

KRIEG IM AETHER

Vorlesungen an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich
im Wintersemester 1976/1977

Leitung: Abteilung für Übermittlungstruppen, Divisionär A. Guisolan

Radar- und Richtfunkantennen

Referent: Prof. (FHS) P.Pauli, Dipl. Ing.

5-1

RADAR- UND RICHTFUNKANTENNEN

Prof. (FHS) P. Pauli

Einleitung

Wie die Bedeutung des Wortes R A D A R - Radio Detection and Ranging - andeutet, wird mit dieser Technik die Lage von Objekten nach Richtung und Entfernung mittels eines elektromagnetischen Echoverfahrens bestimmt.

Zusätzlich zu den Ortsangaben über ein Ziel sind Angaben über dessen Relativgeschwindigkeit gegenüber dem Ort der Radaranlage oder, bei drehenden Objekten, über deren Rotationsgeschwindigkeit erwünscht. An die RADARANTENNEN werden daher ganz bestimmte Forderungen nach Antennengewinn, Nebenzipfeldämpfung, extrem schmaler oder besonders geformter Richtcharakteristik gestellt.

RICHTFUNKANTENNEN mit der Aufgabe, Nachrichten über weite Strecken abzustrahlen oder zu empfangen, werden ebenfalls mit ganz bestimmten Eigenschaften, die häufig denen der Radarantennen sehr ähnlich sind, geplant und konstruiert.

Welche Aufgaben haben Radarantennen?

Zur Durchführung der Objektortung müssen elektromagnetische Wellen in eine bestimmte Raumrichtung ausgesandt und dann die Echosignale wieder aufgefangen werden (Abb.1).

Durch Messung der Signallaufzeit t kann die Entfernung R , durch eventuelle Frequenzverschiebungen durch den Dopplereffekt die Relativ- oder Rotationsgeschwindigkeit und durch die Winkelstellung der Antenne die Richtung des Messobjektes ermittelt werden.

Je nach Verwendungszweck der Radaranlage werden an Sende- und Empfangsgeräte aber auch an die Radarantenne unterschiedliche Anforderungen gestellt, die in der jeweiligen Ausführungsform der Antenne erkennbar werden.

"Krieg im Aether", Folge XVI

5-2

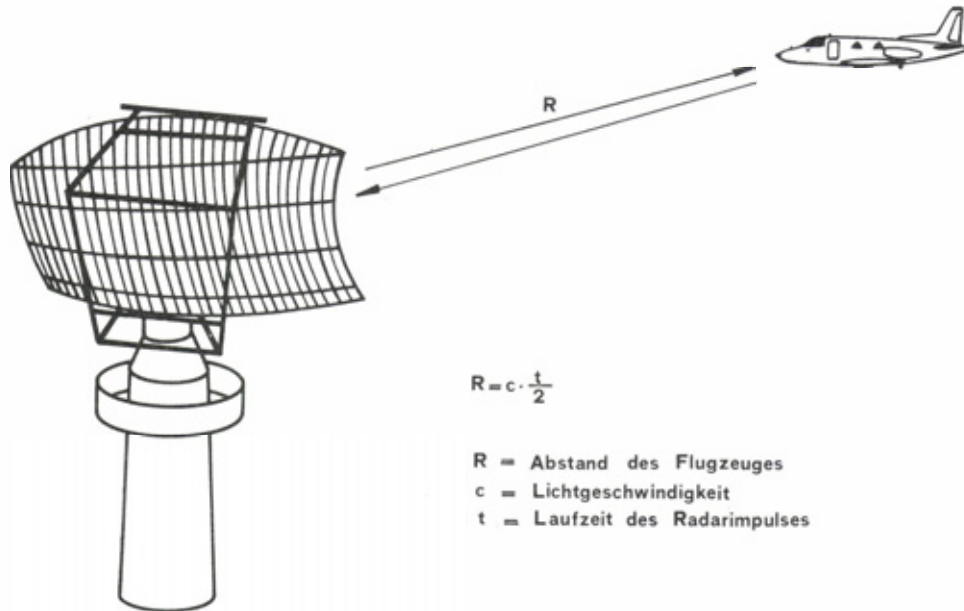


Abb.1 Prinzip der Objektortung mit Radar

Anwendungsgebiete der Radartechnik

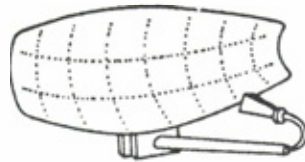
Ortungs- bzw. Messaufgaben mit Hilfe der Radartechnik werden auf den unterschiedlichsten Gebieten durchgeführt (Abb.2):

2a



- Als Rundstrahlradar im Luftverkehr ASR (Airport Surveillance Radar) zur Sicherung des Luftverkehrs in der näheren Umgebung der Flughäfen. Zielerfassung zweidimensional, Reichweite ca. 100 km.

2b



- Als Rundstrahlradar im Luftverkehr ARSR (Air Route Surveillance Radar) oder GRS (Grossrundstrahlradar) zur Sicherung und Überwachung der Flugrouten, Zielerfassung zweidimensional, Reichweite ca. 200 - 400 km.

2c



- Als Präzisionsanflugradar (PAR) zur Ermittlung genauer Positionsangaben von Flugzeugen, die die Landebahn eines Flughafens anfliegen. Zielerfassung dreidimensional, Reichweite ca. 4 - 40 km.

2d



- Als Flugzeugradar (AR = Airborne Radar), eingebaut in Flugzeugen zur Ermittlung von Hindernissen, von der Geschwindigkeit oder als Höhenmessradar. Reichweite ca. 20 km.

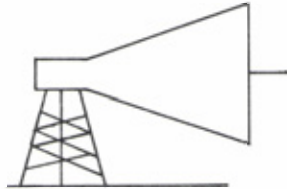
5 - 3

2 e



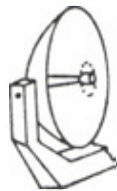
- Im Schiffsverkehr zur Ueberwachung der Wasserwege, auf Schiffen zur Verhinderung von Kollisionen und zur Navigation.

2 f



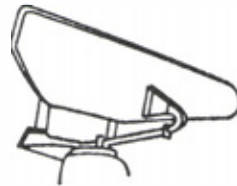
- Im Strassen- und Schienenverkehr zur Messung von Fahrzeuggeschwindigkeiten und zur Identifikation von Fahrzeugtypen.

2 g



- Im Rahmen militärischer Aufgaben zur Luftraumbeobachtung sowie als Zielverfolgungs- und Feuerleitradar.

2 h



- Weitere Anwendungsgebiete:
Im Wetterdienst

Abb.2

Arten von Richtfunkverbindungen

Richtfunkverbindungen können auf unterschiedliche Art hergestellt werden:

Eine typische Richtfunkstrecke zeigt Abb.3 bei der sich die Antennen der einzelnen Relaisstationen auf "Sichtweite" gegenüberstehen.

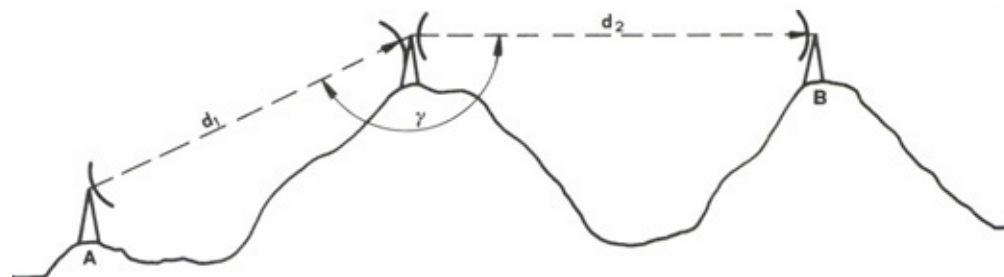


Abb.3 Prinzip einer Richtfunkstrecke

5-4

Kommerziell sehr stark genutzt sind inzwischen transozeanische Satelliten-Richtfunkverbindungen, bei denen aufgrund der grossen Entfernungen und der damit verbundenen hohen Streckendämpfung Antennen mit besonders grossem Gewinn benötigt werden (Abb.4).

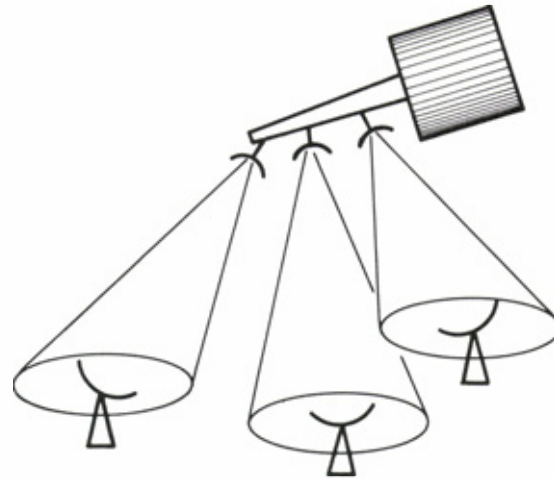


Abb.4 Satellitenfunk

Schliesslich gibt es noch einige andere praktikable Verfahren, wie die in Abb.5 dargestellte Forward Scatter Richtfunk-Verbindung, bei der Inhomogenitäten in der Troposphäre zur Streustrahlverbindung zwischen Sender und Empfänger über den Horizont hinweg ausgenutzt werden.

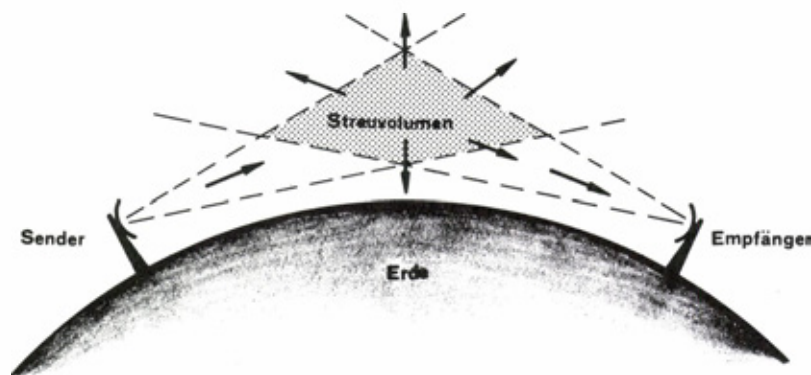


Abb.5 Forward Scatter Richtfunk

Hohlleiter

Die Grundforderung bei RADAR - hohe Messgenauigkeit und grosses Auflösungsvermögen und die Aufgabe der Richtfunkantennen - grosser Gewinn und damit auch scharfe Bündelung - machten die Anwendung höchstfrequenter elektromagnetischer Wellen notwendig.

Erst wenn Antennen- oder Antennenreflektorabmessungen l ein Mehrfaches der verwendeten Wellenlänge λ betragen, entstehen ausreichend schmale Keulen in der Richtcharakteristik.

5 - 5

Da die Antennengröße für viele Anwendungen (Flugzeug- oder Verkehrsradar usw.) bestimmte Abmessungen nicht überschreiten darf, musste man zu kürzeren Wellenlängen greifen, um die erforderlichen grossen l/λ - Verhältnisse zu erhalten.

Die Radartechnik brachte bei der Verwendung der kurzen cm-Wellen bei Frequenzen im Gigahertzbereich (cm-Bereich) sowohl bei den aktiven als auch bei den zugehörigen passiven Bauelementen eine neue Technik mit sich, die sogenannte HOHLEITERTECHNIK.

Bei höheren Frequenzen resp. kürzeren Wellenlängen sind die Verlustverhältnisse und die maximal übertragbare Leistung in Hohlleitern günstiger als in Koaxialkabeln (s. Abb.6). Allerdings zeigen Hohlleiter ein Hochpassverhalten, d.h. erst oberhalb einer Mindestfrequenz, der sogenannten "kritischen" Frequenz, wird die Energie als Welle fortgeleitet.

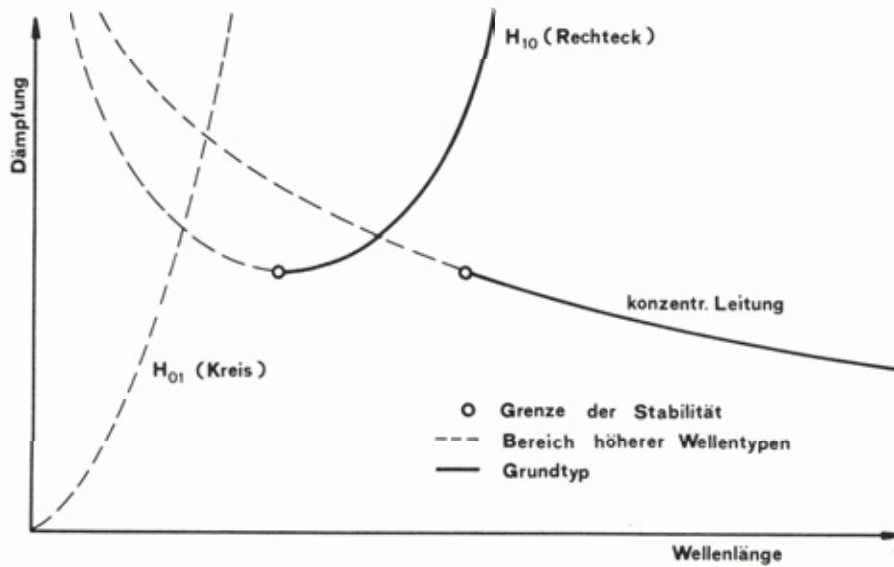


Abb.6 Dämpfungsverhältnisse für Hohlleiter und konzentrische Leitung

Bei dieser Energieübertragung sind in der jeweiligen Hohlleiterbauform viele Wellentypen möglich. Wirkungsvolle Energiefortleitung erfordert einen eindeutigen Wellentyp - in der Regel wird derjenige mit der niedrigsten Grenzfrequenz ausgenutzt - oder es sind Wellentypfilter erforderlich, die nur den gewünschten Typ bevorzugen (Abb.7).

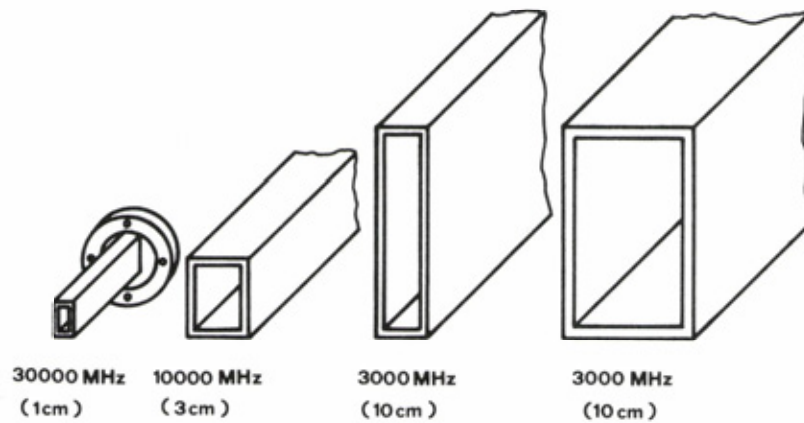


Abb.7 Hohlleiterbauformen

5 - 6

Hornstrahler

Um die Energie aus einer Hohlleiteröffnung wirkungsvoll abstrahlen zu können, ist, wie bei anderen Strahlertypen auch, für die Impedanzverhältnisse innerhalb und ausserhalb des Hohlleiters möglichst gute Anpassung herzustellen (Abb.8).

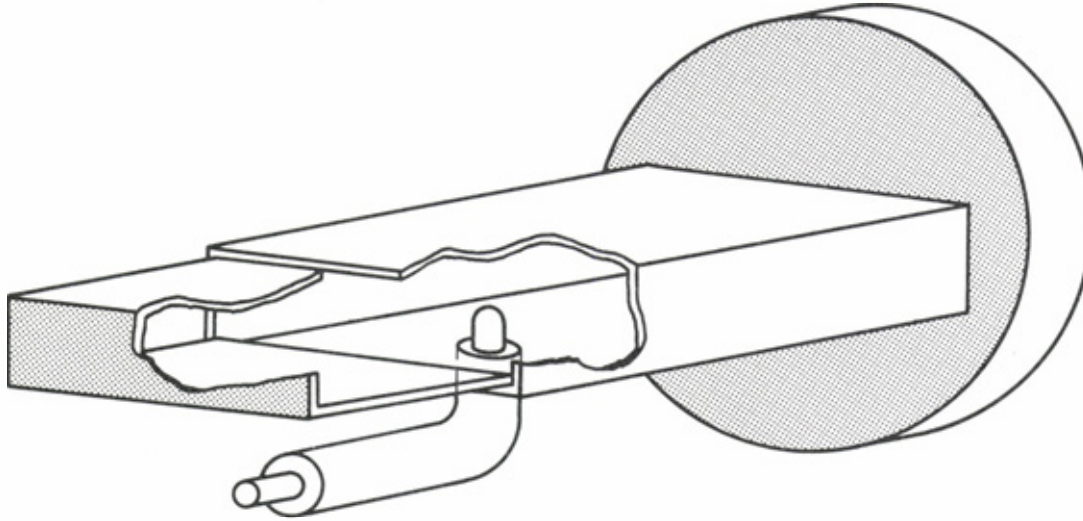


Abb.8 Energieeinspeisung in den Hohlleiter

Der stetige Uebergang vom Hohlleiterquerschnitt und dessen Feldwellenwiderstand durch die trichterförmige Oeffnung des HORNSTRAHLERS auf den Feldwellenwiderstand des freien Raumes ermöglicht eine reflexionsfreie und gerichtete Abstrahlung der Sendeenergie (Abb.9).

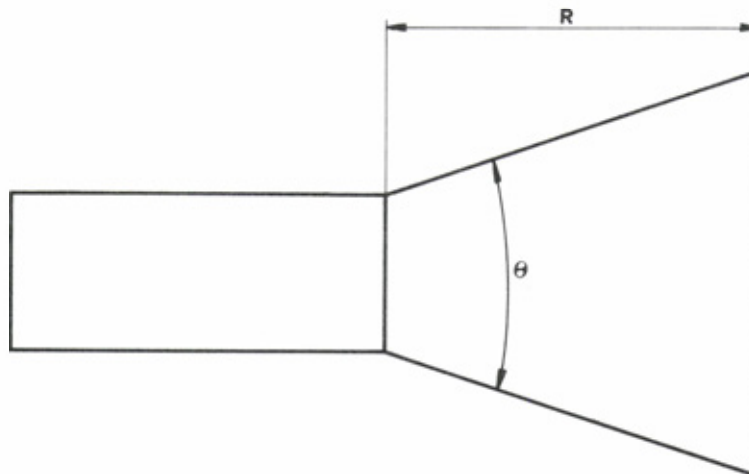


Abb.9 Abstrahlung aus dem Hohlleiter mit Hornstrahler

5-7

Wie stark die erzeugte Richtcharakteristik von dem Parameter R (Länge des Hornstrahlers, ausgedrückt in Wellenlängen λ) und vom Öffnungswinkel θ abhängt, zeigt untenstehende Abb.10. Man erkennt, dass es für die Länge R des Hornstrahlers und für seinen Öffnungswinkel θ optimale Werte gibt, die für die Dimensionierung beachtet werden müssen.

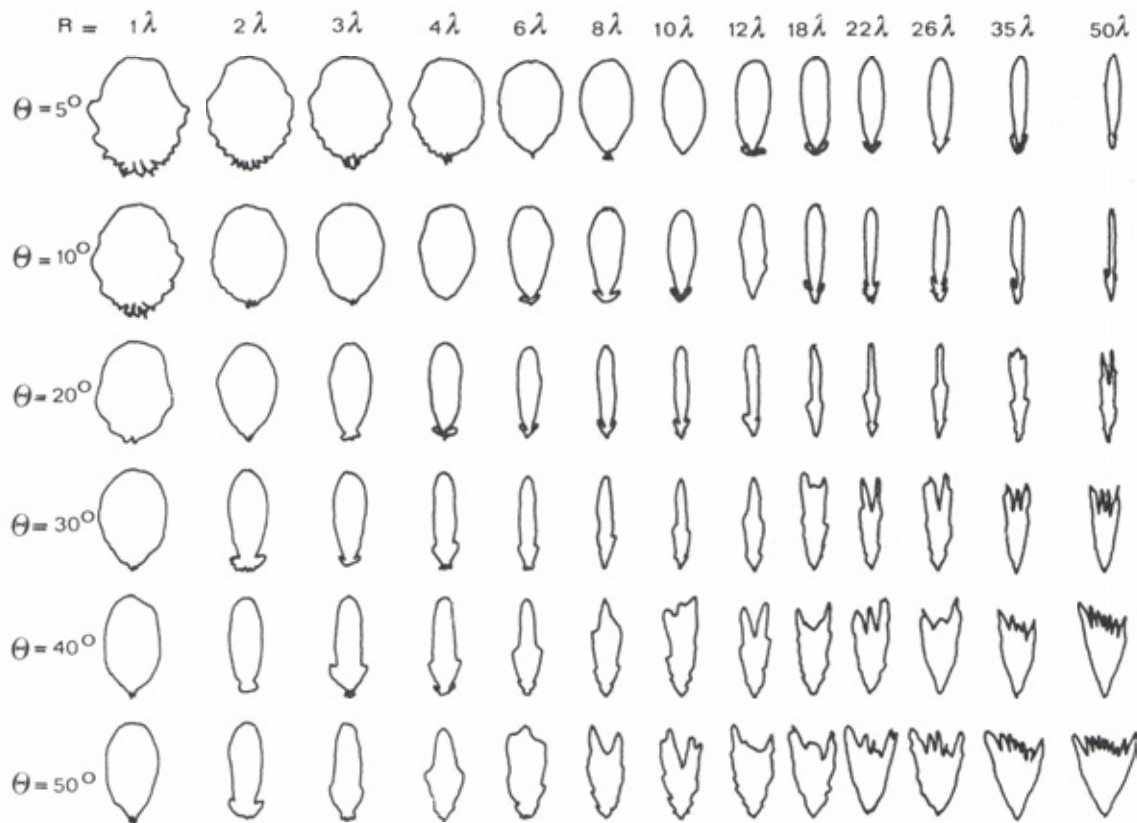


Abb.10 Richtcharakteristiken von Hornstrahlern als Funktion von θ und R

Primärstrahler

Das "Antennengebilde", das den Uebertritt der elektromagnetischen Welle aus der Leitung in den freien Raum ermöglicht, wird als PRIMAERSTRAHLER bezeichnet. Die einfachste Form ist der bereits erläuterte Hornstrahler. Für unterschiedliche Polarisations- und Richtwirkungen sind aber auch verschiedenartige Ausführungsformen möglich (Abb. 11, 12).

5 - 8

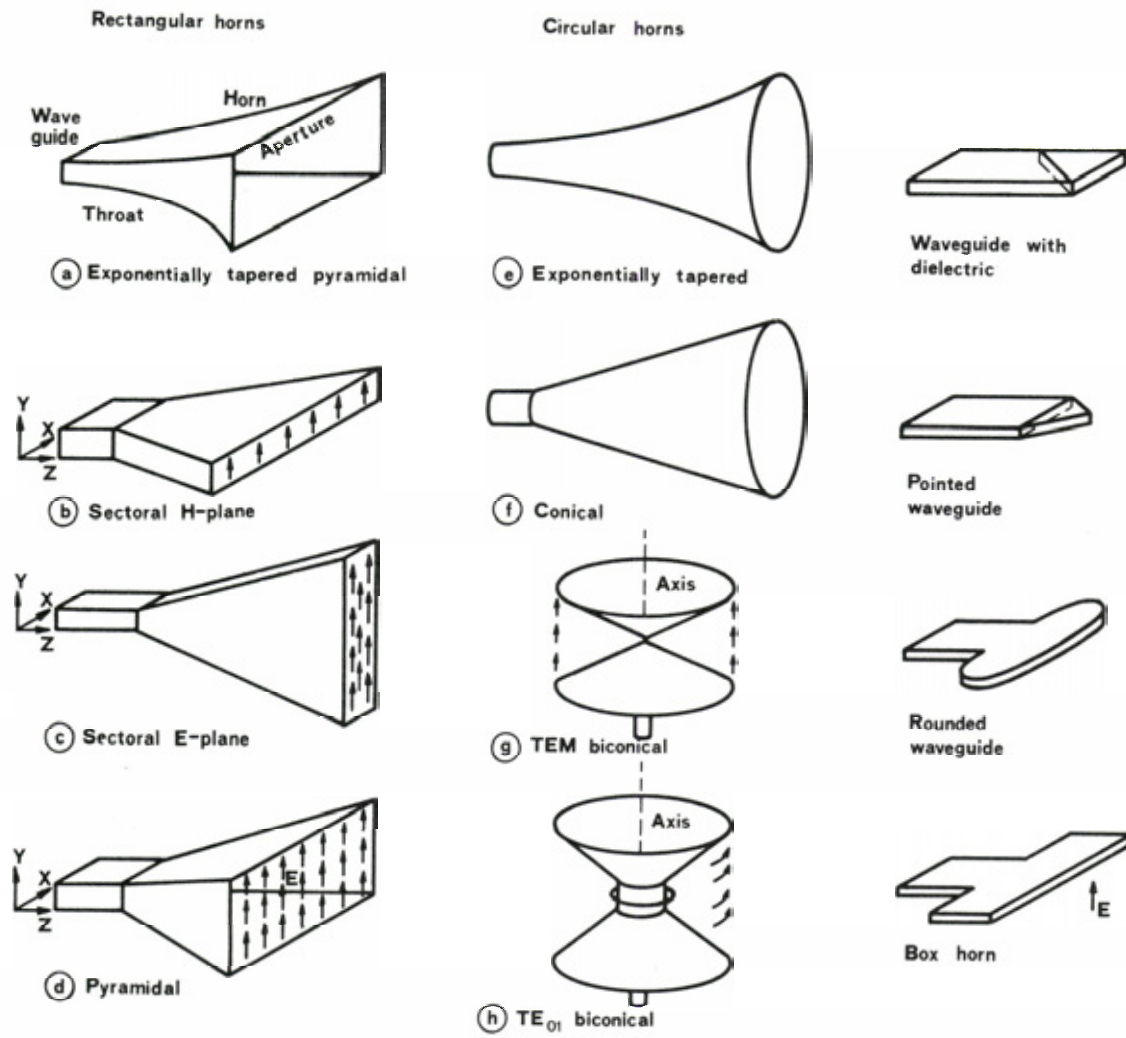


Abb.11 Unterschiedliche Formen von Primärstrahlern

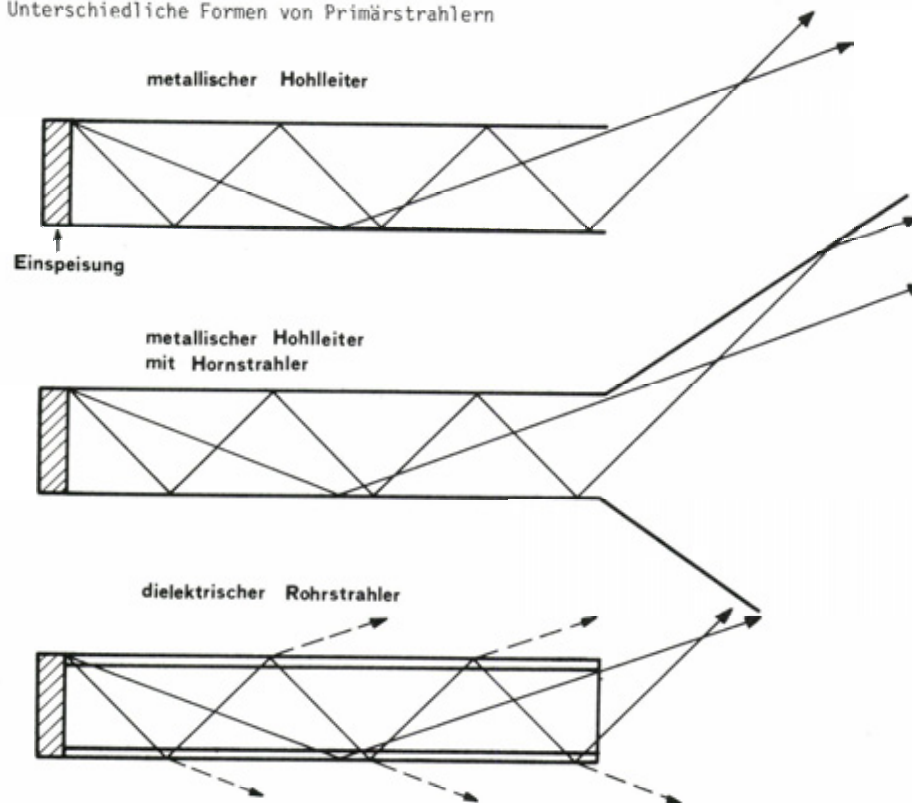


Abb.12

Sekundärstrahler

Zur Verbesserung des Antennengewinnes und der Richtwirkung werden zusammen mit dem Primärstrahler noch Reflektoren oder Linsen zur Bündelung der Strahlen verwendet. Während der direkt mit der Speiseleitung verbundene Erreger-Strahler als Primärstrahler bezeichnet wird, tragen Reflektoren und Linsen die Bezeichnung Sekundärstrahler.

Da bei der Radartechnik das Auflösungsvermögen für Elevations- und Azimutposition im wesentlichen von einer schmalen Halbwertsbreite der Antennenhauptkeule abhängt, wird grösste Sorgfalt darauf verwendet, die vom Primärstrahler ausgesendete Energie möglichst vollständig durch Spiegel oder Linsen zu erfassen und zu bündeln.

Mit der schon anfangs getroffenen Forderung, dass die Antennenöffnungen gross gegenüber der Wellenlänge sein sollen, können näherungsweise für den "Strahlengang" der Wellen die Gesetze der geometrischen Optik angewandt werden. So sind aus den nachfolgenden Abbildungen die Anordnung von Primär- und Sekundärstrahler sowie der Strahlengang der Radarwellen erkennbar (s. Abb.13, 14, 15).

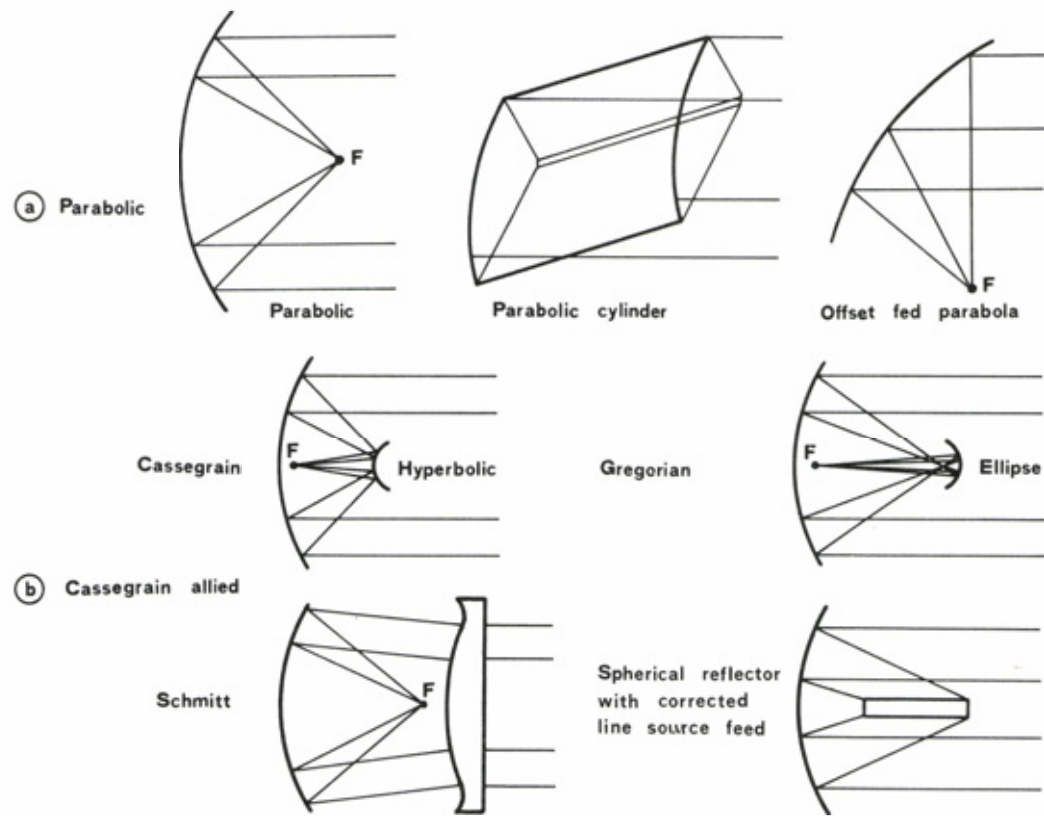


Abb.13 Reflektoren: Parabolisch (a), und Cassegrain et al. (b)

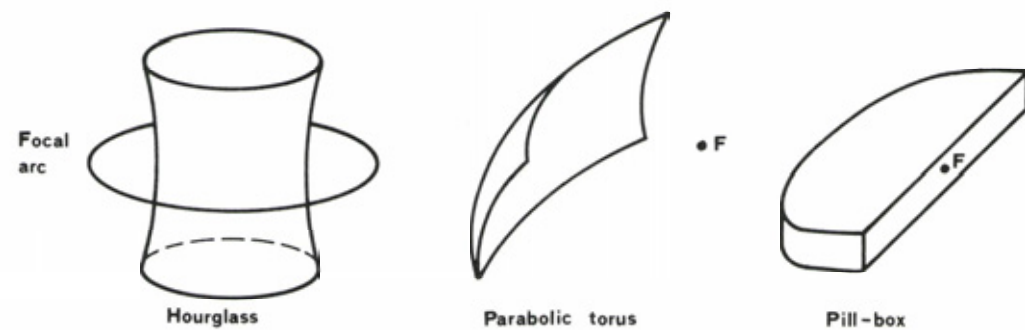


Abb.14 Reflektoren

5-10

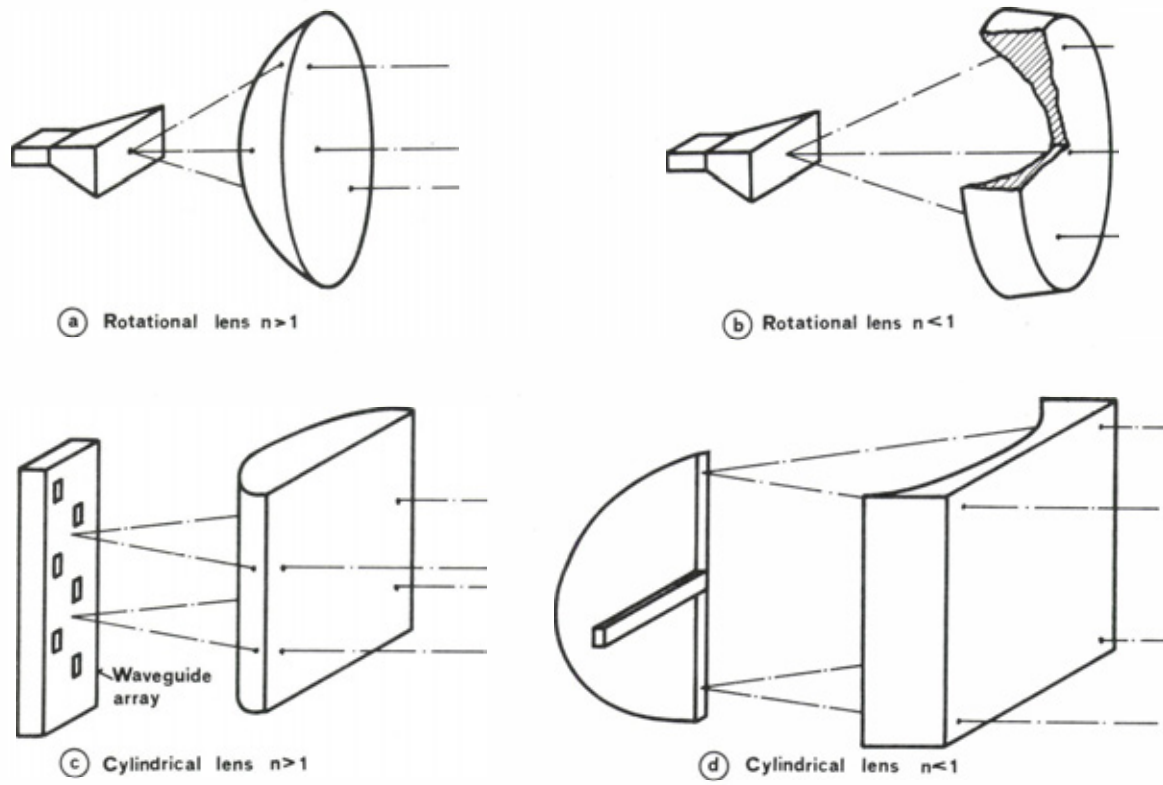


Abb.15 Linsen als Sekundärstrahler

Richtcharakteristik

Die Richtcharakteristik einer Radarantenne wird graphisch auf zwei Arten dargestellt:

- In Polarkoordinaten: Die in die jeweilige Raumrichtung abgestrahlte Leistung wird, relativ in dB auf die Hauptstrahlungsrichtung bezogen, aufgetragen (Abb.16).

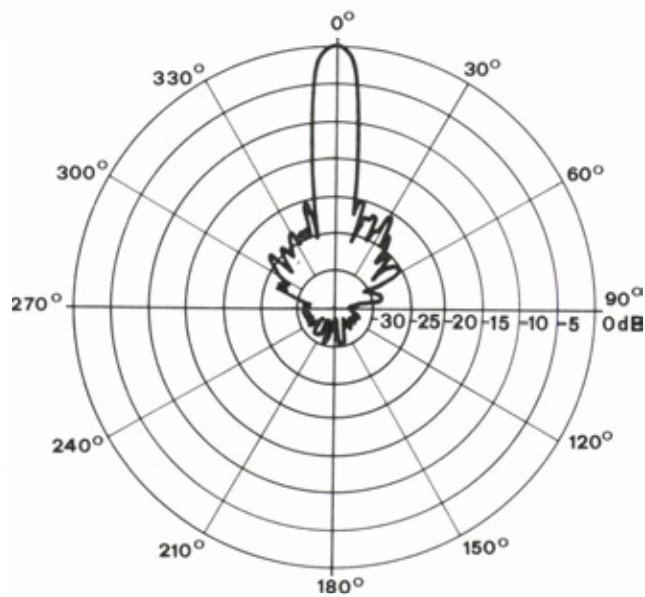


Abb.16 Darstellung der Antennencharakteristik in Polarkoordinaten

- In linearisierter Form lässt sich die Strahlungsverteilung ebenso darstellen (Abb.17)

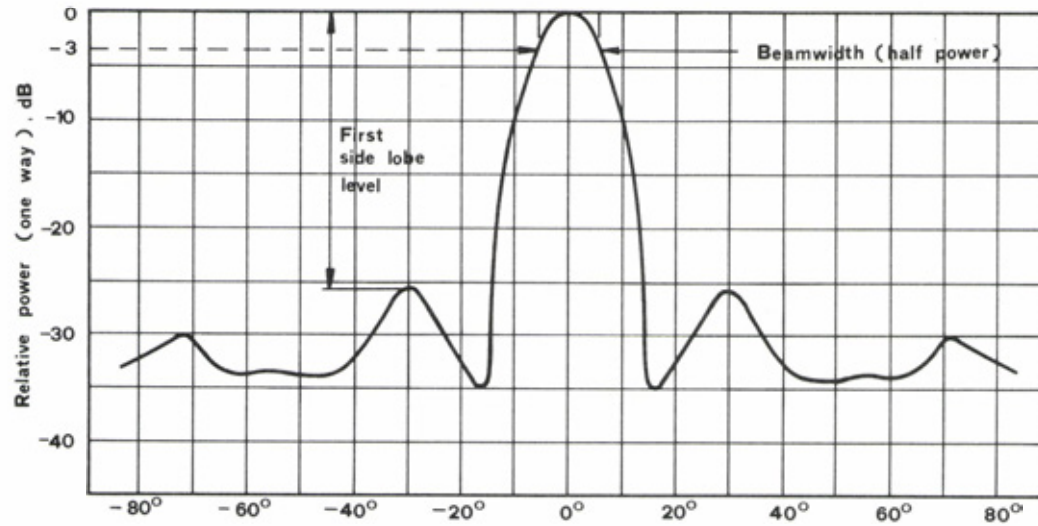


Abb.17 Linearisierte Richtcharakteristik

Die dB-Angaben beziehen sich auf den Pegel, der in Hauptstrahlrichtung abgestrahlt wird. Aus der "Breite" der Hauptkeule kann man sofort Rückschlüsse auf das voraussichtliche Auflösungsvermögen der Radarantenne, aber auch auf den Gewinn der Richtfunkantenne ziehen.

Wichtige Werte sind die Halbwertsbreite (= 3dB-Abfall der Strahlungsleistung gegenüber dem Maximum) und die 10 % - Breite (= 10 dB).

Radarantennen

Nachdem nun allgemein die Möglichkeiten zur Erzeugung von gebündelter elektromagnetischer Strahlung bekannt sind, müssen für die einzelnen speziellen Anwendungsgebiete Optimierungen der Antenneneigenschaften und damit meist Modifizierungen der Antennenbauform für den jeweiligen Verwendungszweck vorgenommen werden.

Rundsichtradarantennen

Wie der Name bereits besagt, muss die Richtcharakteristik dieser Antennenart rundherum drehbar sein, damit der ganze Horizont um 360° abgetastet werden kann.

Die "einfachste" Lösung ist die drehbare Radarantenne (Abb.19), bei der Primär- und Sekundärstrahler auf einen Drehtisch mit bestimmter Winkelgeschwindigkeit rotieren. Dabei muss die jeweils vorliegende Winkellage durch einen Winkelwertgeber (z.B. Drehmelder oder digitalisiertes Signal) an das Radarsichtgerät übermittelt werden.

Da die Erzeugung der Radarsendeenergie und die Verarbeitung des Empfangssignals stets im feststehenden Teil der Radaranlage erfolgen, muss die HF-Energie über eine DREHKUPPLUNG zur Antenne übertragen werden (Abb.18 und 19).

5 - 12

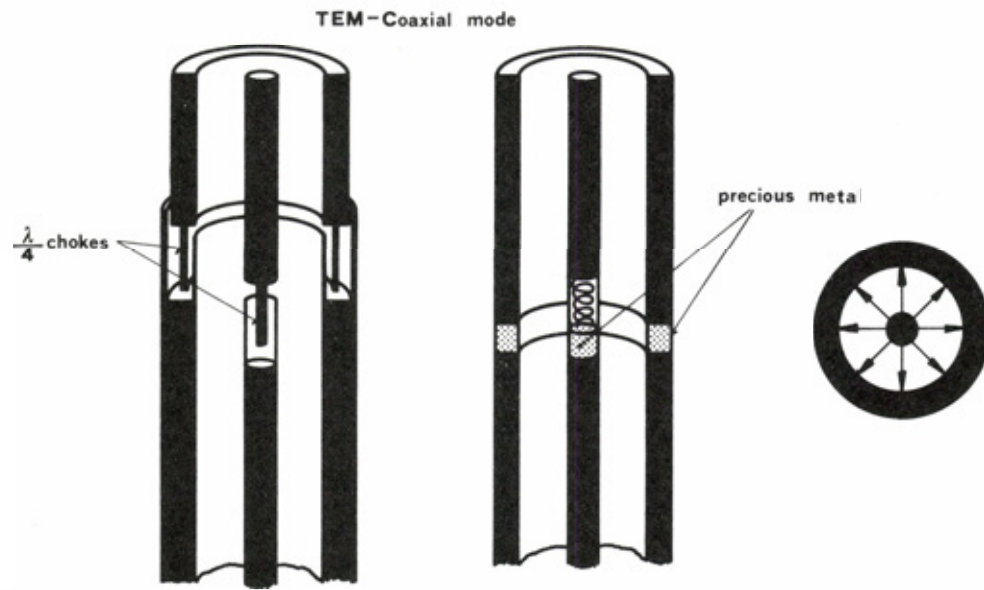


Abb.18 Drehkupplungen für Radarantennen

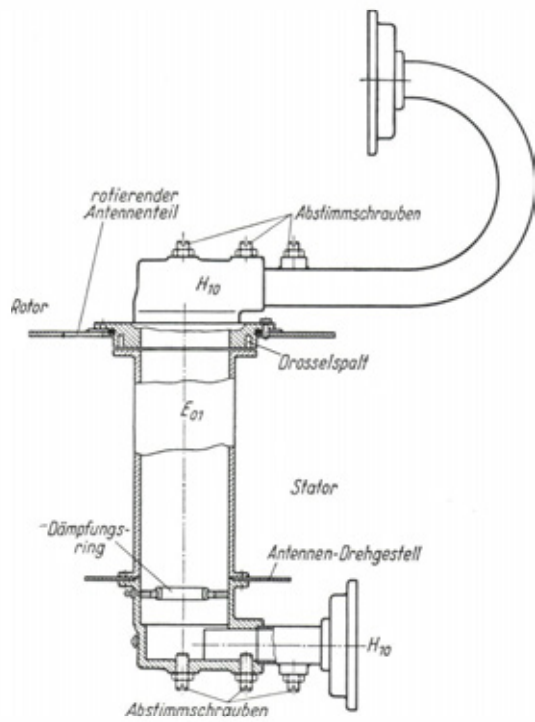


Abb.19 Aufbau der Drehkupplung mit Angabe der Wellenmoden

5 - 13

Dieses Bauteil ist für Koaxialleitungen, in denen die rotationssymmetrische TEM-Welle vorliegt, einfach ausführbar, da eine Verdrehung zweier Koaxialstücke gegeneinander keinen Einfluss auf die transportierte Welle hat.

Die überwiegende Anzahl der Radaranlagen arbeiten jedoch mit dem H_{10} -Wellentyp in Rechteckhohlleitern. Dieser Wellentyp besitzt eine lineare Polarisation und muss deshalb vor der Drehkupplung erst in den rotationssymmetrischen E_{01} -Typ im kreisförmigen Hohlleiter umgewandelt werden. Um mehrere Kanäle zugleich über eine Drehkupplung übertragen zu können, gibt es mehrkanalig Drehkupplungen, bei denen die innerste Kopplung im Rundhohlleiter erfolgen kann, die konzentrisch aussenliegenden Uebergänge jedoch koaxial ausgeführt sind.

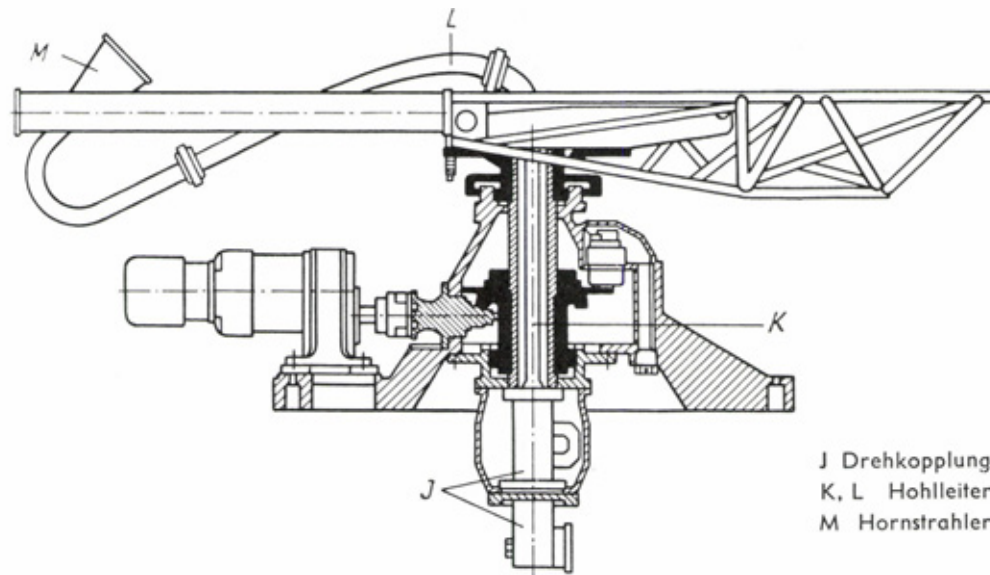


Abb.20 Schnitt durch das Antennendrehgestell der ASR-3-Anlage

Auf dem rotierenden Drehgestell der ASR-3-Anlage (Abb.20) sind Hornstrahler und Parabolreflektor montiert. Mit 4...20 Umdrehungen pro Minute wird die Umgebung abgesucht (Abb.21).

Reichweite, gefordertes Auflösungsvermögen und die Anforderungen an den Elevationswinkel bestimmen die Ausführungsform. Zwei verschiedene Typen von Radarantennen stehen zur Verfügung:

- ASR im Flughafenbereich (bis 100 km)
- ARSR zur Flugroutenüberwachung (200...400 km)

Diese Radarantennen zur zweidimensionalen Ortung von Flugzeugen müssen folgende Eigenschaften besitzen:

- Grosser Antennengewinn, und damit grosse Antennenfläche
- Schmales Richtdiagramm, wegen der geforderten Auflösung für jede Azimuteinstellung. (Dabei ist zur Erfassung höher fliegender Objekte eine bestimmte vertikale Ausdehnung der Keule erwünscht.)

Diese Forderungen erfüllen Radarantennen mit Parabolausschnitt - Reflektoren.

5 - 14

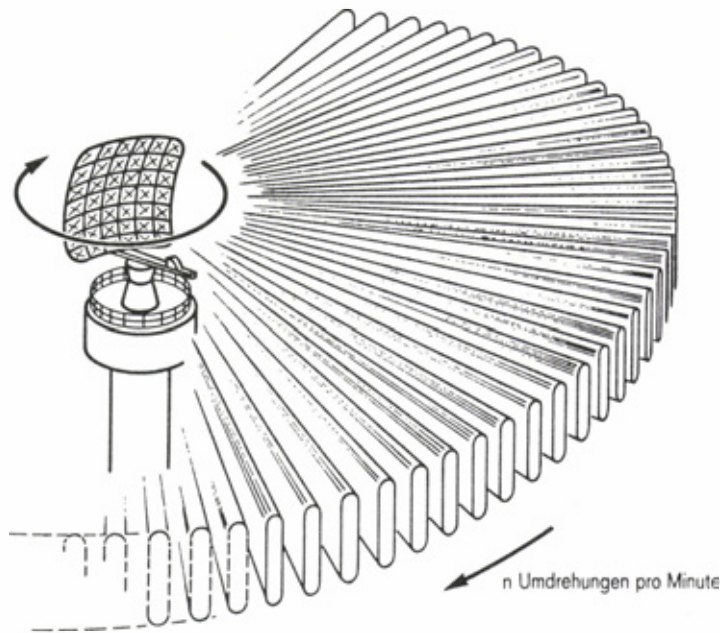
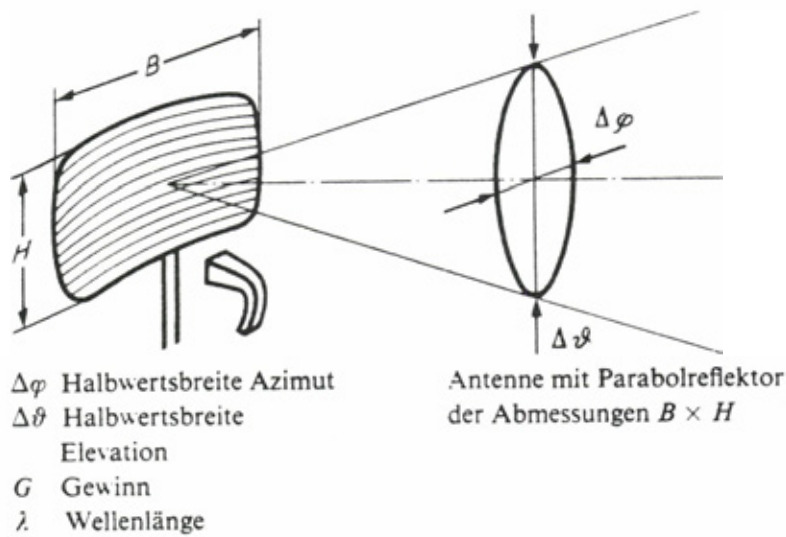


Abb.21 Rundsicht Radaranlage

Die voraussichtliche Halbwertsbreite einer Parabolreflektorantenne in Azimut- und in Elevationsrichtung, sowie deren Gewinn kann mit folgenden Formeln abgeschätzt werden (Abb.22):



$$\Delta\varphi \approx 70 \cdot \frac{\lambda}{B} \quad \Delta\theta \approx 70 \cdot \frac{\lambda}{H} \quad G \approx 6 \cdot \frac{B \cdot H}{\lambda^2}$$

Abb.22 Faustformeln für Antenne mit Parabolreflektor

5-15

Bei den heute verwendeten Radarantennen werden für die ASR-Anlage Halbwertsbreiten von 2° bei einer Antennendrehzahl von 16...24 U/min, 10 cm Wellenlänge und 1μ sec Sendeimpulsdauer erreicht. Die ARSR-Antenne mit Reichweiten von 200...400 km und einer Höhenabdeckung bis 24 km hat eine Bündelung von ca. 10° , Antennendrehzahl 4...8 U/min, Wellenlänge 23 cm und Impulsdauer 2...4 μ sec. Richtfunkparabolreflektorantennen werden mit ähnlich schmaler Bündelung konstruiert, damit der erforderliche Antennengewinn von normal 35...45 dB gesichert ist.

Die grossen Parabolreflektorbodenstationsantennen für Satelliten-Richtfunk mit Reflektordurchmessern von 25...32 m können für die Frequenzen 4...6 GHz Antennengewinne von 55...65 dB bringen.

Bei Radarantennenanlagen, die z.B. wegen der unterschiedlich grossen Entfernungen von Flugzeugen sehr unterschiedliche Echoleistungen zu erwarten haben, versucht man durch spezielle Dimensionierung der Abstrahlcharakteristik einigermaßen gleichstarke Echosignalamplituden von nahen und weiten Flugzeugen zu erhalten. Dies gelingt durch Erzeugung eines sogenannten cosec²-Diagramms, bei dem die abgestrahlte Leistung als Funktion des Höhenwinkels γ nach einer cosec² γ -Funktion abnimmt. Abb.23 zeigt den Zusammenhang zwischen Empfangsleistung, in Abhängigkeit des Höhenwinkels, links ohne Gegenmassnahmen, und rechts die erwünschte Richtcharakteristik, die gleichstarken Empfang für nahe und entfernt fliegende Flugzeuge bringen soll.

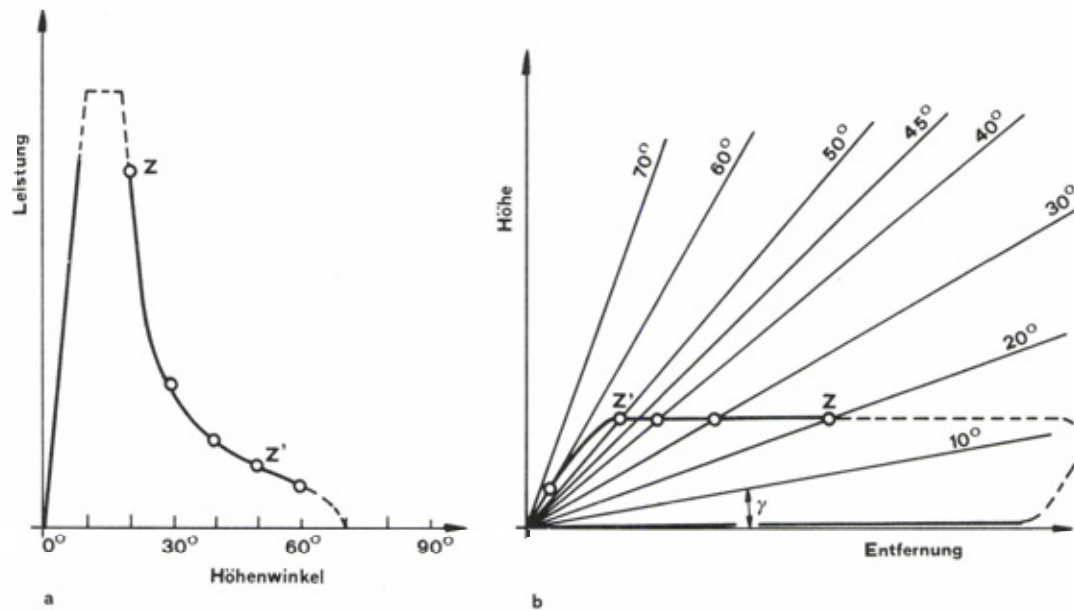


Abb.23 Richtcharakteristiken: ohne Gegenmassnahmen (links) und erwünscht (rechts)

Präzisionsanflugradar PAR

Die Ermittlung genauer dreidimensionaler Positionsangaben von Flugzeugen, die die Landebahn anfliegen, erfolgt mit zwei Antennen. Beide besitzen sehr schmale Diagramme, die durch eine Antennen-Nick-Bewegung in Horizontal- und Vertikal-Ebene geschwenkt werden (Abb.24, 25, 26). Die geforderte hohe Auflösung dieser relativ kleinen, schnell bewegten Antennen führt zur Anwendung der kurzen 3 cm Wellen. Es werden üblicherweise Raumsektoren von 7° Elevation und 20° Horizontalschwenkbereich erfasst.

Die Geschwindigkeitsermittlung erfolgt genauso wie beim Verkehrsradar unter Ausnutzung des Dopplereffektes. Zur Entfernungsmessung muss der Träger frequenzmoduliert werden. Die Entfernung wird dabei aus der Phasendifferenz der Modulation der Sende- und Empfangs-Signale ermittelt.

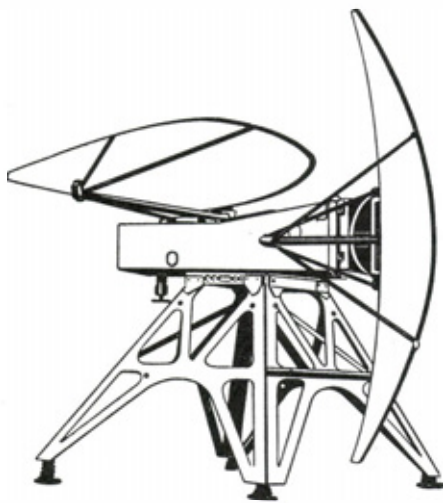


Abb.24 PAR-Antenne

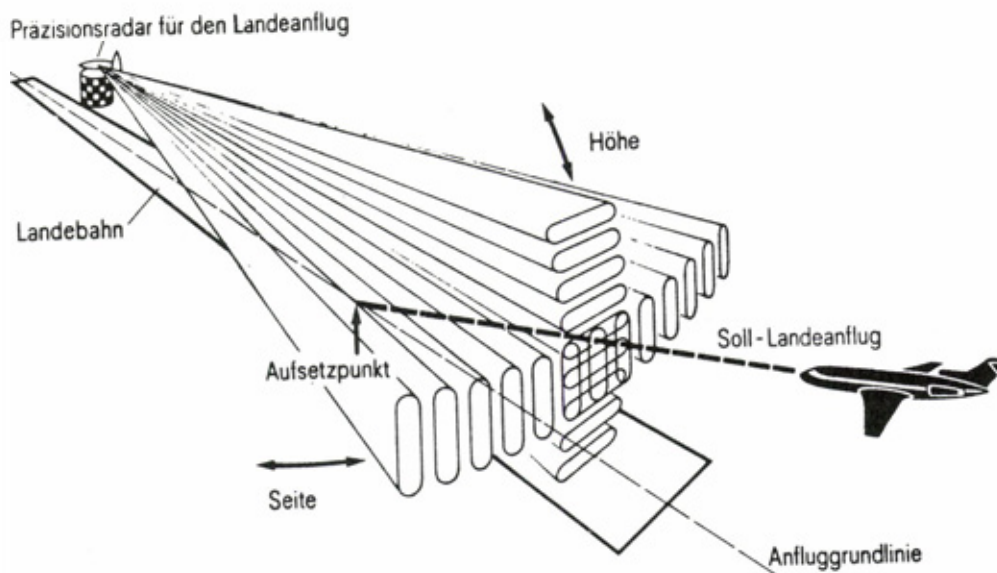


Abb.25 Uebersicht über das PAR-Anflugverfahren

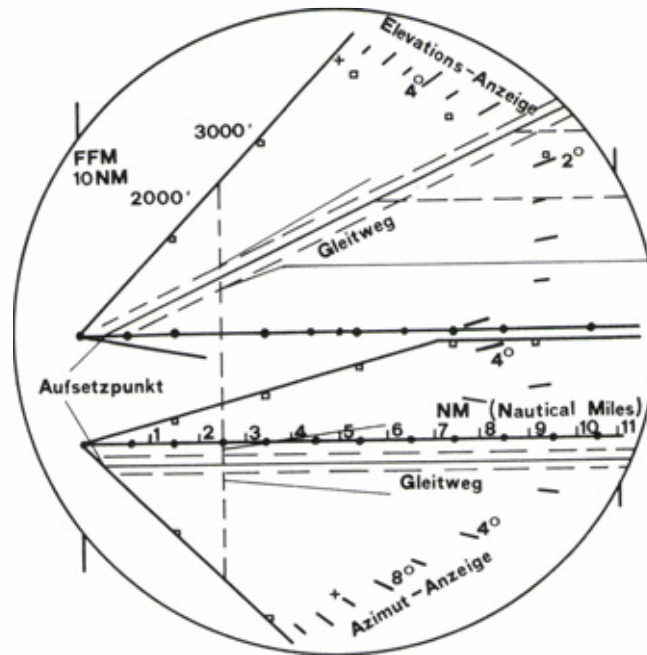


Abb.26 AZ-EL-Darstellung für das PAR-Verfahren

Die Elevationsantenne allein findet man in einer Spezialausführung als Höhenmessradaranlage. Mit einer 9 Meter breiten Antenne lassen sich Halbwertsbreiten von $0,75^\circ$ und ein Antennengewinn von 41 dB erzielen. Die Positionsanzeige geschieht bei PAR- und GCA-Anlagen üblicherweise für die vertikale und horizontale Position des Flugzeuges auf einem gemeinsamen Bildschirm.

Zielverfolgungsradar

Wenn ein ausgesuchtes Ziel laufend verfolgt werden soll, muss die Antenne automatisch nachgeführt werden. Zur Durchführung der Zielverfolgung muss die Antenne sowohl in Azimut- als auch in Elevationsrichtung bewegbar sein. Bei modernen Geräten wird die Antennennachführung durchwegs vollautomatisch über entsprechende, von der Radaranlage gesteuerte Servos ausgeführt.

Allerdings müssen antennenseitig Massnahmen ergriffen werden, die es gestatten, das "Weglaufen" des Zieles aus der Antennenachse zu registrieren. Hierzu sind zwei Möglichkeiten zu nennen:

- Das Monopulsverfahren
- Das Conical-Scan-Verfahren oder Kegelabtastverfahren

Beim Monopulsverfahren bildet man mit verschiedenen Antennen oder mit mehreren Primärstrahlern und einem Reflektor durch schaltungstechnische Addition ein Summendiagramm und durch Subtraktion ein Differenzdiagramm. Im Zustand der Summendiagrammschaltung wird die Entfernung und ev. die Radialgeschwindigkeit ermittelt. Mit Hilfe des Differenzdiagrammes wird die Seiten- und Höhenlage aus den bei den Einzelstrahlern unterschiedlich intensiv einfallenden Echosignalen ermittelt. Durch den Kunstgriff der Differenzdiagrammschaltung kann ein sehr scharf ausgeprägtes Zentralminimum zu sehr genauen Peilergebnissen führen.

Abb.27 zeigt den prinzipiellen Antennenaufbau, Abb.28 deren Charakteristik, während Abb.29 den Vierfachhornstrahler mit entsprechender Summen- und Differenzschaltung zeigt. Die mit H bezeichneten Bauteile sind Hybrid-T-Verzweigungen.

5-18

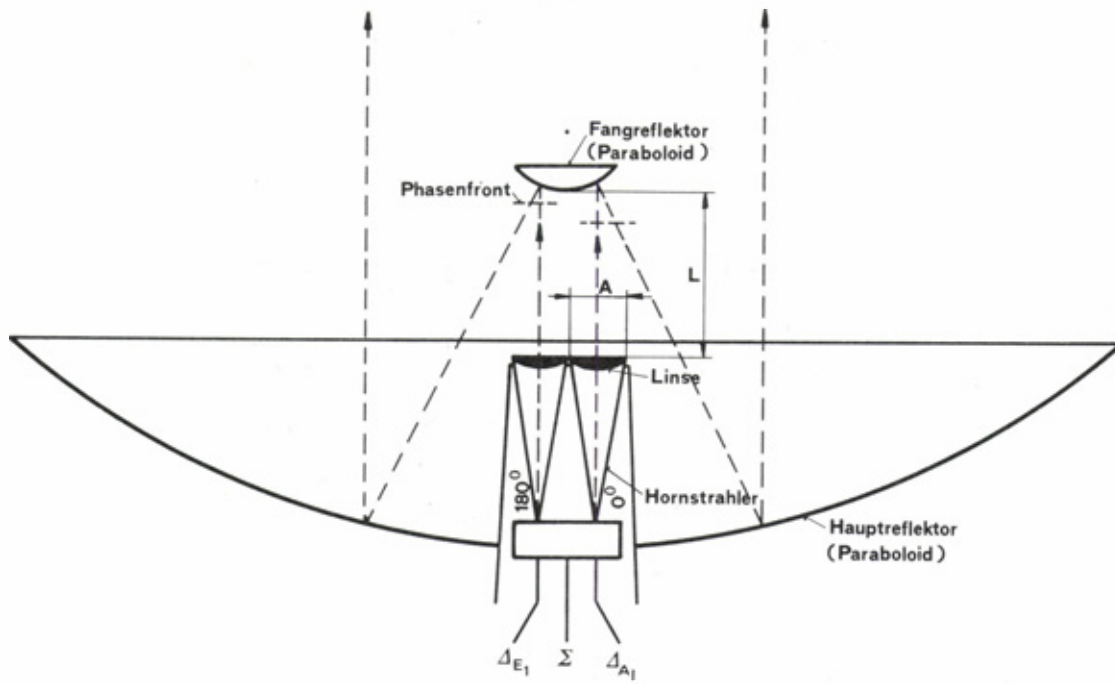


Abb.27 Aufbau der Radarantenne beim Monopulsverfahren

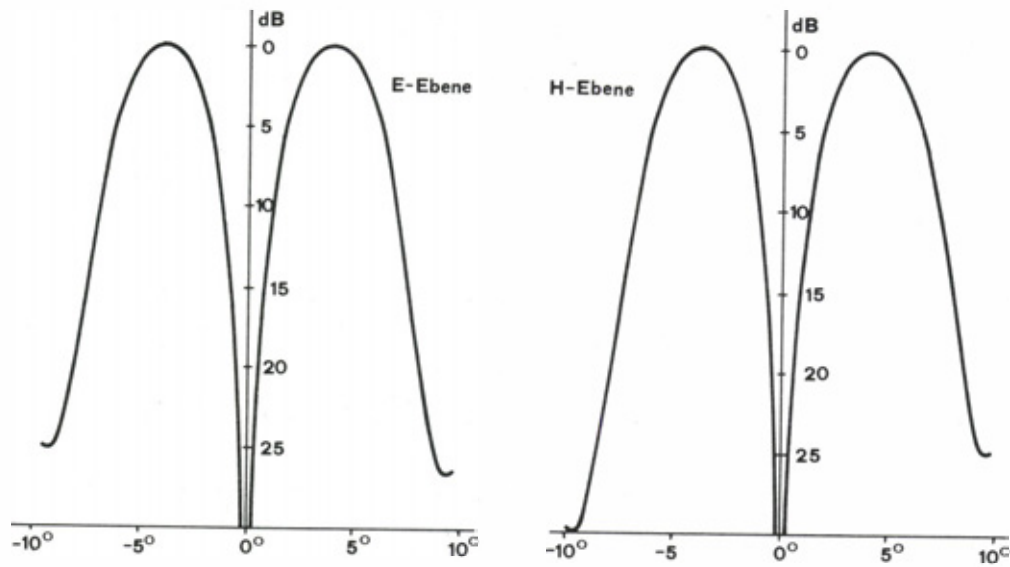


Abb.28 Antennencharakteristik

5 - 19

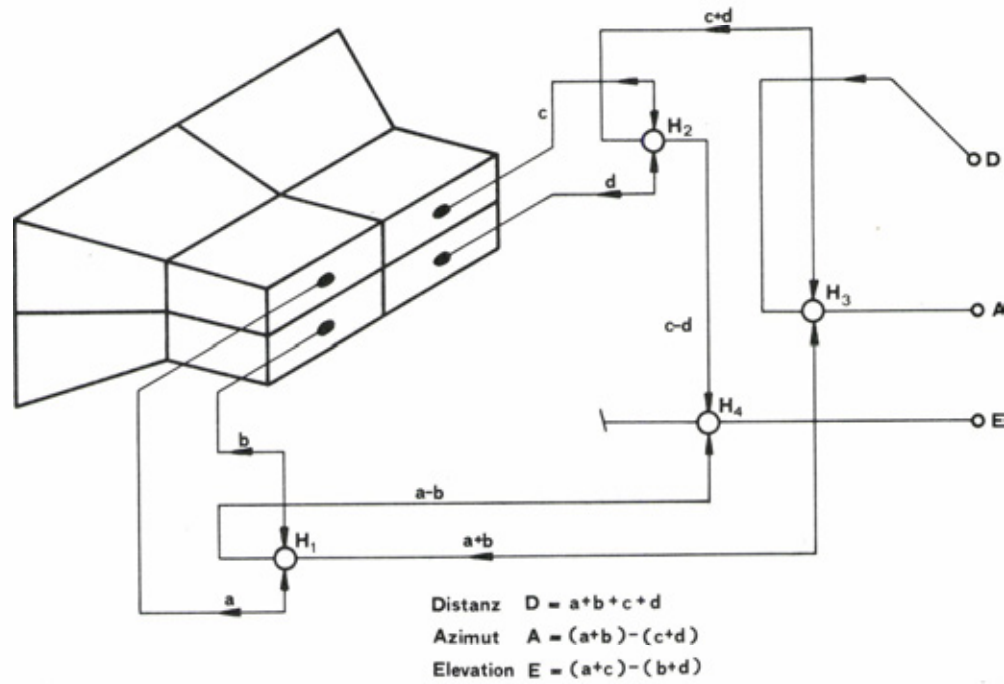


Abb.29 Vierfachhornstrahler für Zielverfolgungsradar mit Monopulsverfahren

Beim Conical-Scan-Verfahren (Kegelabtastverfahren) verwendet man eine Antenne (Abb.30), die so rotiert, dass sich ihre Strahlachse auf einem Kegelmantel bewegt. Ein von der Symmetrieachse abliegendes Ziel erscheint beim CW-Echosignal als Amplitudenmodulation. Der Modulationsgrad ist ein Mass für die Abweichung, und die Phasenlage der Modulationsfrequenz enthält die Information über die Richtung, in der das angepeilte Objekt von der Achse ausweicht.

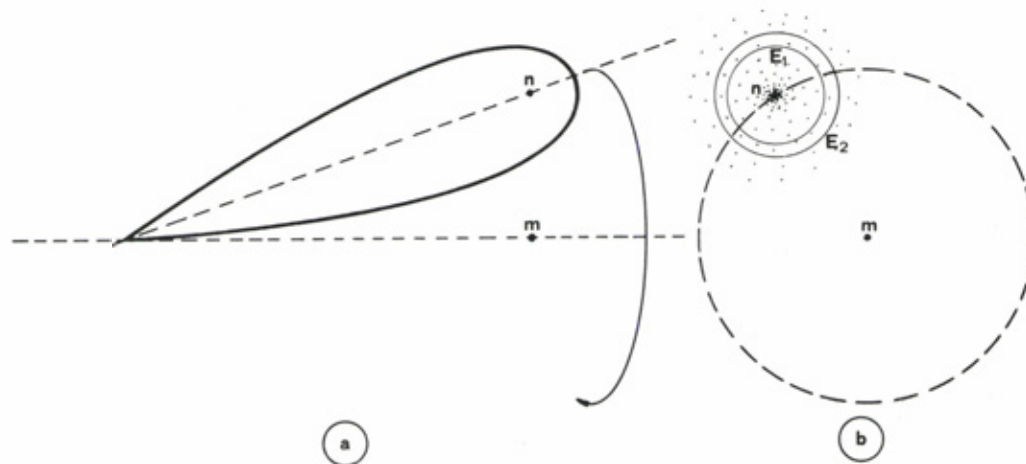


Abb.30 Zielverfolgungsradar mit Conical-Scan-Verfahren

Flugzeugradarantennen

Die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Radarantennen in modernen Flugzeugen sind in den letzten Jahren extrem gestiegen. Zusammen mit der Entwicklung von rechnergesteuerten Ziel- und Abschusseinrichtungen, deren Daten sehr schnell verarbeitet und ausgegeben werden können, entstand der Bedarf nach einer Antenne, die genauso schnell ihren Strahl schwenken kann, die ihre Richtcharakteristik von schmal auf breit verändern kann, die sogar unter Umständen mehrere Ziele gleichzeitig erfassen und verfolgen kann. Untenstehende Abb.31 zeigt eine Zusammenfassung von möglichen Aufgaben einer Flugzeugradarantenne.

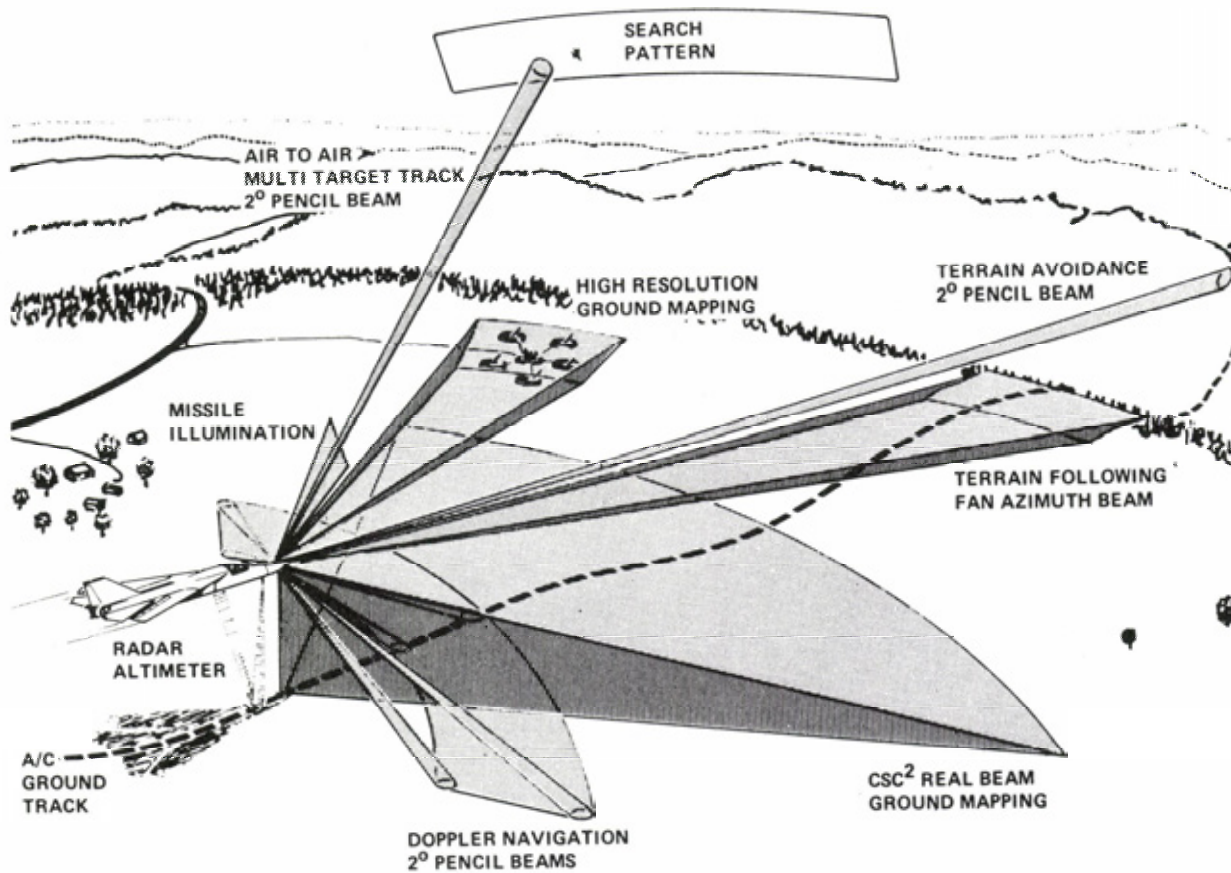


Abb.31 Aufgaben einer Flugzeugradarantenne

Die Lösung dieser komplexen Aufgabe ist erst durch die Entwicklung der phasengesteuerten Antennengruppen möglich geworden. Doch zunächst noch zu den "konventionellen" Flugzeugradarantennen.

Zum Einbau in Flugzeugen mussten auch bei den bisher verwendeten Antennen einige Modifikationen vorgenommen werden. Die Forderung nach geringem Gewicht führte zur Konstruktion von Parabolantennen mit Reflektoren aus Glasfaserepoxydschalen mit Metallauflage oder mit eingearbeitetem Drahtgeflecht. Da die Einbaumasse oft beschränkt sind, musste man zu besonderen Massnahmen greifen, um den notwendigen Schwenkbereich der Antennencharakteristik zu erhalten. Wird z.B. vom Flugzeug aus neben der Luftraumabtastung auch noch eine Bodenabtastung vorgenommen, so muss die Richtcharakteristik der Antenne sehr stark nach unten geneigt werden; dies hätte wieder einige aufwendige konstruktive Massnahmen in der gesamten Antennenhalterung zur Folge.

5-21

Als einfachere Lösungsmöglichkeit erwies es sich, einfach einen Teil aus dem Parabolspiegel heraus vorzuneigen, um eine weiter nach unten gerichtete Charakteristik zu erhalten.

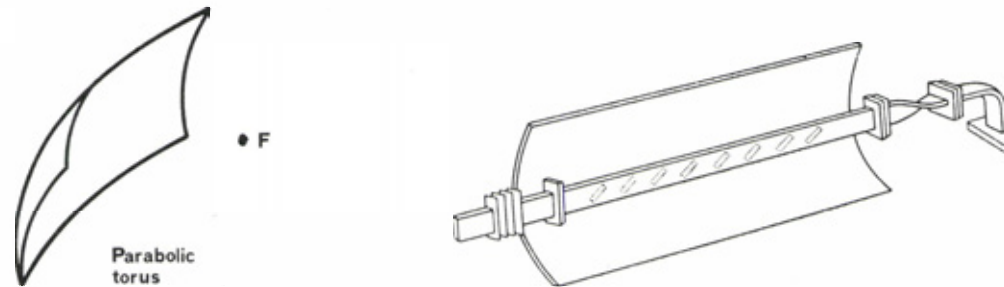


Abb. 32

Am Flugzeug seitlich oder unten angebrachte Radarantennen zur Höhenmessung oder zur seitlichen Radar Sondierung - die evtl. sogar mit schwenkbarem Diagramm vorgenommen werden sollte - durften überhaupt keinen nennenswerten Platz in Anspruch nehmen. Hier kamen die Eigenschaften des Schlitzastrahlers als Phased Array - Antenne zur Hilfe (Abb.33).

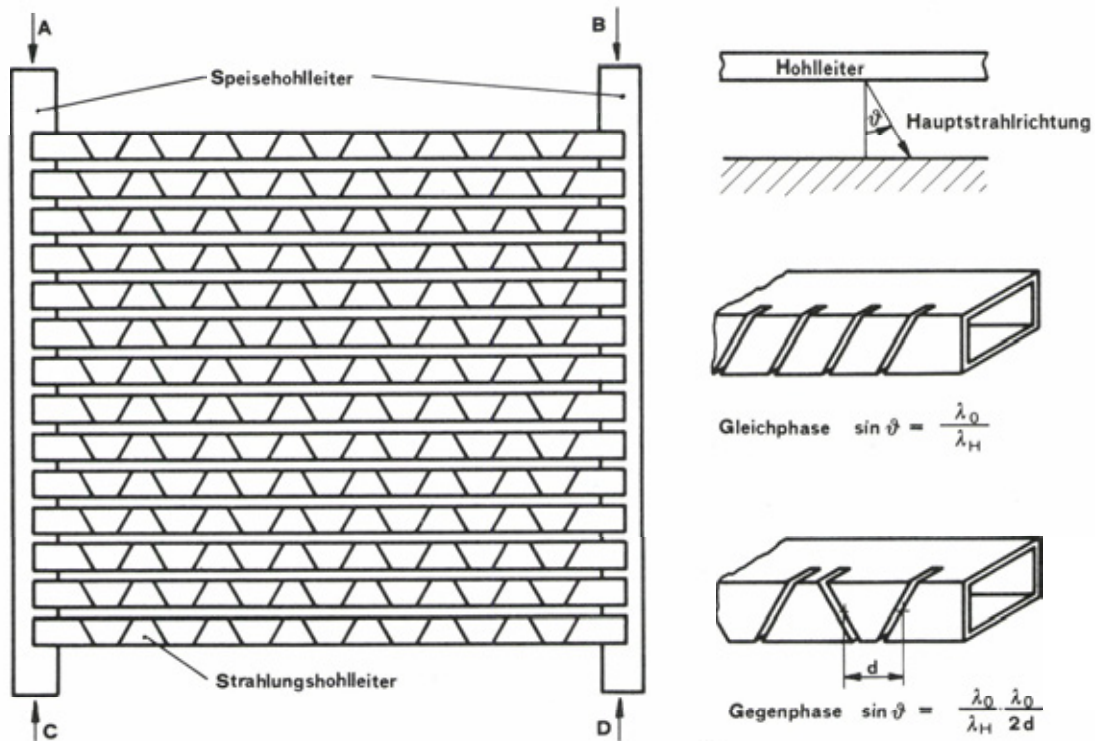


Abb.33 Hohlleiterschlitzastrahlantenne

Für eine Flugzeugnavigation kann man eine fortlaufende Geschwindigkeitsmessung durch Dopplersensoren vornehmen. Hierzu werden mindestens 3 scharf gebündelte Strahlkeulen zum Boden abgestrahlt (Abb.34).

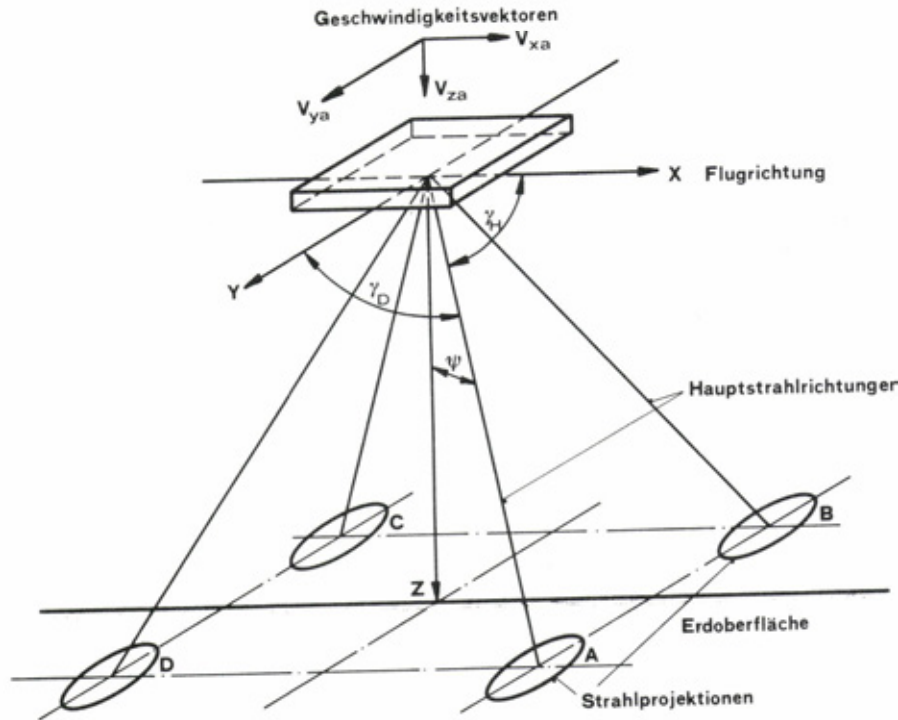


Abb.34 Strahlwinkel einer Dopplernavigationsantenne

Phased Array-Antennen

Werden in derartige Strahlgruppenanordnungen gezielt Phasenschieber eingeschaltet, so kann das Antennendiagramm elektronisch geschwenkt werden. Dies ist eine Forderung besonders von der militärischen Seite, wo möglichst kurze Schwenkzeiten des Antennendiagramms vor allem bei Zielverfolgung und Lenkflugkörpersteuerung verlangt werden. Eine mögliche Anordnung zeigt Abb.35, während in Abb.36 der Bereich der möglichen Auslenkung der Hauptkeule dargestellt ist.

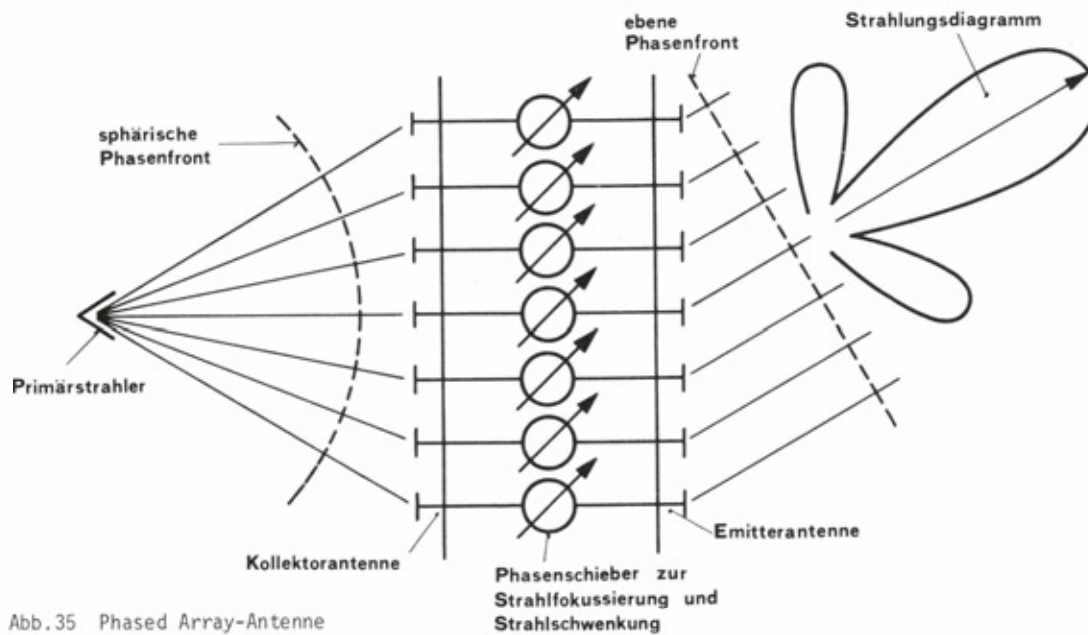


Abb. 35 Phased Array-Antenne

5 - 23

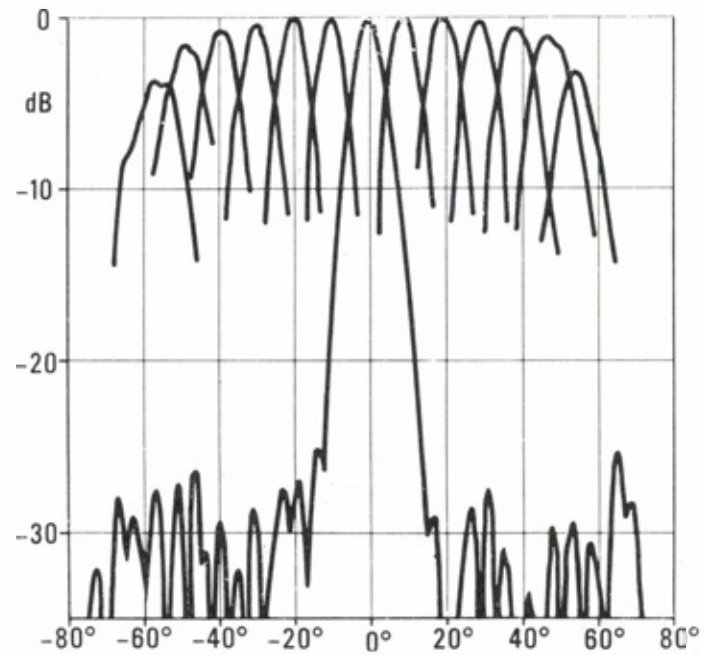


Abb.36

Da die Phasenschieber mit Hilfe von PIN-Dioden - und damit die Strahlschwenkung - elektronisch gesteuert werden können, ist eine verzögerungsfreie Antennendiagrammnachführung bei beliebig bewegtem Ziel möglich geworden.

Eine der bekanntesten Anlagen, die ESAR (Electronically Steerable Array Radar) der Fa. Bendix besitzt auf einer Fläche von 15 m x 15 m 8100 Antennen-Elemente, die für das L-Band (1-2 GHz) ausgelegt sind. Man erhält damit eine Halbwertsbreite des Strahles von $1,5^\circ \times 1,5^\circ$ bei einer Nebenzipfeldämpfung von 20 dB. Die Schwenkzeit beträgt für den Schwenkbereich von $\pm 45^\circ$ ca. 20 μs . Der Gewinn der Phased Array Antenne liegt bei 10 dB.

Mit dieser Antenne lassen sich noch Ziele in 600 km Entfernung auffassen.

Die AZ-1 Antenne in Abbildung 37 wird im C-Band, also mit Frequenzen um 5 GHz betrieben. Mit einer Halbwertsbreite von 1° in Azimutrichtung kann sie den Strahl um $\pm 60^\circ$ schwenken. Der Gewinn beträgt 32 dB bei einer Nebenzipfeldämpfung von ca. 25 dB.

5-24

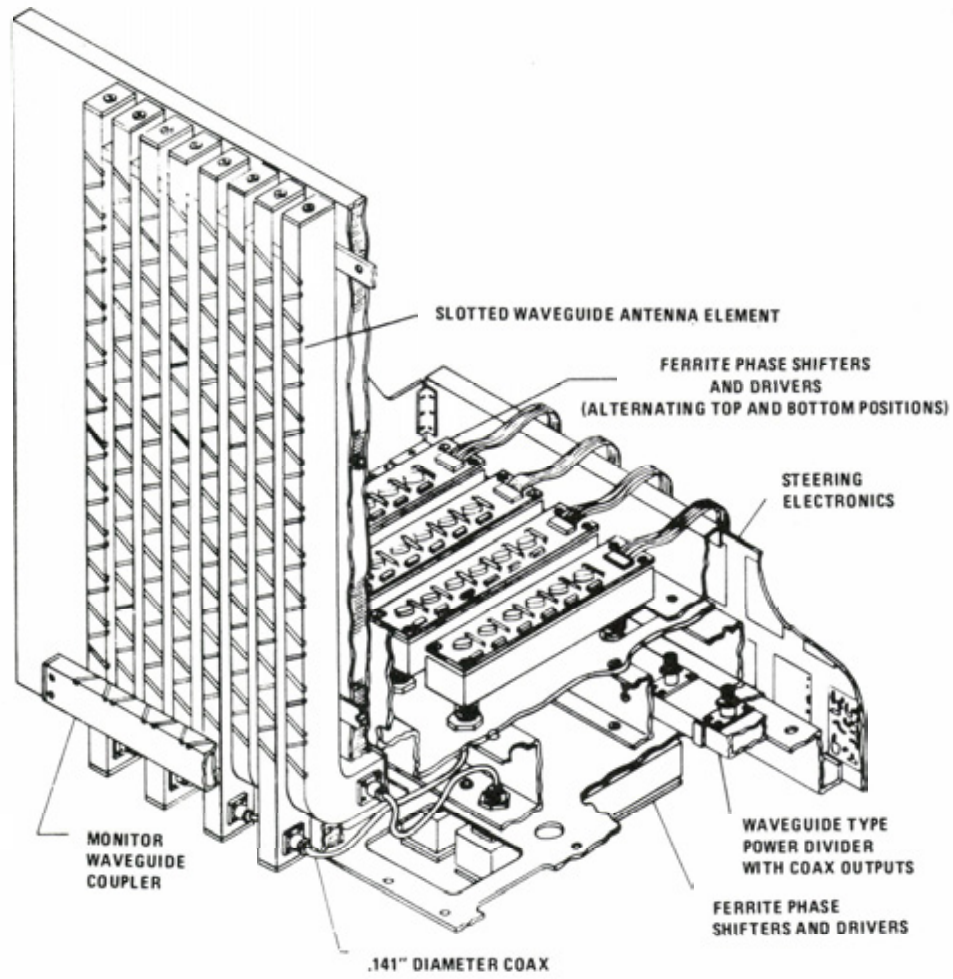


Abb.37 AZ-1 C-Band Primär-Array

5 - 25

Weitere Anwendungsgebiete für Radarantennen

Da inzwischen auch mit Halbleiterbauelementen sehr kleine und preiswerte Mikrowellensysteme gebaut werden können, haben sich einige weitere interessante Anwendungsgebiete der Höchstfrequenztechnik erschlossen. Insbesondere zur Ueberwachung und zum Schutz von Wertobjekten jeder Art lassen sich kleine Dopplerradargeräte vorteilhaft einsetzen (Abb.38).

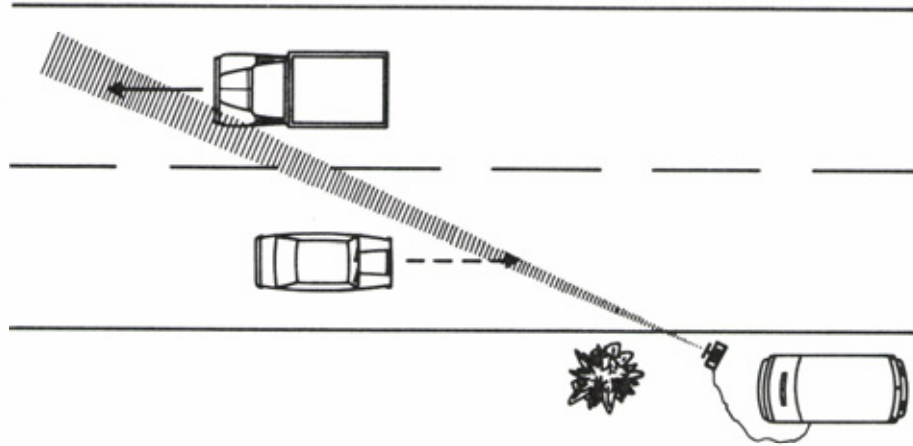


Abb.38 Anordnung einer CW-Radar-Verkehrsüberwachung

Interessant bei derartigen Anlagen ist die Tatsache, dass der zugleich als Mischer arbeitende Sender-Oszillator bereits in die Radarantenne integriert eingebaut werden kann (Abb. 40).

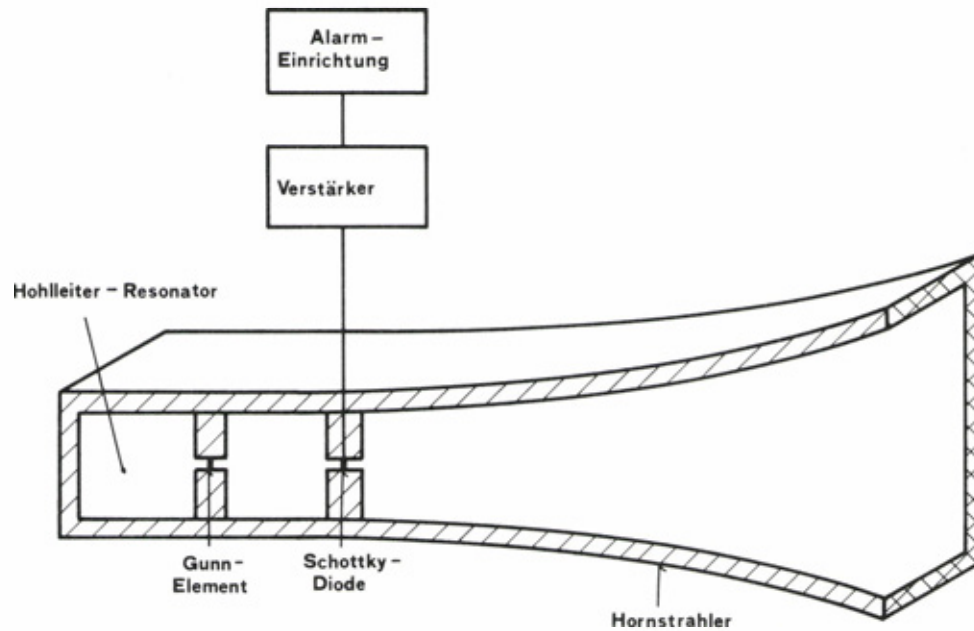


Abb.39 Aufbau einer Radar-Alarmeinrichtung

5 - 26

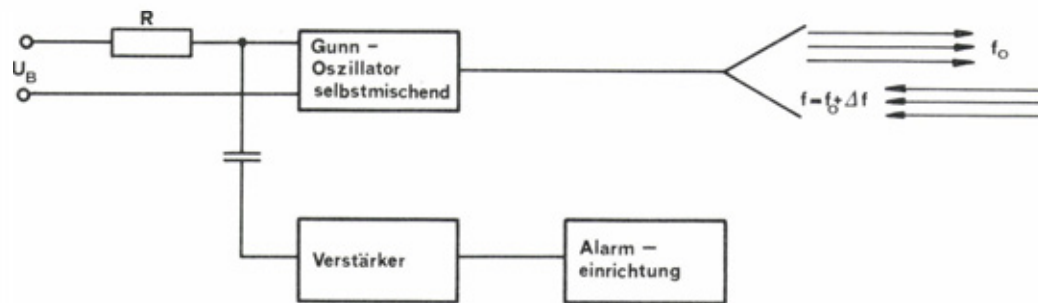


Abb.40 Schaltung der Alarmeinrichtung nach Abb.39

Verfeinerte Anlagen nach gleichem Prinzip sind sogar in der Lage, die Atembewegungen des Brustkorbes eines Krankenhauspatienten als Dopplerverschiebung wahrzunehmen, und bei Atemstillstand Alarm zu geben. Damit könnte gerade bei Intensivstationen dieses Gerät in der Medizin zur Zustandsüberwachung von Patienten Eingang finden. Mit einer ähnlichen Anlage können auch Drehzahlen von rotierenden Objekten gemessen werden.

Sekundärradar-Antennen

Unter Sekundärradar versteht man ein Ortungsverfahren, bei dem sich an Bord des zu ortenden Fahrzeuges ein aktives Antwortgerät (Transponder) befindet, das durch den Abfrageimpuls einer Radarstation (Interrogator) zu einer spezifischen Antwort angestossen wird (s. Abb.41, 42 auf folgender Seite). Dieses Verfahren, das im internationalen zivilen und militärischen Luftverkehr eingesetzt wird, liefert je nach Abfragemodus u.a. Auskunft über Flugnummer oder Flughöhe. Die Höheninformation wird z.B. durch automatische Ablesung des barometrischen Höhenmessers gewonnen.

Aus der Sekundärradarantenne, die in der Regel auf einer Rundstrahlradarantenne montiert ist, wird durch zwei Gruppen von je 22 logarithmisch-periodischen Dipol-Strahlern ein vertikal polarisierter Abfrageimpuls mit einer Frequenz von 1030 MHz gesendet. Der Antwortimpuls von 1090 MHz enthält die gewünschte Information, die nach Dekodierung auf dem Bildschirm des Radarsichtgerätes neben dem Bildpunkt des jeweiligen Flugzeuges sichtbar gemacht wird.

Da diese Sekundärradar-Antenne aus zwei spiegelbildlich gleichen Hälften besteht, kann bei entsprechender Schaltung Keulenverschärfung (Beam Sharpening), aber auch Monopulsbetrieb durchgeführt werden. Die einzelnen Antennen werden gleichphasig gespeist, sind aber amplitudenmässig nach einer Tschebyscheff-Funktion belegt. Dadurch sind Nebenkeulendämpfungen von über -30 dB erreichbar. Die Dipolstrahler dienen gleichzeitig als Spanten für das Radom aus Epoxyd-Glasfasergewebe, welches das ganze Antennensystem gegen Umgebungseinflüsse schützt.

5 - 27

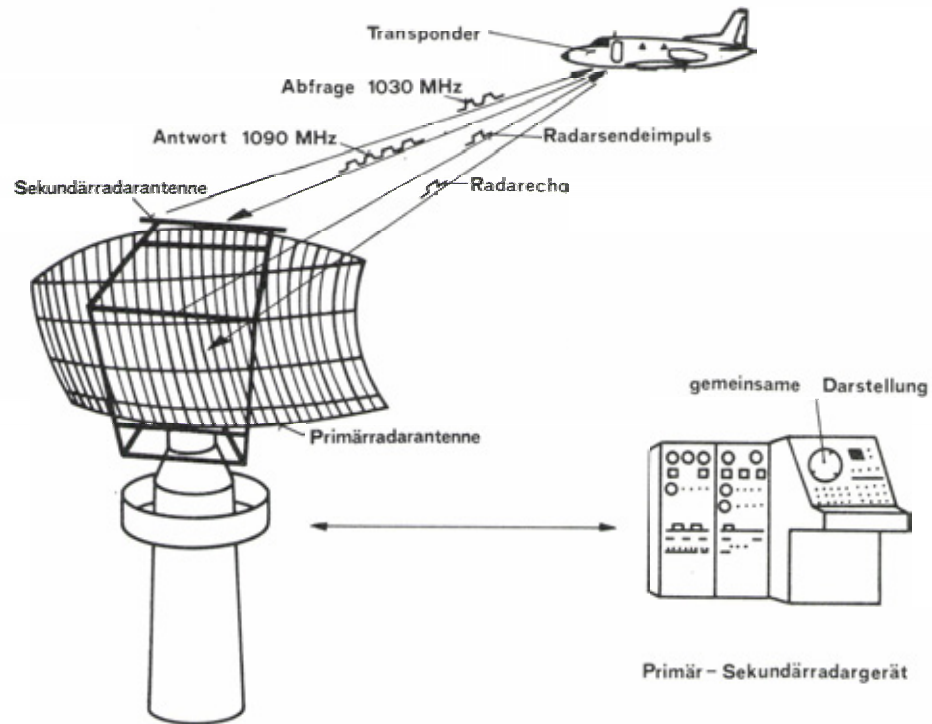


Abb.41 Kombiniertes Primär- und Sekundärradarsystem

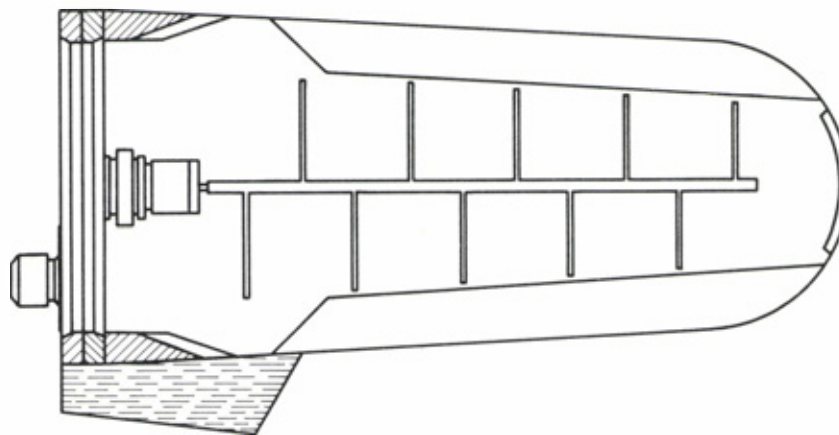


Abb.42 Schnitt durch Kennungsantenne

Militärische Anwendung von Richtfunkantennen

Neben der reinen Nachrichtenübermittlung mit Hilfe von Richtfunkstrecken, bei denen sich im militärischen Anwendungsbereich die Fragen der Abhörsicherheit, Mobilität und Tarnung stellen, ist die Richtfunktechnik durch die Einführung militärischer Satellitensysteme wieder mehr in den Vordergrund getreten.

Untenstehendes Beispiel (Abb.43) des Navigations-Satelliten-Systems der US-Marine zeigt, wie vielfältig Funkkontakte zwischen Schiffen, Satelliten und Bodenstationen hergestellt werden müssen.

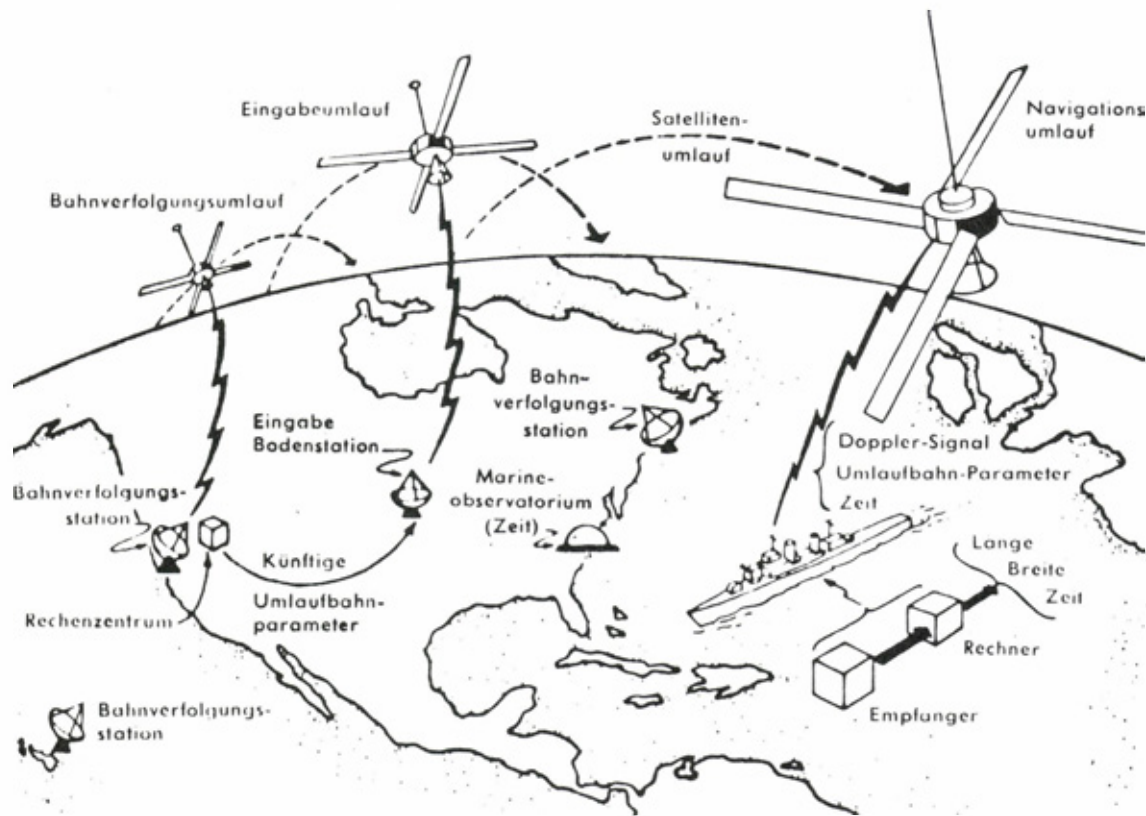


Abb.43 Navigations-Satellitensystem

Bei diesem System wurde zunächst auf Frequenzen von 150 MHz und 400 MHz gesendet. Inzwischen sind aber auch die für militärische Zwecke reservierten Frequenzbänder von 4,5 - 5 GHz, 7,725 - 8,5 GHz und Frequenzen um 11 GHz und 15 GHz eingesetzt, sodass Richtfunkantennen ganz ähnlich wie die Antenne in Abbildung 44 von der Erdfunkstelle Raisting eingesetzt werden können. Antennen dieser Art (Parabol m. Subreflektor n. Cassegrain) erreichen bei einem Durchmesser von ca. 28 m bei 6 GHz ca. 63 dB Gewinn, bei 15 GHz fast 70 dB Gewinn. Damit ist Kontakt selbst mit den 36 000 km entfernten geostationären Satelliten gut möglich.

5 - 29

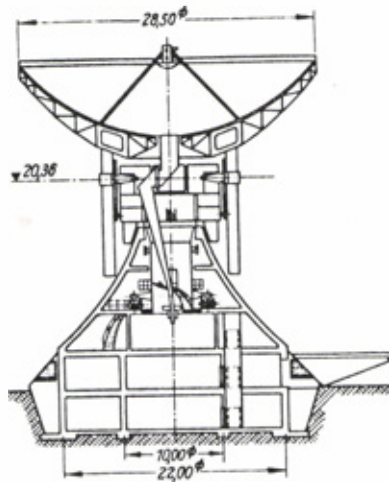


Abb.44 Satelliten-Erdfunkstelle in Raisting (BRD)

Katastrophensichere Radar- und Richtfunkanlagen

Sowohl Radar- als auch Richtfunkanlagen, insbesondere deren herausragende Antennen, sind durch äussere Einflüsse wie Erdbeben und Sturm, aber auch durch Bombeneinschläge gefährdet. Wenn auch die Befehls- und Funkzentralen tief unter der Erdoberfläche installiert werden, wie in Abb.45 gezeigt, so treten doch mehrere Probleme auf:

1. Die Verbindung von der Befehlsstelle zur Antenne muss dämpfungsarm und druckfest hergestellt werden.
2. Die Antenne, die sich auf der Erdoberfläche befindet, muss dem Druck und der Temperatur der Katastropheneinwirkung widerstehen können.
3. Die empfindlichen elektronischen Einrichtungen müssen vor den intensiven elektromagnetischen Pulsen (EMP, näheres darüber siehe "Krieg im Aether", Folge XIII) geschützt werden.

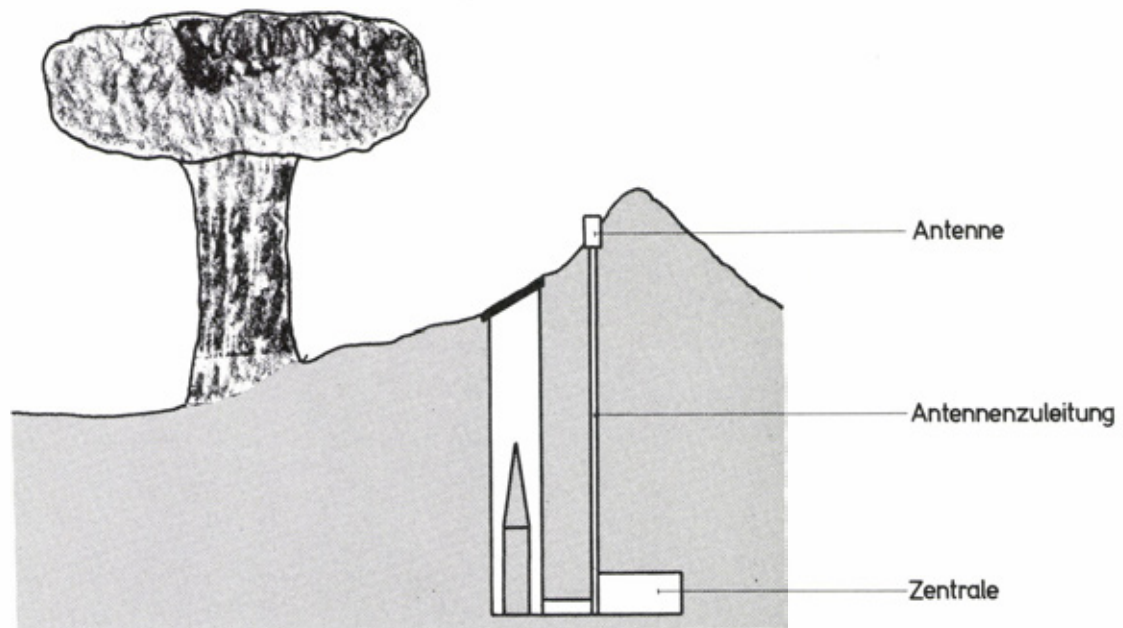


Abb.45 Bombensichere Radar-Befehls- und Funkzentrale

5 - 30

Zunächst zur Lösung des ersten Problems:

Bei NORAD (North American Air Defense Command) liegt die Befehlszentrale im Cheyennegebirge bei Colorado Springs in etwa 300 m Tiefe im Felsgestein. Die Gesamtlänge der Verbindungsleitung zwischen der Antenne und dem Standort des Sender-Empfängers beträgt etwa 480 m. Die Forderung war die, dass diese Strecke ohne Zwischenverstärker mit einer Dämpfung $a \leq 10$ dB zu überbrücken war. Hier hilft die auf Seite 5-5 schon vorgestellte äusserst dämpfungsarme Hohlleiterwelle vom Typ H_{01} im kreisförmigen Hohlleiter. Durch Einbau eines ca. 10 cm dicken Hohlleiterrohres gelingt es, die 480 Meter mit einer Dämpfung von etwa 6 dB zu überbrücken.

Um Explosionsdruckwellen von der Zentrale fernzuhalten, werden zwei Massnahmen ergriffen:

1. Ein Berylliumfenster schliesst das Speiserohr ab, so dass schon die Speiseleitung unter reduzierter Druckeinwirkung steht.
2. Direkt vor der Zentrale wird noch ein sogenannter "Seitenwandkoppler" eingebaut. Dieser Koppler ähnelt den Vielschlitz-Richtkopplern (Abb.46), ausser dass die 15...20 Koppelschlitz mit druckfesten, aber HF-durchlässigen Al_2O_3 -Stopfen verschlossen werden.

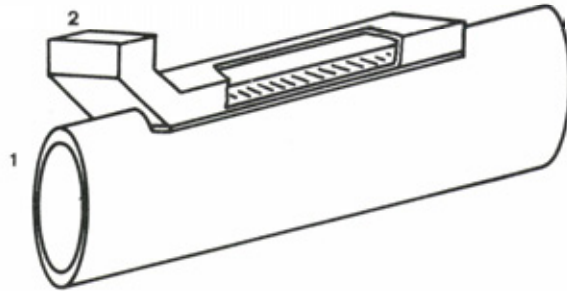


Abb.46 Vielschlitz-Koppler an einem runden Hohlleiter

Zu Aussagen über die "Ueberlebenschance" einer Radar- oder Richtfunkantenne muss man sich zunächst einmal die Wirkung einer Kernexplosion vor Augen führen. Abb.47 zeigt den zu erwartenden Bombentrichter bei der Detonation einer 1-Megatonnen-Bombe. Bei einer typischen 20 Mt-Bombe beträgt der Kraterdurchmesser bereits 1,5 km, und die Kratertiefe 100 m. Der Explosionsdruck im Zentrum beträgt mehrere Mp/m^2 . In einer Entfernung von 4 km vom Zentrum sinkt der Druck auf ca. $35 Mp/m^2$, es herrscht eine Windgeschwindigkeit von 1600 km/h, in 8 km Entfernung liegen $7 Mp/m^2$ Druck, eine Windgeschwindigkeit von 500 km/h und in 20 km Entfernung dann noch $1,4 Mp/m^2$ Druck bei 110 km/h Windgeschwindigkeit.

Bekanntlich ist man in der Lage, herkömmliche Türme zu bauen, die Stürme mit 120...140km/h aushalten können. Das bedeutet, dass diese Türme, und damit die Radar- und Richtfunkanlagen, "typische" Kernexplosionen in einer Entfernung von ca. 20 km vom Zentrum überstehen werden.

Will man Anlagen konstruieren, die grössere Belastungen überstehen, muss man die herkömmliche Bauweise verlassen. Die Antennen, die noch in 4 km Entfernung betriebsfähig sein sollen, ähneln vorgeschichtlichen Kultsymbolen. Wie Abb.48 zeigt, wird unter dem Kamm eines Berges, also möglichst hoch über der Umgebung, ein Betonklotz in den Boden versenkt. Nur ein kleiner Teil ragt wie bei einem Eisberg heraus. Seine Stromlinienform setzt dem Winddruck wenig Widerstand entgegen. Ueber den eigentlichen Reflektor, dessen Oberfläche aus graphitverstärktem Kunstharz besteht, beugt sich schützend eine Betonnase mit der eingebetteten Energieleitung. Diese Antenne soll imstande sein, ein Inferno einer in der Nähe detonierenden Atombombe betriebsfähig zu überstehen.

Zum Schutz der elektrischen Anlagen vor dem Einfluss der Strahlung und der elektromagnetischen Felder ist über den Betriebsräumen (für 4 km Entfernung vom Zentrum, $35 Mp/m^2$ Druckbeanspruchung) eine 1,5 m hohe Erdschicht und eine 0,6 m dicke Betonwand vorzusehen. Eine Hülle aus Kupfer und Stahl wirkt als Faradayscher Käfig und verringert den Einfluss der elektromagnetischen Felder z.B. um ca. 80 dB bei 10 kHz.

5 - 31

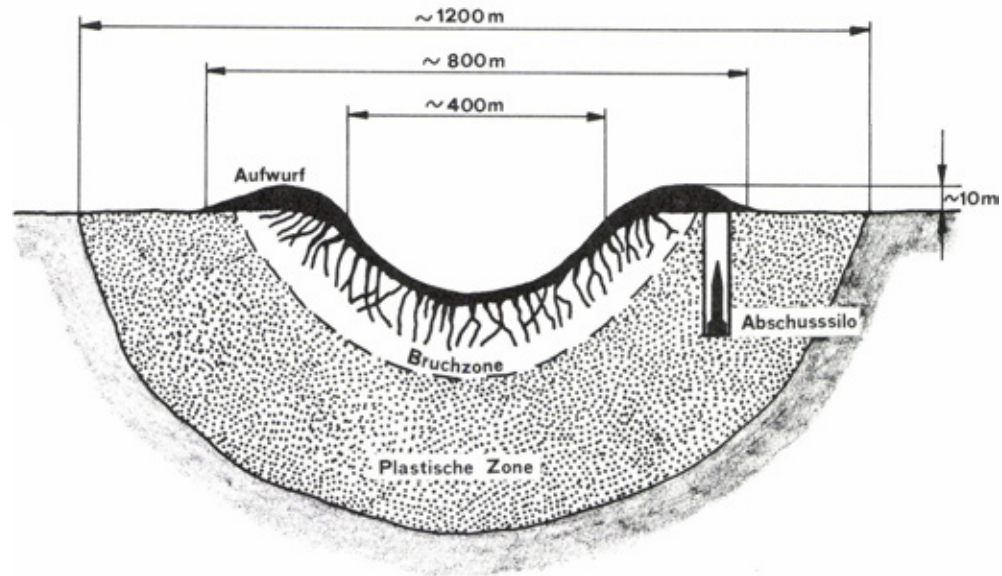


Abb.47 Auswirkungen einer 1 Mt-Erddetonation

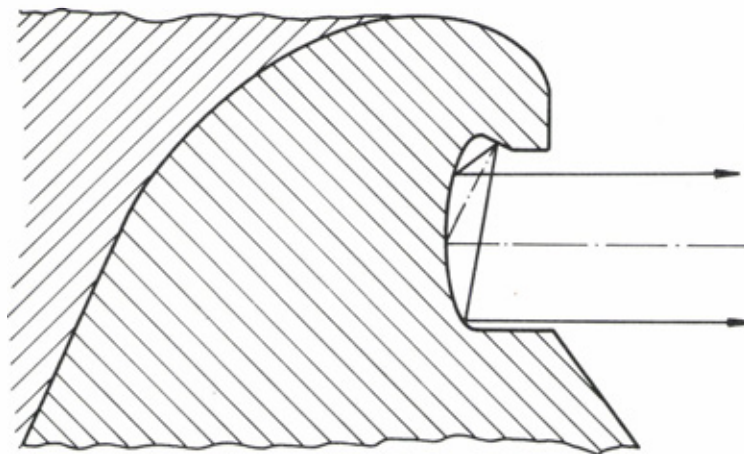


Abb.48 Detonationsgeschützte Antennenanlage

Diese beschriebenen Radar- und Richtfunkverbindungen sind in den USA schon mehrere Jahre in Betrieb und erfüllen ihre Aufgabe zufriedenstellend. Es gibt auch keinen Grund, daran zu zweifeln, dass sie härteste Katastrophen betriebsfähig überstehen. Aber man sollte doch hoffen, dass ihnen diese Bewährungsprobe nie abverlangt wird.

L i t e r a t u r:

- H.E. Thomas Handbook of Microwave Techniques and Equipment
1972 Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- W. Baier Elektronik - Lexikon
1974 Franckh'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- H.-G. Unger Hochfrequenztechnik in Funk und Radar
1972 B.G. Teubner, Stuttgart
- P. Pauli Impedanzmessungen bei Hohlleitern
1974 Vortrag an der Technischen Akademie, Esslingen
- G. Käs Radar und andere Funkortungsverfahren
1973 R.Oldenbourg, München
- A. Heilmann Antennen III
1970 Bibliographisches Institut, Mannheim
- A.J. Baden Fuller Mikrowellen
1974 Vieweg u. Sohn, Braunschweig
- Valvo - Brief Doppler-Radar-Baugruppen
Juli 1972, VALVO Hamburg
- Miniatur X-Band-Radargerät
Nov. 1972, VALVO Hamburg
- Funktechnik Ausgabe Nr. 19, Jahrgang 1971 Seite 737 f.f.
- R. Feller Grundlagen und Anwendungen der Radartechnik
1975 Fachschriftenverlag Aargauer Tagblatt AG, Aarau/Schweiz
- P. Honold Sekundär-Radar
1971 Siemens AG Berlin und München
- G. v. Trentini Uebersicht der heute in der Technik verwendeten stark bündelnden
Mikrowellenantennen
1975 Frequenz 6/75 und 7/75