz von 8800 MHz, das mit 1,18 MHz frequenzmoduliert wird. Die Frequenz des Klystrons wird automatisch mit Hilfe eines, als Referenz dienenden Hohlresonators hoher Kreisgüte durch Rückführung auf den Repeller stabilisiert. Die Sendeleistung von 0,5 W wird über einen Ferrit-Last-Isolator und einen Wellenleiter auf die Antennen übertragen. Der Ferrit-Isolator gewährleistet eine Isolation von ca. 30 db zwischen Sende- und Empfangssignal. In der Antenne gelangt das Sendesignal über einen Ferrit-Zirkulator zu den Ferrit-Antennen-Schaltern. Diese statischen Umschalter verteilen die Sendeleistung in Sequenz auf die vier Richtstrahl-Antennen zehnmal pro Sekunde. Das Steuersignal wird im Sende-Empfangsgerät erzeugt. Das am Boden reflektierte Signal kehrt den gleichen Weg zurück bis zum Zirkulator, von wo es zum Kristall-Mischer gelangt. Hier wird es mit einer Probe des Sende-Signals überlagert, und aus dem entstehenden Frequenz-Spektrum wird die mit der Doppler-Frequenz modulierte 4. Harmonische der Modulationsfrequenz (4,72 MHz) entnommen und dem Empfänger zugeführt. Sie wird verstärkt und, um die Resten der Träger-Frequenz ausfiltrieren zu können, mit der vierten Harmonischen der Modulationsfrequenz überlagert. Dadurch wird die Trägerfrequenz auf Schwebungsnull gebracht, und es resultiert das reine Doppler-Frequenz-Audio-Signal f_d, befreit von allen störenden HF-Trägern. Dieses Doppler-Audio-Signal wird verstärkt und zur Gegentakt-Modulation eines 500-kHz-Signals verwendet. Die neue 500-kHz-Zwischenfrequenz wird wieder verstärkt, und anschliessend mittels eines Kristallfilters das untere Seitenband und der restliche 500-kHz-Träger unterdrückt. In dieser Form gelangt das Doppler-Signal zum Auswertegerät.

Im Auswertegerät wird das 500-kHz-Doppler-Signal über einen vom Steuergerät des Ferrit-Antennenschalters gesteuerten Sequenzschalter auf vier, je einem Radarstrahl zugeordneten Synchron-Oszillatoren (Tracker) geführt. Jeder dieser vier kontinuierlich laufenden Oszillatoren wird elektronisch auf die Doppler-Frequenz des korrespondierenden Radarstrahls synchronisiert. In Wirklichkeit entsteht nämlich nicht eine eigentliche Doppler-Frequenz, sondern ein Doppler-Frequenz-Spektrum, da ja jeder Radarstrahl nicht einen Punkt, sondern eine, dem Öffnungswinkel des Strahls entsprechende Fläche beaufschlagt, wobei die steilere Randstrahlung eine tiefere, die flachere Randstrahlung eine gegenüber dem Mittelwert höhere Doppler-Frequenz liefert. Der Umweg über die Synchron-Oszillatoren hat daher den Vorteil, dass dadurch reproduzierte, diskrete und kontinuierliche und daher leichter weiterzuverarbeitende Doppler-Frequenzen entstehen, obwohl jedes eigentliche Doppler-Signal nur während ca. 1/4 der Zeit zur Verfügung steht. Beim Einschalten der Anlage beginnen alle vier Oszillatoren mit einem automatischen Synchronisierungsprozess, indem ihre Frequenz den Bereich vom untern bis zum obern Grenzwert solange überstreicht, bis jeder sich auf

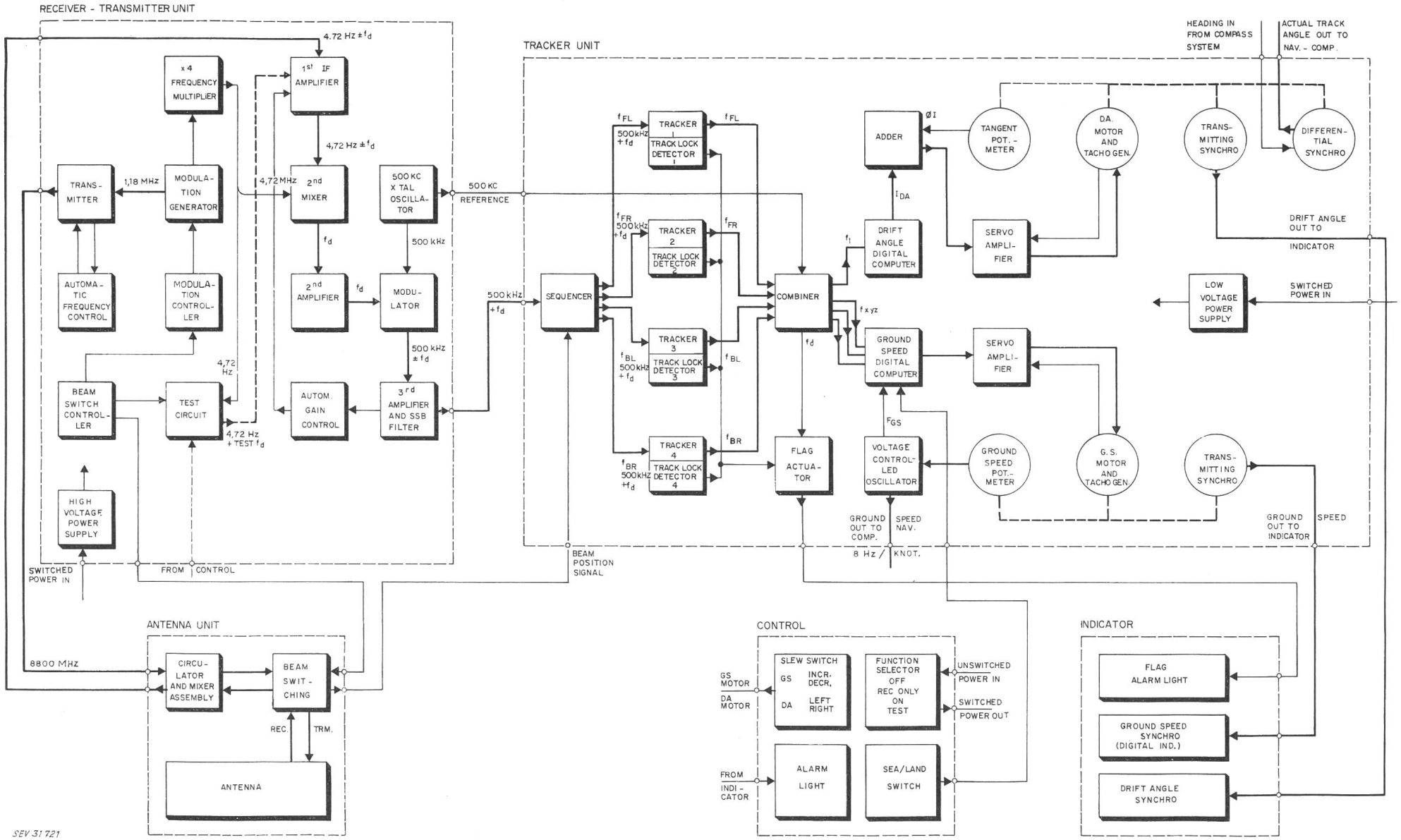


Fig. 6

Blockschema der Doppler-Radar-Anlage

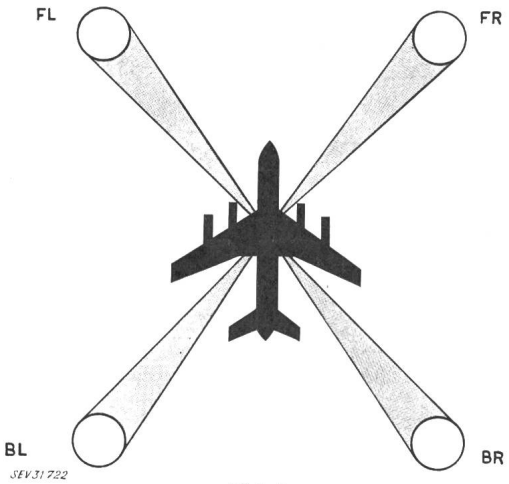


Fig. 7
Frequenz-Kombination beim Doppler-Radar-System

Doppler-Frequenzen:	Referenz für:
$f_x = (f_{FL} + f_{BR}) + (f_{FR} + f_{BL})$	Geschwindigkeit in Längsachse des Flugzeuges
$f_y = (f_{FL} + f_{BR}) - (f_{FR} + f_{BL})$	Geschwindigkeit in Querachse des Flugzeuges
$f_z = (f_{FR} + f_{BL})$	Geschwindigkeit in Hochachse des Flugzeuges
$f_L = (f_{FL} + f_{BR})$	Driftwinkel
$f_a = (f_{FL} + f_{BL}) - (f_{FR} + f_{BR}) = 0$	Warnsignal

sein Doppler-Signal gekoppelt hat. Erst wenn alle vier Signale in genügender Intensität vorhanden und ihre Oszillatoren synchronisiert sind, verschwindet das Warnschauzeichen, und verlöscht die Warnlampe im Anzeige-Instrument und im Bedienungsgerät, was dem Benützer bestätigt, dass die Anlage jetzt betriebsbereit ist. Durch Synchron-Detektoren ist es möglich, Doppler-Signale, die 20 db unter dem Rauschpegel liegen, auszuwerten. Die vier reproduzierten Doppler-Frequenzen werden in einen Kombinationsstromkreis geführt, wo Summen und Differenzen gebildet werden.

Wie aus Fig. 7 hervorgeht, resultieren daraus schliesslich total 5 neue Frequenzen f_x, f_y, f_z, f_L und f_a. Die ersten 3 Kombinationsfrequenzen:

f_x ~ zur Geschwindigkeit in der Flugzeug-Längsachse,

f_y ~ zur Geschwindigkeit in der Flugzeug-Querachse,

f_z ~ zur Geschwindigkeit in der Flugzeug-Hochachse,

dienen zur Ermittlung der Geschwindigkeit über Grund. Sie werden dem Digital-Rechenkreis zugeführt, wo eine neue, der Geschwindigkeit über Grund proportionale Frequenz abgeleitet wird. Dieses, die Flugzeuglage im Steig-, Sink- und Kurvenflug voll berücksichtigende Signal ist in dieser Form sehr gut für die Integration zur Berechnung des zurückgelegten Flugweges geeignet. Zur direkten Anzeige wird sie in Analogform umgewandelt und über ein Fernanzeige-System ins Cockpit übertragen.

Die Versuche zeigten, dass die Reflektionsverhältnisse über Land und Wasser sich so ändern, als ob der Strahlungswinkel α sich leicht verändern würde. Die entsprechende Korrektur wird dadurch erreicht, dass mit dem auf dem Bedienungsgerät vorgefundenen Schalter Land/Wasser die Uhr-Frequenz des Digital-Rechengerätes entsprechend geändert wird (—0,78 %). Der Driftwinkel wird aus der vierten Kombinationsfrequenz f_L in einem kombinierten Digital-Analog-Rechenkreis ermittelt. Zur Korrektur des aus nicht horizontaler Fluglage entstehenden Fehlers kann eine Lage-Information von einem ohnehin an Bord des Flugzeuges vorhandenen Vertikalkreisel zugeführt werden. Die Genauigkeit dieser Information ist aber nicht kritisch, da es sich nur um eine Korrektur zweiter Ordnung handelt. Das Resultat, das in Form eines Drehwinkels im Analogteil des Rechengerätes zur Verfügung steht, wird durch ein konventionelles Fernübertragungs-System auf ein Anzeige-Instrument im Cockpit übertragen.

Eine fünfte Kombinationsfrequenz f_a stellt die Dreh-Geschwindigkeit des Flugzeuges um die Hochachse dar. Obwohl dieser Wert für Navigationsbelange nicht benötigt wird, stellt er ein ideales Kriterium für den Warnsignal-Stromkreis dar, da er theoretisch immer 0 sein muss. Sobald eine oder mehrere der vier Frequenzen ausfallen oder eine grössere Abweichung aufweisen, wird $f_a \neq 0$, so dass daraus das Warnsignal abgeleitet werden kann.

Eine im Betrieb sehr wertvolle Einrichtung ist der eingebaute Prüfstromkreis. Durch Wahl der Position «Test» am Funktionsschalter des Bedienungsgerätes wird ein Testsignal erzeugt. Dieses Signal wird wie ein normales Dopplersignal durch sämtliche Empfangs- und Auswertekreise geleitet, wobei das Anzeige-Instrument bei richtigem Funktionieren zum voraus bekannte Werte der Geschwindigkeit und des Driftwinkels anzeigen muss. Mit Ausnahme der Antenne und der Antennenschalter kann dadurch die ganze Anlage geprüft werden.

Die zur Verfügung stehende Zeit gestattet leider nicht, auf Schaltungsdetails einzutreten. Dass es sich aber um recht komplizierte Stromkreise handelt, kann

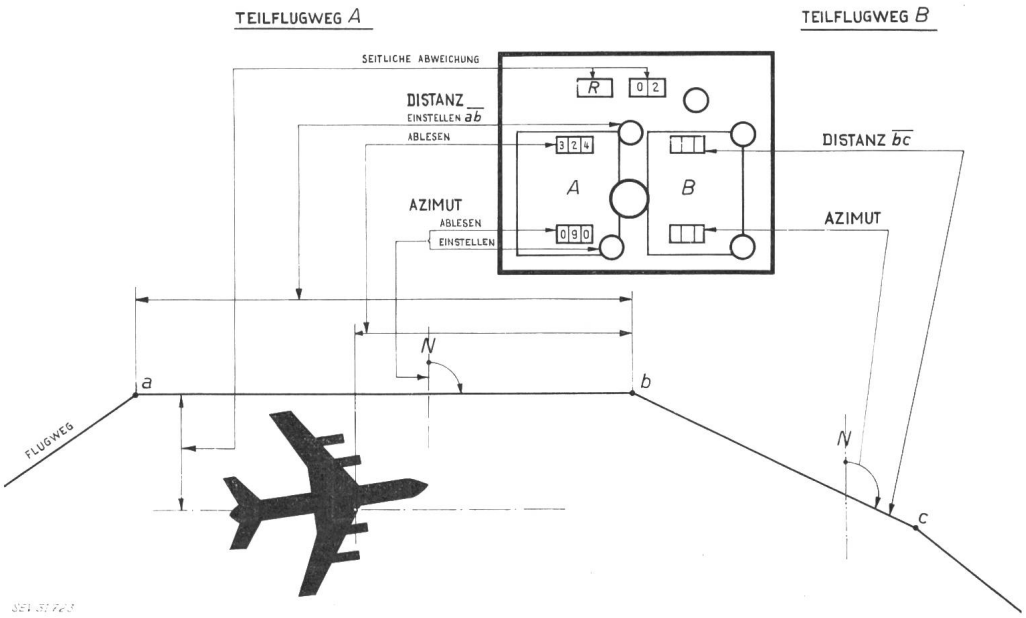
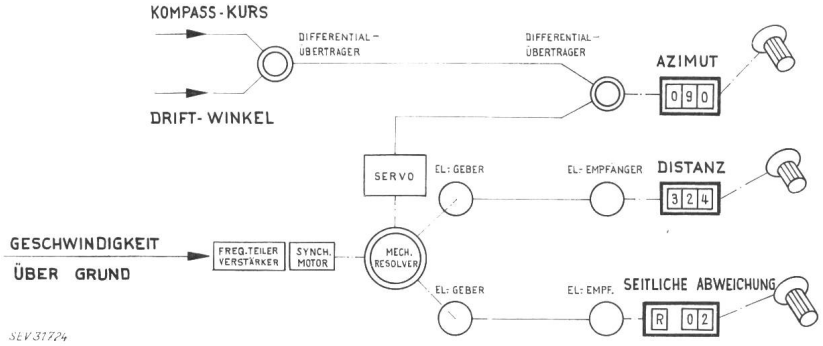


Fig. 8
Arbeitsweise des Navigations-Rechengerätes

Fig. 9
Blockschema des Navigations-Rechengerätes



schon aus der Funktions-Beschreibung geschlossen werden. Dies wird wohl dadurch bestätigt, dass im Auswertegerät allein über 600 Halbleiter, wovon etwa die Hälfte Transistoren, ferner ca. 1400 Widerstände und ca. 350 Kondensatoren eingebaut sind. Das Sende-Empfangsgerät enthält noch weitere je ca. 60 Transistoren und Dioden. Der Aufbau der Geräte ist sehr gedrängt, doch erlaubt die moderne Bauweise trotzdem gute Zugänglichkeit. Die aufgestellten Geräte zeigen alle konstruktiven Details.

5. Navigationsrechengeräte

Die zwar sehr wertvollen Doppler-Radar-Informationen — die Geschwindigkeit über Grund und der Driftwinkel — helfen dem Piloten in dieser Form noch nicht allzuviel. Er benötigt Positions- und Steuerinformationen, die erst aus den Doppler-Informationen und dem Kompass-Kurs ermittelt werden müssen. Diese Arbeit übernimmt ein Analog-Rechengerät. Die Arbeitsweise soll an Fig. 8 erläutert werden.

Im Rahmen der Flugvorbereitung wird auf Grund der aktuellen Wetter-Situation der wirtschaftlich optimale Flugweg berechnet. Er wird in Teilstücke von ca. 200 Meilen aufgeteilt, und deren Distanz und Azimut im Flugplan notiert. Diese, als Programm dienenden Daten werden in das Kontrollgerät eingegeben. Es gestattet die gleichzeitige Eingabe von Daten für zwei Flugweg-Teilstücke. Das Gerät rechnet dann laufend die Distanz zum nächsten Wegpunkt und die seitliche Abweichung vom geplanten Flugweg. Beim Erreichen des Wegpunktes *b*, d. h. der Distanz 0, schaltet das Gerät automatisch auf die Datengruppe *B* um. Die damit freigewordene Dateneingabe *A* kann dann bereits wieder mit den Daten des dritten Teilstückes programmiert werden. Auf diese Weise kann der gesamte Flugweg abgeflogen werden.

Die Funktion soll in Fig. 9 erläutert werden. Der vom Kompass-System gelieferte Kurswert wird im ersten Differential-Synchro algebraisch zum Driftwinkel addiert und im zweiten Differential-Synchro mit dem programmierten Azimut des Flugweges verglichen. Der + oder — Differenzwinkel wird durch ein Servo-System auf den mechanischen Resolver übertragen. Die Geschwindigkeitsinformation, die vom Auswertegrät in Form einer frequenzproportionalen Wechselspannung zur Verfügung steht, wird über Frequenzteilerstufen auf die, dem Synchromotor entsprechende Frequenz reduziert und verstärkt. Der vom Synchromotor angetriebene mechanische Resolver zerlegt die Drehgeschwindigkeit in eine Cosinus- und Sinus-Komponente, d. h. in eine Geschwindigkeitskomponente entlang bzw. seitlich zum gewünschten Flugweg. Diese beiden Drehgeschwindigkeiten werden elektrisch auf das Bedienungs- und Anzeigegerät fernübertragen und je auf einem Zählwerk aufsummiert. Die Längskomponente wird vom programmierten Wert subtrahiert, so dass kontinuierlich die Distanz zum nächsten Wegpunkt abgelesen werden kann. Die Querkomponente wird als Links- oder Rechts-Querabweichung vom programmierten Flugweg angezeigt. Das Rechengerät stellt ausser der direkt ablesbaren Information noch eine Steuerinformation zur Aufschaltung auf den Autopiloten zur Verfügung. Fig. 10 zeigt die beiden Geräte, das Bedienungsgerät, das im Cockpit installiert und das Rechengerät, das im Radiorack untergebracht wird.

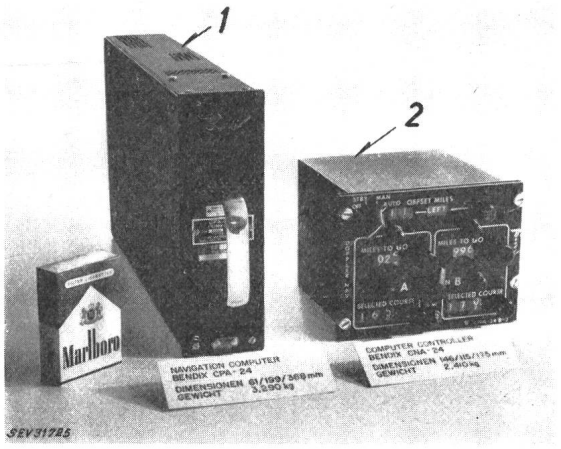


Fig. 10
Navigations-Rechengeräte
1 Navigations-Rechengerät; *2* Bedienungs- und Anzeigegerät

6. Erfahrungen mit Doppler-Radar-Navigationsanlagen

Die Swissair hat als eine unter den ersten Fluggesellschaften anfangs 1961 begonnen, vorerst versuchsweise auf einem DC-8 Flugzeug und anschliessend auf allen DC-8 und Coronado Langstreckenflugzeugen solche Doppler-Radar-Anlagen mit Navigations-Rechengeräten einzubauen. Die hohe Reise-Fluggeschwindigkeit der Strahlflugzeuge von bis zu 1000 km/h und die Forderung nach optimaler Wirtschaftlichkeit veranlassten die Swissair, ihren Besatzungen die modernsten z. Zt. erhältlichen Navigationshilfsmittel zur Verfügung zu stellen. Wirtschaftlichkeitsrechnungen ergeben, dass die erzielbaren Flugweg-Einsparungen die hohen Investitionskosten rechtfertigen.

Die Navigations-Genauigkeit, die mit solchen Anlagen im aktuellen Einsatz erreicht wird, beträgt:

Distanz entlang dem Flugweg: in 95 % aller Fälle innerhalb	± 0,8 %
Seitliche Abweichung: mit Magnet-Kompass	± 2,4 %
mit Kurskreisel	± 1,5 %
Die Doppler-Radar-Geräte selbst haben folgende Genauigkeit:	
Geschwindigkeit:	± 0,6 % + 1 kn
Driftwinkel:	± 0,5°

Die lateralen Fehler sind hauptsächlich auf die beschränkte Genauigkeit der Kursinformation zurückzuführen.

Heute, nach ca. 1½ jährigem Einsatz resultiert eine, in Anbetracht der Komplexität der aus total 7 Geräten bestehenden Anlage, akzeptable Betriebszuverlässigkeit von ca. 100 h.

Adresse des Autors:
E. Willi, Ingenieur, Embracherstrasse 280, Winkel bei Bülach (ZH).