Königsbach, im Juli 1998

# Terrestrische und satellitengestützte Radio-Navigationssysteme für die Luftfahrt

Dipl.-Ing. Erich H. Franke, DK6II
Lenaustraße 20
D-75203 Königsbach-Stein 2
FAX: 07232-1647
Email: 100634.2762@compuserve.com

Skriptum zum Vortrag anläßlich der 43. UKW-Tagung in Weinheim

Seit mehr als fünfzig Jahren werden Radio-Navigationssysteme in der Luftfahrt eingesetzt. Dazu zählen die klassischen bodengestützten Systeme zur Streckennavigation, die sogenannten ‚Drehfunkfeuer' (VOR) wie auch die satellitengestützten, auf dem Global Positioning System (GPS) beruhenden Navigationseinrichtungten. Im weiteren Sinne zählt man auch die Landesysteme wie das Instrumenten-Landesystem (ILS) dazu. Im folgenden Beitrag wollen wir uns mit den Prinzipien dieser Systeme näher beschäftigen.

## Allgemeines

Die meisten der hier behandelten Systeme beruhen darauf, daß die an Bord der Luftfahrzeuge eingebauten Empfänger Signale von boden- oder satellitengestützten Sendestellen empfangen, auswerten und daraus Informationen über Position, Kurs und Geschwindigkeit ableiten.

Diese Systeme müssen, aufgrund der großen Anzahl an Nutzern zumindest in der zivilen Luftfahrt exakt spezifiziert sein. Die Aussendungen müssen auf international anerkannten Standards basieren.

Die International Civil Aviation Organization (ICAO) legt Aufbau, Leistungsdaten und Parameter der Anlagen in ihrem Standard zu ‚Aeronautical Telecommunications' fest.

Da es sich durchweg um sicherheitskritische Anlagen handelt, sind diese in aller Regel redundant ausgelegt, auf hohe MTBF hin entwickelt und verfügen über eigenständig arbeitende Überwachungssysteme (Monitoring), die die Signalaussendungen permanent überwachen um die Integrität und Verfügbarkeit sicherzustellen.

## VHF Omnidirectional Range, VOR

Hinter diesem Namen verbirgt sich ein seit Jahren weltweit eingeführtes, bodengestütztes System zur Streckennavigation auf Kurz- und Mittelstrecken.

Am Boden sind hierzu entlang der Luftstraßen sogenannte ‚Drehfunkfeuer' installiert, die Reichweiten von bis zu 300 km besitzen. Die Sender strahlen Signale im Flugfunk-Frequenzbereich zwischen 108 und 118 MHz ab. Sendeleistungen bis 50 Watt sind dabei üblich. VORs können in Sheltern oder kleinen Gebäuden untergebracht werden und können an ihren charakteristischen Antennenformen leicht erkannt werden.

Die Aussendungen der Bodenstationen werden im Flugzeug von geeigneten Bordempfängern aufgenommen und ausgewertet. Die Bordempfänger liefern dem Piloten eine Azimut-

Information, die es seinem Course Deviation Indicator (CDI) ermöglicht, auf einem vorgewählten Kurs von einer Station zur nächsten zu fliegen.

Der Pilot kann dann am CDI die Information ‚fliege links‘ und ‚fliege rechts‘ ablesen und erhält die Anzeige, daß er sich auf eines der Funkfeuer zubewegt oder sich von ihm entfernt (‚from/to‘).

Die Bodenanlagen senden zu diesem Zweck zwei mit 30 Hertz modulierte Signale aus. Eines davon dient als Referenzsignal und wird omnidirektional in alle Richtungen abgestrahlt. Beim klassischen VOR ist das 30-Hertz-Referenzsignal auf einen Unterträger von 9,96 kHz mit einem Hub von ±480 Hz frequenzmoduliert. Der Unterträger ist wiederum mit einem Modulationsgrad von 30% auf den HF-Träger amplitudenmoduliert.

Neden dem Referenzsignal strahlt die Bodenanlage nun noch ein richtungsabhängiges Signal ab. Dieses wird gewöhnlich durch gerichtetes Aussenden von zwei mit jeweils 30 Hz amplitudenmodulierten HF-Trägern erzeugt.

Die Modulationssignale sind dabei um 90° phasenverschoben, wodurch sich eine Sinus/Cosinus-Beziehung ergibt. Die beiden Signale werden nun auf zwei um 90° gegeneinander gedrehten Dipolen abgestrahlt, wodurch im Funkfeld ein virtuelles, sich mit 30/sec drehendes Signal entsteht.

Dabei besteht eine feste Phasenbeziehung zu dem Referenzsignal dergestalt, daß die Phasenlage zwischen Referenz und richtungsabhängigem Signal in Richtung Norden 0° beträgt. In Ostrichtung ist das richtungsabhängige Signal um 90°, in Südrichtung um 180° und in Westrichtung um 270° phasenverschoben.

Der Bordempfänger kann die Phasenverschiebung und damit die Richtung zur Bodenstation mit einfachen Mitteln präzise bestimmen.

Durch Umschalten des VOR-Bordempfängers zwischen zwei Bodenstationen können die Standlinien bestimmt und daraus die Position des Flugzeuges präzise bestimmt werden. Hierzu genügt die Karte, in der die Standorte der VOR und deren Betriebsfrequenzen eingetragen sind.

Durch Vergleich des tatsächlichen Kurses des Luftfahrzeugs zu dem gemessenen Kurs zum VOR kann die Kursabweichung ermittelt und angezeigt (Course Deviation Indicator, CDI) und die ‚to/from‘-Anzeige abgeleitet werden. Üblich ist auch die Kopplung mit dem Autopiloten.

Im Spektrum des VOR-Drehfunkfeuers ist ein weiterer Bereich von 300 Hz bis 3 kHz reserviert. Im Standardfall wird hier die Stationskennung in Morsetelegraphie in A2 mit einer Modulationsfrequenz von 1020 Hz mit 48 BpM (125 msec Dot-length) eingespeist.

Zusätzlich kann hier auch Sprachinformation, beispielsweise für automatische Ansagen untergebracht werden.

Moderne VOR besitzen eine Azimut-Genauigkeit von besser als ±1°, gemessen in 300m Abstand über flachem Gelände.

## Doppler-VOR, DVOR

In geographisch schwierigem Gelände, beispielsweise in Bergregionen werden häufig sogenannte Doppler-VOR eingesetzt, die auf der Ausnutzung des Doppler-Effektes beruhen. Sie liefern aufgrund der größeren Basisbreite des Antennensystems ein wesentlich genaueres Azimut-Signal.

Bordseitig sind Standard-VOR und Doppler-VOR kompatibel. Die Bordempfänger und die Navigationsprozeduren sind identisch.

Doppler-VOR sind an ihrem charakteristischen Antennensystem im Gelände leicht zu erkennen. Auf einer flachen meist 30m durchmessenden Stahlgitterkonstruktion ruhen 50 kreisförmig angeordnete Einzelantennen. In der Mitte dieses Kreises befindet sich eine weitere rundstrahlende Antenne.

Diese rundstrahlende Antenne sendet einen mit den bereits erwähnten 30 Hz sowie dem Kennungs- bzw. Sprachsignal amplitudenmodulierten Träger aus.

In die fünfzig Antennen des Antennenkreises wird ein HF-Signal gleicher Frequenz eingespeist, das durch 9960 Hertz amplitudenmoduliert ist. Die Antennen werden nun elektronisch der Reihe nach eingeschaltet, so daß sich 30 ‚Umläufe' pro Sekunde ergeben.

Für einen äußeren Beobachter erscheint es, als würde sich das Signal dreißig mal pro Sekunde auf ihn zu oder von ihm wegbewegen. Diese ‚Bewegung' erzeugt über den Doppler-Effekt eine periodische Frequenzverschiebung, die in einer Frequenzmodulation von 30 Hertz resultiert. Betrachtet man dabei den Durchmesser des Antennenkreises von ca 13,5 m im Bezug auf die genutzte Wellenlänge, so entsteht ein Frequenzhub von wiederum ±480 Hertz.

Technisch gesehen werden in der Bodenstation zwei getrennte Seitenbandsignale erzeugt, nämlich für $f_T$-$f_H$ und $f_T$+$f_H$ getrennt. Läßt man nun beide Seitenbandsignale um 180° versetzt gegenphasig umlaufen, so erscheint das Gesamtsignal im Fernfeld exakt wie das Doppelseitenbandsignal eines Standard-VOR, nur eben mit der wesentlich höheren Genauigkeit.

Schlüssel für die hohe Genauigkeit ist zudem die Nutzung digitaler Signalaufbereitungen mit deren Hilfe Frequenzen und Amplituden sehr exakt festgelegt und im Betrieb permanent überwacht werden können.

**Distance Measurement Equipment, DME**

VOR und Doppler-VOR werden meist zur Kursbestimmung auf der Strecke aber auch zur Bestimmung des Anflugkurses zu einem Flugplatz eingesetzt. In diesem Fall muß der Pilot den Abstand zu seinem Ziel messen können. Hierbei unterstützt ihn das Distance Measurement Equipment (DME), das für diesen Anwendungsfall mit dem Anflug-VOR am gleichen Standort untergebracht ist.

Im Gegensatz zum VOR, bei dem das Bordgerät rein passiv arbeitet, muß das DME-Bordgerät auch senden können, um den am Boden befindlichen Transponder abzufragen.

DME nutzt den Frequenzbereich von 962 MHz bis 1213 MHz, das in vier Teilbänder zu jeweils 63 MHz Breite unterteilt ist. Bordgeräte senden dabei im Frequenzbereich von 1025 MHz bis 1150 MHz. Es gibt zwei Betriebsarten, den sogenannten X und den Y-Mode. Der X-Mode ist der gebräuchliche. Grund für die Modi ist die Mehrfachausnutzung der verfügbaren Frequenzen.

Eine Abfragesendung besteht aus einer Folge von Doppelpulsen (pulse pairs). Die 3,5µs langen Pulse im Pulspaar besitzen einen festen Abstand von 12µs. Abfrageraten von 800 bis hin zu 4800 Pulspaare pro Sekunde sind üblich.

Empfängt nun der Transponder in der Bodenstation eine Folge von Doppelpulsen, so antwortet er ebenfalls mit Doppelpulsen. Die Pulse im Doppelpuls besitzen wiederum einen Abstand von 12µs. Die Verzögerungszeit im Transponder beträgt im X-Mode 50µs. Üblicherweise senden die Transponder mit 100 Watt bzw. 1kW.

Der Bordempfänger mißt nun die gesamte Zykluszeit, d.h. von der Aussendung der Doppelpulse bis zum Empfang der Antwortsendung. Unter Kenntnis der Antwort-Verzögerung kann der Bordempfänger die Signallaufzeit im Funkfeld und damit die Distanz zwischen Bordgerät und Transponder bestimmen.

Die Genauigkeit der Standard-DME beträgt 30m innerhalb von 40 nautischen Meilen.

Höhere Genauigkeiten sind mit der DME/P (DME Precision) zu erreichen.

Die DME/P besitzt zwei Betriebsarten. Im ‚Initial Approach Mode' beträgt die Genauigkeit 15m innerhalb von 22 nautischen Meilen. Im sogenannten ‚Final Approach Mode' 10m innerhalb von 8 nautischen Meilen.

**Non-Directional Beacons, NDB**

Die NDB gehören zu den ältesten noch eingesetzten Navigationssystemen. Sie senden Bakensignale mit 100 Watt bzw. 400 Watt im Frequenzbereich zwischen 190 kHz bis 500 kHz aus und sind in der Regel mit der Stationskennung als Morsezeichen in A2A moduliert.

NDB sind heute zwar noch im Einsatz, jedoch mit sinkender Bedeutung.

**Instrumenten-Landesystem, ILS**

Von großer wirtschaftlicher Bedeutung hingegen ist das Instrumenten-Landesystem ILS. Das ILS erlaubt einen gezielten Landeanflug in Kurs und Gleitweg bis hin zum Aufsetzpunkt auf der Landebahn.

Wie alle Systeme ist das ILS international exakt spezifiziert und unterliegt erheblichen Sicherheitsauflagen, ermöglicht das System Landungen auch bei ungünstigen Sicht- und Wetterverhältnissen. Die Anlagen sind in Kategorien CAT I, II und III unterteilt, die angeben, bis zu welcher Boden- bzw. Landebahnsicht eine entsprechend ausgestattete Landebahn angeflogen werden darf. Kategorie III, d.h. die Möglichkeit zum Blindanflug stellt sehr hohe Anforderungen an die Performance und Verfügbarkeit der Ausstattung. Aus diesem Grund gibt es weltweit auch nur sehr wenige Hersteller, deren Anlagen dieser hohen Anforderungsklasse genügen.

Eine typische ILS-Konfiguration besteht aus dem sogenannten Landekurssender, auch Localizer (LOC) genannt. Dieser legt den Anflugweg im Azimut fest und stellt sicher, daß das Flugzeug sich geradlinig und fluchtend auf die Landebahn zubewegt. Der Gleitwegsender (Glide Slope, GS) stellt sicher, daß das Flugzeug im Sinkflug den Gleitwinkel von 2,5 bis 3° auf ca. 0,7° genau bis hin zum Aufsetzpunkt sicher einhält.

Ergänzt werden Landekurs- und Gleitwegsender durch die Markierungssender, auch Marker genannt. Die Markierungssender strahlen ihr Signal senkrecht nach oben und geben dem Piloten so eine Hilfe, wie weit die Landebahnschwelle noch entfernt ist.

In Anflugrichtung gibt es den sogenannten ‚Outer Marker' bei ca. 4 nautischen Meilen, d.h. 7200 m Abstand zur Landebahnschwelle (Threshold). Meist existiert auch ein Middle Marker, der bei 1050m montiert ist. In Sonderfällen kann bei 75m ein ‚Inner Marker' existieren. Die Marker werden über ihr Modulationssignal unterschieden. Doch dazu später mehr.

Häufig ist eine ILS-Installation zusätzlich mit einer DME ausgestattet, um dem Flugzeugführer den Abstand zum Platz anzuzeigen.

Der Landekurssender arbeitet im konventionellen Flugfunkbereich zwischen 108 MHz und 112 MHz. Er erzeugt ein komplexes Signalmuster, das hauptsächlich aus zwei gerichteten ‚Sendestrahlen' besteht. Diese werden durch die beiden Hauptstrahlrichtungen des Antennendiagramms in der horizontalen Ebene der Sendeantenne gebildet.

Die Antenne selbst steht von der Anflugrichtung aus gesehen in der Verlängerung der Landebahn. Moderne Anlagen benutzen häufig ein aus mehreren Dipolzeilen bestehendes Antennenarray vor einer Reflektorwand.

Die beiden gerichteten Signale sind unterschiedlich moduliert, wobei die linke ‚Keule' mit 90 Hertz, die rechte mit 150 Hertz moduliert ist.

Der Bordempfänger mißt ständig den Modulationsgrad. Sind die beiden Pegel gleich, d.h. ist der Unterschied der Modulationsgrade Null (Difference in Depth of Modulation, DDM), so befindet sich der Empfänger exakt zwischen den beiden ‚Keulen' und damit auf Sollkurs. Eine Abweichung nach links führt zu einem Überwiegen des 90-Hertz-Anteiles. Überwiegt der 150-Hertz-Anteil, so befindet sich der Empfänger zu weit rechts.

Ein um plus oder minus 18% abweichendes DDM kennzeichnet den Sektor von ±35°. Die Reichweite für den Empfang der Hauptkeulen ist mit 25 NM spezifiziert.

Das Richtdiagramm der Antenne sowie die Präzision der Signalaufbereitung bestimmt die Genauigkeit des Landesystems. Moderne Systeme arbeiten deshalb mit digitaler Signalerzeugung und Amplituden-/Phasenregelung um eine geringe Kursrauhigkeit zu erreichen.

Um Verschiebungen, die beispielsweise durch Nebenzipfel der Sendeantenne hervorgerufen werden zu kompensieren, wird zusätzlich ein sogenanntes ‚Clearance'-Signal ausgesendet, das das Diagramm im Nahbereich deutlich verbessert. Weitere Innovationen erlauben die Reduktion von Kursverfälschungen bei Auftreten lokaler Signalreflektionen, beispielsweise an Hangars oder anderen Flugzeugen. Die Diskussion dieser Techniken würde den Rahmen dieses Vortrages sprengen.

Ähnlich wie der Localizer arbeitet der Gleitwegsender. Der Gleitwinkel wird wiederum durch zwei Hauptaussendungen eingefaßt. Die Sendefrequenz des Gleitwegsenders liegt hierbei zwischen 328 MHz und 336 MHz. Die beiden Hauptaussendungen werden wiederum amplitudenmoduliert, wobei die obere ‚Keule' mit 90 Hertz, die untere mit 150 Hertz moduliert ist. Bei gleichem Modulationsgrad, d.h. DDM 0 beträgt der Gleitwinkel dann die geforderten 2,5° bis 3°.

Ein DDM von 17,5% ergibt dann eine Abweichung von ±0,7° vom Gleitwinkel. In Wirklichkeit ist die durch die Antenne des Gleitwegsenders abgestrahlte Ebene gleichen Modulationsgrades (DDM 0) keine Gerade sondern, entsprechend des optimalen Gleitweges, eine Hyperbel. Die sogenannte Referenzhöhe, d.h. das ‚Ende' dieser Hyperbel am Gleitwegmast liegt dann 15m über der Landebahnschwelle.

Der Mast selbst steht seitlich versetzt rechts oder links neben der Schwelle.

Die Markierungssender strahlen mit Richtantennen senkrecht nach oben. Sie arbeiten auf 75 MHz und werden durch ihre Modulation bzw. die NF-Kennfrequenzen unterschieden. Der Outer Marker ist mit 400 Hertz, der Middle Marker mit 1300 Hertz moduliert. Falls der Inner Marker existiert, so hätte er eine Kennfrequenz von 3000 Hertz.

ILS der Kategorien CAT II und CAT III sind weiterhin mit einem Fernfeld-Monitor ausgestattet. Dieser mißt on-line alle Anlagenparameter und stellt sicher, daß die gemäß ICAO Annex 10 spezifizierten Leistungsdaten und Genauigkeiten eingehalten werden.

**Mikrowellen-Landesystem, MLS**

Das im VHF/UHF arbeitende ILS-System wird zukünftig durch das Microwave Landing System (MLS) ergänzt. Das MLS-System besitzt aufgrund des höheren Frequenzbereiches eine höhere Präzision und ist weitgehend immun gegenüber Interferenzen und Signalreflektionen.

Aufgrund der höheren Genauigkeit kann die Staffelung von Flugzeugen und die Landefrequenz erhöht werden, was zu besserer Platznutzung und zu geringerem Treibstoffverbrauch führt.

MLS läßt zudem Anflugprozeduren zu, die mit ILS nur schwer oder gar nicht anwendbar sind, beispielsweise die sogenannten ‚curved approaches', also ein nicht gradliniger Anflug.

Eine typische MLS-Installation umfaßt jeweils eine Azimut- und Elevationsstation, funktional vergleichbar mit dem Landekurs- und dem Gleitwegsender der ILS. Hier endet allerdings der Vergleich.

Im Gegensatz zur ILS, bei der Kurs und Gleitweg durch das Antennendiagramm und den analogen Modulationsgrad bzw. der Differenz zweier Modulationsgrade bestimmt wird, erzeugt das MLS in Landerichtung eine Information, aus der der Bordempfänger seine Lage in der Anflugebene bestimmen kann.

Technisch gesehen ist das MLS eher mit einem Radargerät verwandt. Azimut und Elevationsstation erzeugen jeweils einen scharf gebündelten Strahl im Frequenzbereich von 5GHz, der in Azimutrichtung um ±40° und in der Elevation zwischen 0,9° und 15° geschwenkt wird. Der Schwenkvorgang wird selbstverständlich elektronisch mit Hilfe einer phased-array-Antenne erzeugt und durch den Computer am Boden kontrolliert.

Die Konfiguration von Azimut und Elevationssender kann durch eine sogenannte Backazimut-Station ergänzt werden, es erlaubt ‚missed approach'-Prozeduren, d.h. Landeabbruch, zu fliegen.

Die Azimut- und die optionale Backazimut-Station stehen wie bei ILS jeweils 300m von den Enden der Landebahn fluchtend zu deren Mitte. Die Elevationsstation wiederum ist seitlich versetzt zur Schwelle aufgestellt.

Die Aussendungen aller Stationen erfolgen auf der selben Frequenz im Zeitmultiplex. Neben den für die ‚scanning beams' reservierten Zeitschlitzen sind weitere Zeitschlitze zur Datenübertragung, beispielsweise für Meteo-Daten reserviert.

Auch die scanning beams sind moduliert, um eine eindeutige Zuordnung zu gewährleisten. Ein kompletter Scan-Zyklus dauert 12 msec, wobei der Strahl in dieser Zeit im abzutastenden Bereich hin- und wieder zurückläuft. Aus Sicht des Bordempfängers ergibt sich dadurch ein Pulspaar mit variablem Pulsabstand. Durch Vermessen des Pulsabstandes und Integration über einen Beobachtungszeitraum kann der Bordempfänger nun seine Lage bzw. den Winkel zur MLS-Station exakt vermessen.

Der Abstand wird in der Regel durch ein am gleichen Standort betriebenes DME/P bestimmt. So hat das Bordsystem exakte Kenntnis über seine aktuelle Position und Kurs und kann beide Werte permanent kontrollieren ohne wie bei ILS auf eine vorgegebene Geometrie festgelegt zu sein. Vom geraden Anflug abweichende Prozeduren können somit unter vollständiger Kontrolle des Bordsystems geflogen werden.

Das MLS-System ist vergleichweise neu. Kommerzielle Installationen gibt es derzeit in München, Amsterdam-Schiphol (Niederlande) und London-Stanstate (UK).

## GPS-basierende Landesysteme

In der Streckennavigation wird das satellitengestützte Global Positioning System bereits häufig eingesetzt. Hier ist die garantierte Genauigkeit von ±250 m in der Regel völlig ausreichend.

Nicht-militärische Anwendungen nutzen in der Regel die Aussendungen im frei zugänglichen C/A-Code im Standard Positioning Service, SPS, während militärische Anwender auch den P- bzw. Y-Code nutzen.

Für die Nutzung im Luftverkehr problematisch ist die nicht immer vorhersagbare Verfügbarkeit des Satellitensystems, bei dem die Genauigkeit stark von äußeren, durch den Nutzer nicht beeinflußbarer Faktoren wie Satellitenkonstellation oder Mehrwege-Ausbreitung abhängt.

Dies schließt bis dato die Nutzung von GPS in echten Landesystemen höherer Kategorien aus.

Neuere Entwicklungen für GPS-basierende Landesysteme gehen deshalb von hybriden Systemen aus, die neben den Satelliten auch bodengestützte Sender, sogenannte ‚Pseudo-Satelliten' (Pseudolites) nutzen.

Pseudolites senden dabei genau wie ihre ‚echten' Gegenstücke im Orbit GPS-kompatible Signale aus, die von einem Bordempfänger ausgewertet und zur dreidimensionalen Ortsbestimmung herangezogen werden können.

Dabei verbessern die am Boden befindlichen Sender die anderweitig sehr ungünstige Geometrie, so daß nun eine verläßliche Höheninformation an Bord des Flugzeuges gewonnen werden kann, auf deren Basis eine Kategorie-III-Landung sicher und präzise möglich wird.

GPS-basierende Landesysteme befinden sich derzeit noch im Standardisierungs- und Entwicklungsstadium und werden kommerziell noch nicht eingesetzt.

## Rollfeld-Führungssysteme

Ein weiterer für die kommerzielle Luftfahrt sehr interessanter Bereich sind die auf Radionavigation basierenden sogenannten Rollfeld-Führungssysteme. Diese dienen dazu, Flugzeuge zwischen dem Gate und der Start- und Landebahn zu überwachen und zu leiten. Geschieht dies heute durch Bodenüberwachungs-Radar oder durch Beobachtung, so gehen moderne Systeme dazu über, die Flugzeuge durch Empfang des bordeigenen Transponders zu identifizieren und zu orten.

Zu diesem Zweck werden entsprechende Abfrageempfänger am Platz installiert und vernetzt. Über das Hyperbelschnittverfahren wird dann die genaue automatische Ortung des rollenden Verkehrs ermöglicht.