

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 51 (1960)
Heft: 14

Artikel: Technik und Probleme von Zielverfolgungsradar
Autor: Braun, A.F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-917043>

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: 23.02.2026

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEM VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEM VEREINS (SEV) UND
DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)

Technik und Probleme von Zielverfolgungsradar

Vortrag, gehalten an der Hochfrequenztagung des SEV am 28. Oktober 1959 in Luzern,
von A. F. Braun, Zürich

621.396.969.3

Im ersten Teil der Arbeit wird ein Überblick über den heutigen Stand der Technik von Zielverfolgungsradar gegeben und werden die in diesen Geräten verwendeten Arbeitsprinzipien kurz erläutert. Im zweiten Teil wird auf einige Probleme eingegangen, die sich dem Hersteller und dem Benutzer solcher Geräte stellen. Besondere Bedeutung wird folgenden Faktoren beigemessen: Wahl der Wellenlänge und Bündelungsschärfe, Wettereinflüsse und Standortwahl, Einfluss des Ziels auf die Verfolgungsgenauigkeit.

Allgemeines

Unter Zielverfolgungsradar versteht man Radargeräte, die bewegte Ziele im Luftraum auffinden und ihre Lage in allen drei Koordinaten laufend und genau vermessen. Solche Geräte finden Anwendung für die Verfolgung von Wettersonden, Flugzeugen, Raketen und ballistischen Geschossen. Im militärischen Einsatz werden sie insbesondere für die Bekämpfung oder Lenkung von Flugkörpern als Feuerleitradar oder Raketenleitradar verwendet. Die Messwerte werden meist automatisch vom Radar an andere Geräte weitergeleitet, z. B. an Schreibgeräte für die Aufzeichnung von Flugbahnen, Rechengeräte für die Vorhalterechnungen von Fliegerabwehrgeräten oder an Steuerungsgeräte für die Steuerung von Flugkörpern.

1. Technik

1.1 Arbeitsprinzip

Für Zielverfolgungsradar hat sich das Prinzip des Impulsradars bewährt. Von einer Antenne werden leistungsstarke und zeitlich sehr kurze Mikrowellenimpulse scharf gebündelt abgestrahlt. Die Impulse pflanzen sich im Raum mit der Lichtgeschwindigkeit von 300 000 km/s geradlinig fort. Treffen sie auf reflektierende Objekte, so entstehen Echowellen, die von der gleichen Antenne empfangen und dem Radarempfänger zugeführt werden. Der Zeitverzug zwischen Aussendung und Empfang der Mikrowellenimpulse, auch als Echozeit bezeichnet, ist wegen der grossen Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ein genaues Mass für die Entfernung des reflektierenden Objektes. Die zu messenden Zeiten sind außerordentlich kurz; ein Echo, das mit 100 μ s Laufzeit eintrifft, kommt aus einer Entfernung von 15 km.

Die Winkelmessung wird durch die Richtwirkung der Antenne ermöglicht. Ziele, die nicht im Antennenstrahl liegen, geben keine Echos. Ziele, die auf

La première partie de cet article comprend un aperçu de l'état actuel de la technique du radar de poursuite et un court exposé des principes de travail utilisés dans ces appareils. Dans la deuxième partie, quelques problèmes sont examinés tels qu'ils se présentent au fabricant et à l'utilisateur de ces appareils, c'est-à-dire: choix de la longueur d'ondes, concentration du faisceau rayonnant, influence des éléments atmosphériques, choix de l'emplacement et influence des buts sur la précision de la poursuite.

der Strahlachse liegen, geben die grössten Echos. Die einfache Maximum-Peilung ist aber zu ungenau. Es werden daher Verfahren angewendet, die mit der Flanke der Richtcharakteristik arbeiten.

Die Verfolgung bewegter Ziele wurde in der ersten Zeit manuell durchgeführt. Dabei arbeitete ein Team von drei Operateuren in der Weise zusammen, dass jeder von ihnen an einem Handrad die Verfolgung in einer Koordinate (Höhenwinkel, Seitenwinkel, Entfernung) durchführte. Als Anzeige für die Winkelverfolgung diente dabei ein Indikatorpaar, das für die beiden Winkelkoordinaten die Ablage des Ziels von der Antennenachse anzeigen, während für die Distanzverfolgung (Zeitmessung) auf dem Distanzindikator eine elektronische Marke mit dem Zielecho zur Deckung zu bringen war. An den drei Antriebsachsen wurden die Zielkoordinaten abgenommen und zur Anzeige oder zur automatischen Übertragung der Messwerte verwendet. Heute sind die Radargeräte meist für vollautomatische Zielverfolgung eingerichtet. Dies erfordert für jede Koordinate eine Servosteuerung, also insgesamt drei, die die Operateure mit ihrem Handrad ersetzen. Statt des Indikatorbildes, das dem Operateur die Information für die Verfolgung lieferte, hat der Radar nun an den Eingang des Servoverstärkers für jede Lage-Koordinate eine Fehlerspannung abzugeben, die den Drehsinn und die Drehgeschwindigkeit des betreffenden Motors gemäss den Bewegungen des verfolgten Ziels steuert.

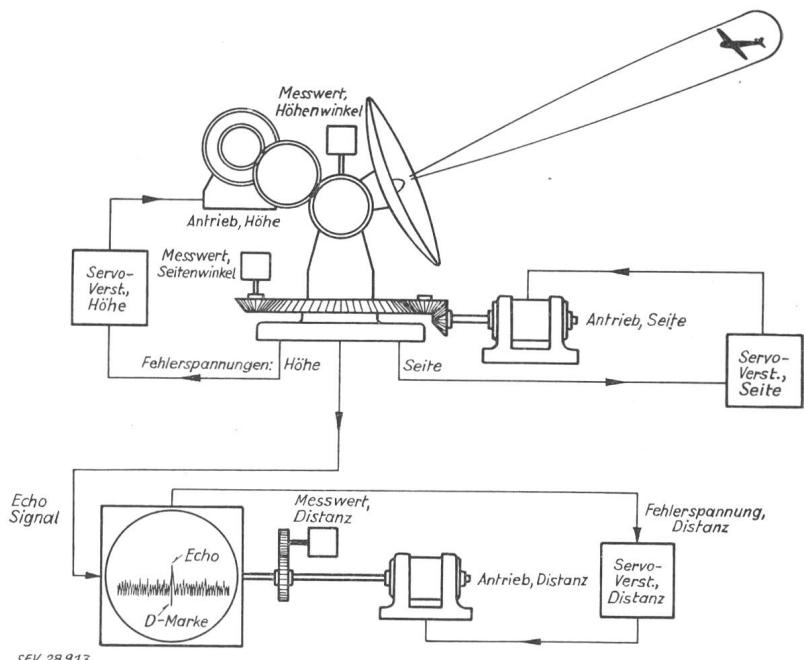
Diese automatische Zielverfolgung ist nicht nur bequemer und spart Bedienungsleute, sie ist auch weit genauer und ermüdet nicht. Solche Geräte können von einem einzigen Radaroperateur bedient werden, der dann während der Zielverfolgung seine ganze Aufmerksamkeit der Überwachung widmen kann und frei ist für das Eingreifen bei Störeinflüssen verschiedener Art (Fig. 1).

1.2 Distanzmessung und -verfolgung

Für genaue Distanzmessung sollten möglichst kurze Impulse verwendet werden. Die Energie sehr kurzer Impulse ist jedoch auf ein breites Frequenzspektrum verteilt. Dies bedingt, dass auch die Radarempfänger grosse Bandbreiten besitzen, was zu grosser Rauschleistung im Empfänger und damit kleinerer Reichweite führt. Die Impulslänge ist daher ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Reichweite.

Es bedingt beispielsweise ein Hochfrequenzimpuls von $0,3 \mu\text{s}$ Dauer eine Bandbreite von mindestens 4 MHz im Radarempfänger. Bei dieser Impulslänge ergibt sich eine Fehlerspannung von $10 \mu\text{V}$.

Fig. 1
Prinzip der automatischen Zielerverfolgung und der Messwertabgabe



dauer ergibt jedoch ein Fehler in der Zeitmessung von einer Impulslänge bereits einen Distanzfehler von 45 m, was für viele Zwecke unzulässig gross ist. Um allzu kurze Impulse und damit zu grosse Empfängerbandbreiten zu vermeiden, wird mit Verfahren gearbeitet, die den «Schwerpunkt» des Echoimpulses ermitteln und dadurch den Distanzfehler auf Bruchteile einer Impulslänge reduzieren. Das Prinzip der Erzeugung der Fehlerspannung für den Distanznachlauf ist in Fig. 2 dargestellt.

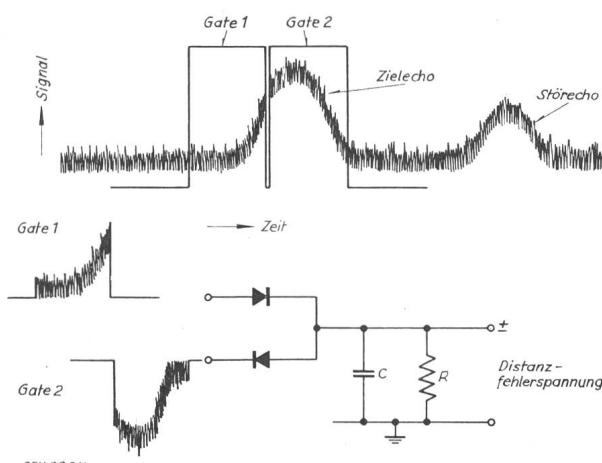


Fig. 2
Erzeugung der Distanzfehlerspannung

Aus dem Echosignal werden durch eine Gateschaltung zwei genau gleich lange Zeitintervalle ausgebildet. Die beiden Gates schliessen sehr genau aneinander an und der in jedes von ihnen fallende Anteil des Zielimpulses wird gleichgerichtet und die Differenz der entstehenden Gleichspannungen gebildet, so dass daraus die Distanzfehlerspannung entsteht. Die Trennungslinie der beiden Gates markiert die Distanzmessmarke. Steht sie genau auf der Impulsmitte, so ist die Fehlerspannung null. Bei zunehmender Abweichung von der Symmetrielage wächst die Fehlerspannung und steuert damit den

Nachlaufservo wieder auf die Symmetrielage hin. Die Einstellgenauigkeit dieses Nachlaufverfahrens ist sehr gut und beträgt wenige Prozente der Impulslänge, d. h. im vorher erwähnten Beispiel etwa 1...2 m. Die beiden Gates zusammen werden auch als Distanzfenster bezeichnet, da das Radargerät bei der automatischen Verfolgung nur den in ihren Bereich fallenden Signalanteil «sieht».

Ein weiteres Problem der genauen Distanzmessung ist die Erzeugung der kontinuierlich und definiert über den ganzen Messbereich einstellbaren Zeitmarke (Distanzmessmarke) hoher Genauigkeit. Ein Zeitfehler dieser Marke von $5 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ bedingt einen Fehler von 7,5 m in der Distanzmessung. Durch Ableitung der Zeitbasis aus einem Quarzoszillator und Verschiebung der Marke mit einem sehr genauen Phasenschieber ist es mit heutigen Radargeräten möglich, auch unter den schwierigen Bedingungen des Feldbetriebes wie Transporterschüttungen und grossen Temperatur- und Spannungsschwankungen die Messfehler in dieser Größenordnung zu halten.

1.3 Winkelmessung und -verfolgung

Es sind heute zwei Prinzipien der Winkelmessung im Gebrauch, das «Conical-Scan-System» und das «Monopuls-System». Beiden Systemen ist gemeinsam, dass sie mit symmetrisch gegen die Antennenachse versetzten Strahlungscharakteristiken arbeiten und durch Differenzbildung der empfangenen Signale feststellen, ob das Ziel sich genau auf der Antennenachse befindet oder davon abliegt. Bei beiden Systemen wird aus dem Empfangssignal ein Fehlerspannungspaar gebildet, das die Zielablage in Seitenwinkel bzw. Höhenwinkel nach Richtungssinn und Grösse beschreibt und die Servoantriebe für Antennen-Seitenwinkel bzw. -Höhenwinkel derart steuert, dass die Antennenachse bei beliebigen Zielbewegungen immer möglichst genau auf das Ziel gerichtet bleibt. Bezüglich Technik und Wirkungsweise sind die beiden Systeme jedoch sehr verschieden.

1.3.1 Das Conical-Scan-System

Bei diesem System der Winkelmessung wird der Antennenstrahl, der etwas gegen die Antennenachse geneigt ist, in eine rasche Umlaufbewegung um die Antennenachse versetzt. Er bewegt sich auf einem Kreiskegelmantel um diese Achse, wovon sich der Ausdruck Conical-Scan ableitet, den man etwa als konische Abtastbewegung übersetzen kann (Fig. 3). Ziele, die sich nicht auf der Antennenachse befinden, werden während eines Umlaufes mit wechselnder Stärke angestrahlt und empfangen, so dass die empfangene Impulsreihe mit der Umlauffrequenz

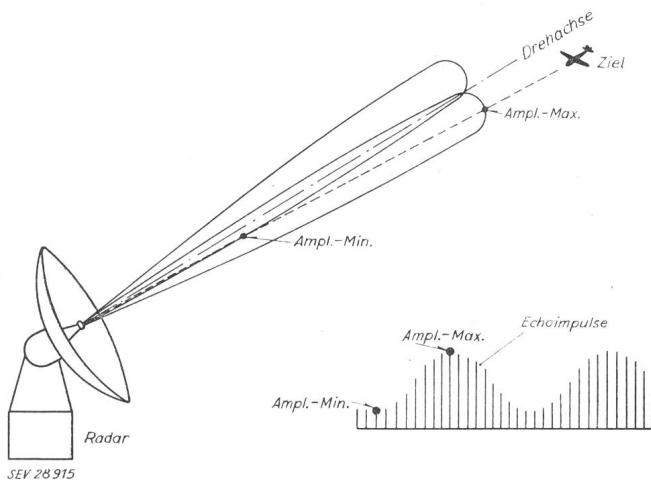


Fig. 3

Konische Abtastbewegung und amplitudenmodulierter Impulszug

des Antennenstrahles amplitudenmoduliert erscheint. Genau auf der Antennenachse befindliche Ziele werden aus Symmetriegründen von dem runden Antennenstrahl stets mit gleicher Stärke angestrahlt und ihre Echos sind nicht amplitudenmoduliert. Die Modulation ist in einem gewissen Winkelbereich annähernd sinusförmig und ihre Tiefe nimmt mit wachsender Winkelablage zu, der Modulationsgrad ist somit ein Mass für den Betrag der Winkelablage, während die Phasenlage der Modulation ein Mass für die Richtung der Ablage ist. Das Amplitudenmaximum wird nämlich immer dann erreicht, wenn die Richtung des Antennenstrahles mit der Richtung der Zielablage übereinstimmt, das Minimum bei Oppositionslage der beiden Richtungen.

Nach Verstärkung und Gleichrichtung wird im Radarempfänger diese Modulationsspannung der empfangenen Echoimpulse gewonnen. Sie wird in zwei Phasendiskriminatorschaltungen mit sinusförmigen Referenzspannungen verglichen, die von einem synchron mit der konischen Suchbewegung drehenden Zweiphasen-Wechselstromgenerator erzeugt werden und die daher ein Mass für die momentane Lage des Antennenstrahles sind. Der Generator liefert ein Spannungspaar von 90° Phasenverschiebung, so dass der eine Diskriminator die Höhenwinkel-Fehlerspannung, der andere die Seitenwinkel-Fehlerspannung liefert (Fig. 4). Das Verfahren ist so empfindlich, dass Winkelablagen des Ziels von weniger als 1 % der Strahlbreite bereits merkliche Fehlerspannungen erzeugen.

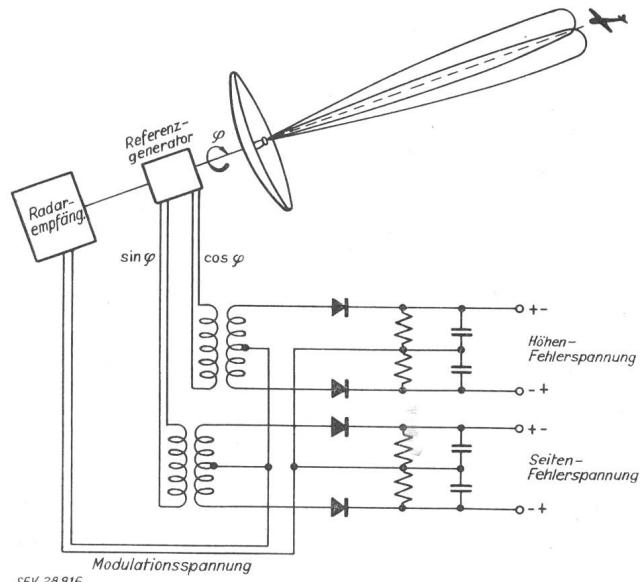


Fig. 4
Erzeugung der Winkelfehlerspannung

1.3.2 Das Monopuls-System

Die Winkelmessung nach dem Monopuls-System unterscheidet sich dadurch vom Conical-Scan-System, dass sie auf einem gleichzeitigen Vergleich der mit verschiedenen Antennencharakteristiken empfangenen Signale beruht, während beim Conical-Scan ein zeitlich nacheinander erfolgendes Abtasten des Ziels mit verschiedenen Antennencharakteristiken durchgeführt wird. Während beim konischen Abtasten erst nach einem vollen Umlauf der Strahlungscharakteristik die Winkellage des Ziels ermittelt ist, kann beim Monopuls-Messverfahren im Prin-

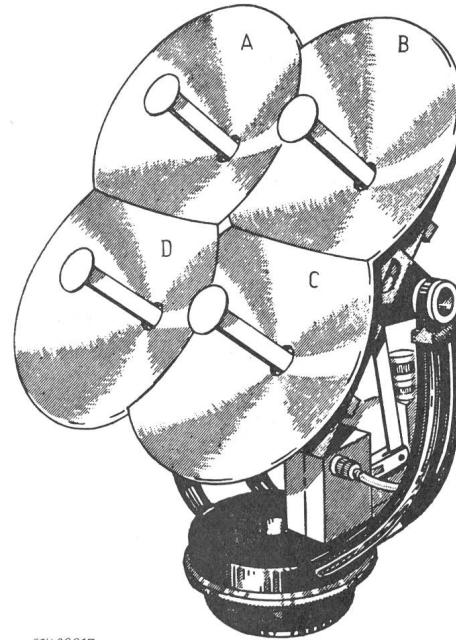


Fig. 5
Antennensystem eines Monopuls-Phasenvergleichs-Radars
(nach [1] S. 14)
A, B, C, D Teilantennen

zip einem einzigen Impuls die genaue Winkellage des Ziels entnommen werden. Von dieser Eigenschaft leitet sich der Name des Systems ab. Jeder Monopuls-Radar benötigt für die Durchführung die-

ses Vergleiches mehrere Antennen, die gleichzeitig empfangen. Für jeden Winkel ist ein Antennenpaar erforderlich, wobei eine Antenne gemeinsam benutzt werden kann. Nach diesem Prinzip arbeitet das Antennensystem nach Fig. 5. Mit dem Antennenpaar A–B wird der Seitenwinkel, mit dem Paar B–C der Höhenwinkel bestimmt. Die Antenne D dient zum Aussenden der Impulse. Diese Antennen können wie im vorliegenden Beispiel vollständig getrennt sein, was aber viel Platz erfordert. Sie bestehen daher meist aus mehreren Primärstrahlern, die mit dem gleichen Reflektor oder der gleichen Linsenantenne arbeiten.

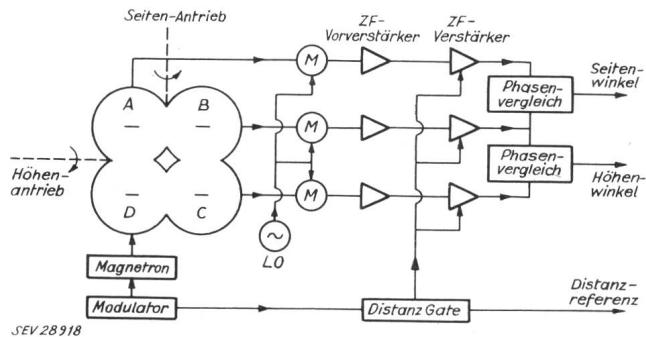


Fig. 6
Bildung der Winkelfehlerspannung bei einem
Monopuls-Phasenvergleichs-Radar

(nach [1] S. 13)

M Mischstufe; LO Lokaloszillator; ZF Zwischenfrequenz
A, B, C, D Teilantennen

Nach der Art der Auswertung der eintreffenden Echosignale unterscheidet man zwischen Phasen-Monopuls- und Amplituden-Monopuls-Radar. Beim Phasen-Monopuls-Radar wird, wie es der Name sagt, die Phasenlage der eintreffenden Mikrowellenimpulse ausgewertet. Bei schiefem Einfall der Welle weisen die in den räumlich getrennten Antennen entstehenden Signale eine Phasenverschiebung auf, die für senkrechten Einfall verschwindet. Diese Phasenverschiebung wird zur Erzeugung der Fehlerspannung benutzt. Ein Phasen-Monopuls-Radar ist daher ein Mikrowellen-Interferometer. In Fig. 6 ist für das Antennensystem gemäß Fig. 5 die Prinzipschaltung für die Bildung der Winkelfehlerspannungen gezeichnet [1].¹⁾.

Beim Amplituden-Monopuls-Radar werden die Amplituden der von den verschiedenen Antennen gleichzeitig empfangenen Signale miteinander verglichen. Sind die Amplituden gleich, so liegt das Ziel auf der Antennenachse, sind sie verschieden, so bildet die Zielrichtung einen Winkel mit der Antennenachse, ganz analog wie das in Fig. 3 für die kohäsive Abtastbewegung dargestellt ist, und es werden Fehlerspannungen für den Nachlauf in den Winkelkoordinaten gebildet.

Fig. 7 zeigt die Prinzipschaltung einer Spezialform von Monopuls-Radar, die als Summen-Differenz-Radar bezeichnet wird und sich besonders gut bewährt hat. Das System arbeitet mit 4 Teilantennen, deren Empfangssignale im Wellenleiterteil derart kombiniert werden, dass durch zweimalige Summen- bzw. Differenzbildung Signale entstehen, die die gewünschte Information enthalten und zur Erzeugung der Winkelfehlerspannungen dienen [2].

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Durch paarweises Addieren der beiden linken bzw. rechten Antennenausgänge entstehen die Signale $(a + b)$ bzw. $(c + d)$, durch weiteres Addieren dieser Untersummen wird das Summensignal $(a + b + c + d)$ gebildet, das für die Distanzmessung verwendet wird und auch als Referenz für das Vorzeichen der Winkelfehlerspannung dient. Durch

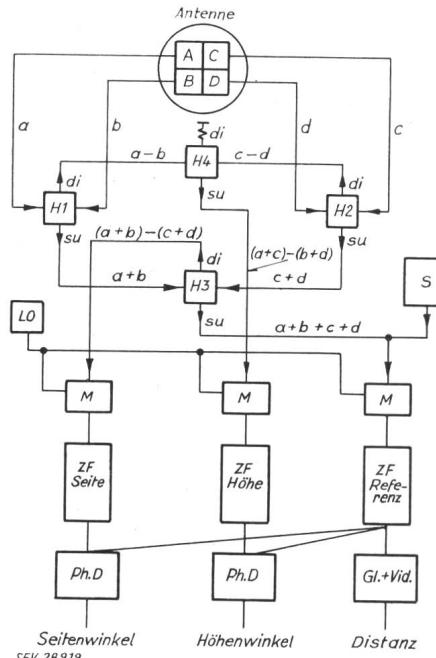


Fig. 7
Prinzipschaltbild des Summen-Differenz-Radars

A, B, C, D Teilantennen; a, b, c, d Empfangssignale dieser Teilantennen; su Summe; di Differenz; H short slot hybrid junction; LO Lokaloszillator; S Sender; M Mischstufe; Ph.D Phasendiskriminator; Gl. + Vid. Gleichrichtung und Videostufe

Differenzbildung aus den Untersummen entsteht das Signal $(a + b) - (c + d)$, das die Information für den Seitenwinkel enthält und analog durch Bildung von $(a + c) - (b + d)$ das Höhenwinkelsignal. Die Signale werden in separaten Kanälen in den Zwischenfrequenzbereich transponiert und verstärkt, worauf in den Diskriminatorschaltungen die Winkelfehlerspannungen gebildet werden. Der Radar-Sender arbeitet bei diesem System auf den Summenkanal, so dass nach zweimaliger Halbierung jede Antenne gleichphasig mit einem Viertel der Senderleistung gespeist wird, wodurch ein symmetrisches Antennendiagramm für die Sendung erzielt werden kann.

Monopuls-Systeme sind sowohl im Antennen- und Wellenleiterteil, wie im Zwischenfrequenzteil sehr kompliziert und aufwendig, weisen aber Vorteile auf, die in gewissen Fällen diesen erhöhten Aufwand rechtfertigen. Darüber wird im Teil 2 der Arbeit berichtet.

1.4 Auflösungsvermögen

Um seiner Aufgabe zu genügen, ein Ziel genau zu vermessen und zu verfolgen, muss ein Radargerät die Fähigkeit haben, dieses Ziel von anderen reflektierenden Zielen zu unterscheiden und sich bei der Messung nicht durch diese anderen Ziele beeinflussen zu lassen. Das Maß dieser Fähigkeit ist das Auflösungsvermögen des Gerätes. Je größer das Auflösungsvermögen ist, um so näher kann das vermes-

sene Ziel an andere Ziele herankommen, ohne dass die Messgenauigkeit dadurch leidet.

Da Ziele, die ausserhalb des Antennenstrahles liegen, keine Echos geben und daher das Gerät nicht beeinflussen, wird das Winkelauflösungsvermögen durch die Bündelungsschärfe der Antenne bestimmt, während die Distanzauflösung bei der automatischen Zielverfolgung durch die Länge des Distanzfensters gegeben ist, das zur Bildung der Distanzfehlerspannung dient. Die Länge dieses Fensters muss mindestens eine volle Impulslänge betragen, wird aber meist etwas grösser gewählt. Jedoch gibt die Länge des Sendeimpulses die grundsätzliche Grenze für die Distanzauflösung eines Radargerätes.

In Fig. 8 sind die Verhältnisse etwas vereinfacht dargestellt. Um das verfolgte Ziel herum lässt sich ein Raumgebiet abgrenzen, das man als Auflösungsvolumen bezeichnet und das durch Strahlquerschnitt und Fensterlänge gegeben ist. Solange keine weiteren Reflektoren in dies Gebiet eintreten, verläuft die Verfolgung ungestört, im anderen Falle entstehen Messfehler. Der Radar sieht bei der automatischen Zielverfolgung nur, was sich im Auflösungsvolumen befindet, kann aber unter mehreren Zielen in diesem Raum nicht mehr unterscheiden.

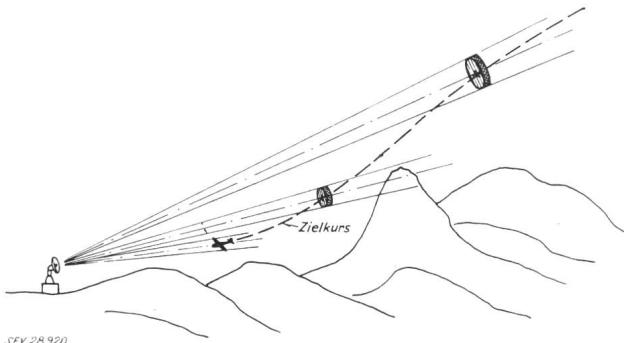


Fig. 8
Auflösungsvolumen von Zielverfolgungsradar

Allerdings bedarf die Darstellung nach Fig. 8 einer Korrektur, um den wirklichen Verhältnissen gerecht zu werden. Der Radarstrahl ist nach aussen nicht scharf begrenzt, sondern weist mit wachsender Winkelablage stark fallende Energiedichte auf, so dass der Durchmesser des Auflösungsvolumens etwas von der Stärke des störenden Zieles abhängt. Auch der Einfluss der Nebenstrahlung der Antenne ist von Bedeutung. Er wird im Abschnitt «Standorteinflüsse» besprochen.

1.5 Aufsuchen von Zielen

Ehe ein Ziel verfolgt werden kann, muss es vom Radargerät «erfasst» sein, d. h. der Radarstrahl muss auf dieses Ziel gerichtet und das Distanzfenster derart eingestellt sein, dass es das Zielecho durchlässt. Dieses Erfassen erfordert intelligentes Handeln und daher die Hilfe des Radaroperateurs; er beurteilt die Zielsituation und «schaltet das Gerät auf das Ziel».

Für dieses «Aufschalten» benötigt der Operateur einen Überblick über die Zielsituation, diesen gewinnt er durch «suchen» mit dem Gerät. Beim Suchvorgang wird der schmale Antennenstrahl in einer

systematischen Bewegung derart durch den interessierenden Raumteil geführt, dass in möglichst kurzer Zeit der ganze Raum vom Strahl überstrichen wird. Dieses Abtasten des Raumes wird periodisch wiederholt, bis ein Ziel gefunden ist.

Es haben sich besonders drei Suchbewegungen eingebürgert, die in Fig. 9 dargestellt sind, nämlich die:

- vertikale Suchbewegung, für Sektorsuchen in verschiedenen breiten Sektoren und Rundsuchen gleichermaßen geeignet. Diese Suchbewegung ist besonders für schwieriges Gelände günstig;
- spiralförmige Suchbewegung, günstig bei ungefähr bekannter Zielrichtung;
- schraubenförmige Suchbewegung, geeignet für Rundsuchen im flachen Gelände.

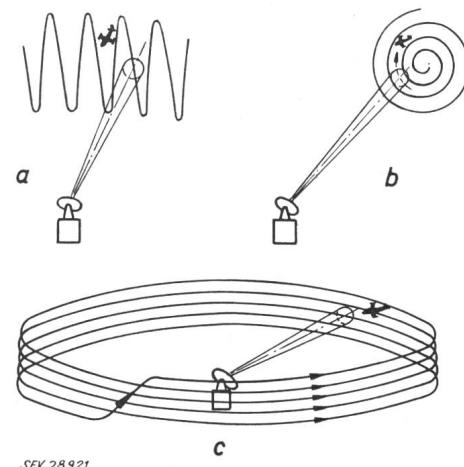


Fig. 9
Suchbewegungen
a vertikal; b spiralförmig; c schraubenförmig

Die Strahlbewegung wird durch die Bewegung der ganzen Antenne oder eines Antennenteiles bewirkt. Um mit dem schmalen Strahle wirkungsvoll zu suchen, müssen schnelle Bewegungen durchgeführt werden. Dies stellt hohe Anforderungen an die Antennengetriebe, die den durchaus gegensätzlichen Anforderungen des Suchens und der Zielverfolgung gleichermaßen gerecht werden müssen, also einerseits imstande sein müssen, sehr schnelle Suchbewegungen auszuführen, anderseits sich ganz langsam und präzise zu bewegen, wie dies die Zielvermessung und Zielverfolgung erfordert.

1.6 Anzeige und Bedienung

Der Anzeige- und Bedienungsteil eines Radargerätes ist von ausserordentlicher Bedeutung für seinen Betrieb. Er ist die Berührungsfläche von Mensch und Maschine. Auf den Indikatorbildschirmen unterbreitet das Gerät seinem Operateur ein Bild der Lage; dieser fasst seinen Entschluss und prägt dem Gerät seinen Willen ein durch die Bedienung der verschiedenen Handräder, Hebel und Knöpfe.

Die Erfassung schnell bewegter Objekte erfordert ausserordentliche Raschheit bei der Bedienung des Radargerätes. Anzeige- und Bedienungsteil müssen daher so durchdacht und ausgeführt sein, dass Interpretation des Indikatorbildes und Ausführung der nötigen Bedienungshandgriffe in einem Minimum

von Zeit möglich sind. Diese Forderungen sind dann erfüllt, wenn die Indikatoren eine möglichst sinnfällige, unmittelbar verständliche Darstellung der Zielsituation vermitteln und die Bedienungselemente so angeordnet sind, dass sich eine möglichst einfache und logische Folge von Handbewegungen für die am häufigsten vorkommenden Bedienungsfälle ergibt.

1.6.1 Indikatoren

Die zwei wichtigsten Betriebsarten eines Zielverfolgungsradars sind: Suchen und Verfolgen. Hierfür sind zwei verschiedene Arten von Indikatoren nötig.

Beim Suchvorgang soll der Indikator einen Überblick über den abgesuchten Raumteil und die darin befindlichen Ziele vermitteln, wobei stets die Schwierigkeit besteht, dass der Raum dreidimensional, die Indikatoroberfläche aber nur zweidimensional ist, also immer eine Dimension in der Darstellung zu kurz kommt.

Als Suchindikatoren werden Kathodenstrahlröhren mit Schirmen langer Nachleuchtdauer gewählt, auf welchen die Ziele durch Helltautung des Kathodenstrahles als leuchtende Punkte oder Striche erscheinen (Intensitätsmodulation). Die Speicherfähigkeit dieser Schirme gestattet, den Antennenstrahl mit sehr grosser Suchgeschwindigkeit durch den Raum zu schwenken, so dass die Ziele nur etwa während einer Hundertstelsekunde vom Strahl getroffen werden. Das kurze Aufblitzen des Kathodenstrahles wird jedoch vom Schirm für einige Zeit als Leuchtpunkt festgehalten, so dass der Operateur genügend Zeit hat, es als Ziel zu erkennen. Die Darstellungweise auf den Suchindikatoren wird bestmöglich auf die Geometrie der Suchbewegung abgestimmt, damit sie dem Operateur ein anschauliches Bild der Zielsituation im Raum vermittelt.

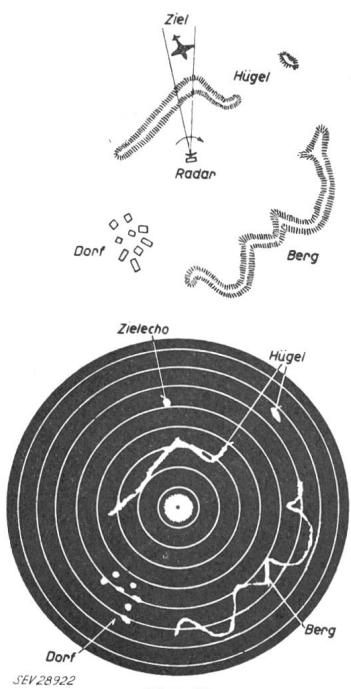


Fig. 10
Darstellung auf PPI-Suchindikator

Es haben sich vor allem die folgenden Kombinationen von Suchbewegung und Indikatordarstellung als günstig erwiesen:

Suchbewegung

Schraubenförmig

Indikatordarstellung

PPI (Plan Position Indicator) Fig. 10

Zieldarstellung durch leuchtenden Punkt

Radius = Zieldistanz

Winkel = Azimut

(Höhenwinkel nicht dargestellt)

Spiralförmig

I-Skop, Fig. 11

Zieldarstellung durch leuchtenden Kreisbogen

Bogenradius = Zieldistanz

Winkel zur Bogenmitte = Richtung der Ziel-Ablage von Spiral-Achse

Bogenlänge = Reziprokes

Mass für die Ablage

(geschlossener Kreis — keine Ablage,
kleiner Bogen — grosse Ablage)

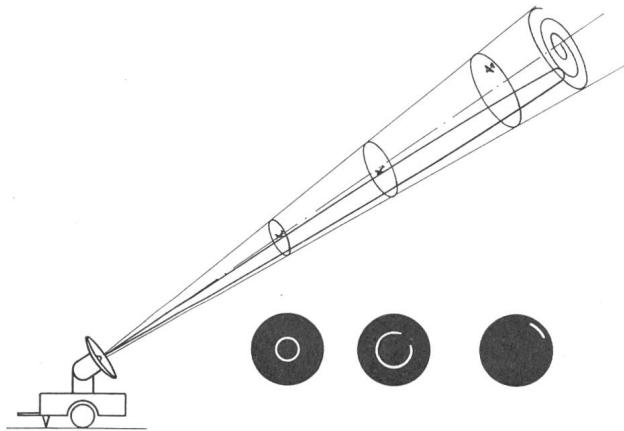


Fig. 11
Darstellung auf I-Indikator

Vertikal

RHI (Range Height Indicator), Fig. 12

Zieldarstellung durch leuchtenden Punkt

Radius = Zieldistanz

Winkel = Höhenwinkel

(Seitenwinkel nicht dargestellt)

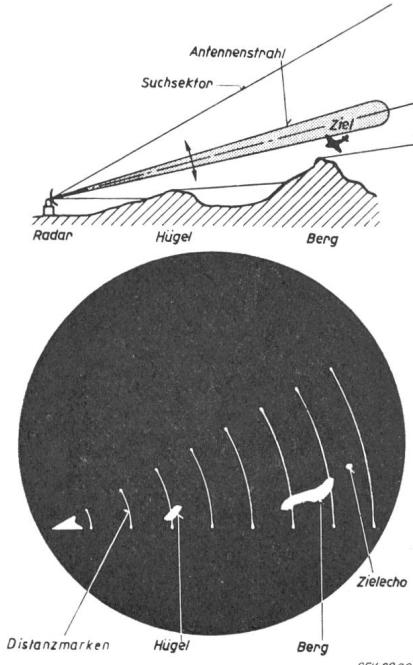


Fig. 12
Darstellung auf RHI-Suchindikator

Beim Aufschalten auf das Ziel ist die Beurteilung des Echoes wichtig (Flugzeug, Wetterecho, Boden echo) und während der Verfolgung seine dauernde

Überwachung durch den Operateur, um bei Auftreten von Schwierigkeiten eingreifen zu können. Für diese Zwecke eignet sich besonders das A-Scope und seine Abarten. Dieser Indikator arbeitet mit Schirmen kurzer Nachleuchtdauer und stellt den Verlauf des Empfangssignales in Funktion der Zeit (Distanz) dar (Fig. 13).

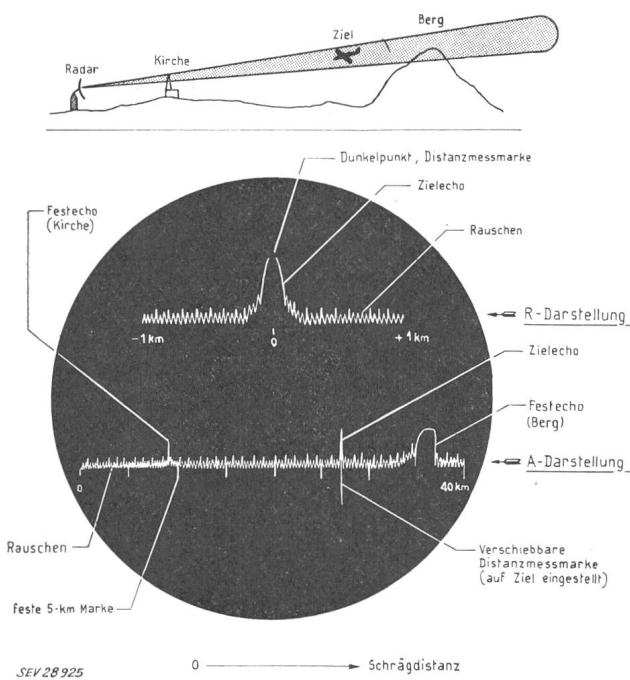


Fig. 13
Distanzindikator
A- und R-Darstellung

Das Empfängerrauschen ist als Grundsignal über den ganzen Distanzbereich sichtbar. Aus ihm ragen die Echos von Flugzeugen als spitze Impulse, während ausgedehnte Ziele längere Signalgruppen erzeugen. Regenechos zeichnen sich als sehr diffuse Signale ab, und aus dem Fluktuieren der Echos vermag ein erfahrener Radaroperateur selbst niedrig fliegende Flugzeuge von Punktzielen im Gelände (beispielsweise Leitungsmasten) zu unterscheiden.

Um die vom Indikator gebotene Information noch weiter zu steigern, wird häufig das Echosignal des verfolgten Ziels und ein gewisser Distanzbereich seiner Umgebung noch in gedehnter Darstellung angezeigt (Range-Scope, R-Scope).

Eine elektronische Distanzmarke, dargestellt als Impuls besonderer Form, umgekehrter Polarität oder in Form eines Dunkelpunktes wird zusätzlich in

Fig. 14
Feuerleitgerät «Fledermaus»

die Such- und Verfolgungsindikatoren eingegeben. Sie dient dazu, den Radar auf das gewählte Ziel aufzuschalten und zeigt durch ihr Mitlaufen an, dass das Gerät richtig verfolgt.

1.6.2 Bedienung

Der normale Funktionsablauf ist:

- Suchen;
- Aufschalten;
- Verfolgen.

Der Operateur stellt Suchart und Suchbereich ein und beobachtet den Suchindikator. Erkennt er ein Ziel, so zentriert er den Radar auf dieses unter Anhalten der Suchbewegung. Das Ziel befindet sich jetzt im ruhenden Antennenstrahl. Darauf wird im A-Scope kurz geprüft, ob es ein echtes Flugziel ist, und durch Einstellen der Distanzmarke und damit des Fensters der Distanzverfolgungskreise auf das Zielecho wird dem Radargerät markiert, welches der im Strahl befindlichen Ziele es zu verfolgen hat. Dann wird auf automatische Verfolgung umgeschaltet und geprüft, ob das Radargerät «angehängt» hat, d. h. ob es richtig verfolgt. All diese Operationen müssen in wenigen Sekunden vollzogen sein, da sonst das Flugzeug aus dem Strahl fliegt und neu gesucht werden muss.

1.7 Ausführungsbeispiel

Als Ausführungsbeispiel für ein modernes Zielverfolgungs-Radargerät zeigt Fig. 14 das von der Contraves AG, Zürich, und Albiswerk Zürich AG entwickelte und gebaute Feuerleitgerät «Fledermaus». Das Gerät dient zur Leitung des Feuers von Fliegerabwehrgeschützen und besteht aus dem Zielverfolgungsradar, den Servos für die automatische Zielverfolgung, einem Richtsitz mit Zielfernrohr und Steuerknüppel für die optische Winkelverfolgung der Ziele und einem Analogierechengerät für die Berechnung des Geschützvorhaltes, alles zu einer kleinen und beweglichen Einheit zusammengebaut.

Das Radargerät arbeitet auf 3-cm-Wellenlänge und hat 50 oder 150 kW Impulseistung. Die Ziele können wahlweise vollständig mittels Radar oder in den Winkeln optisch und in der Distanz durch



Radar verfolgt werden. Das Gerät ist sowohl für schraubenförmiges wie für vertikales Suchen eingerichtet, wobei der Suchindikator dementsprechend als «PPI» oder «Range Height Indicator»

arbeitet. Fig. 15 zeigt den Bedienungsteil des Gerätes mit Such- und Verfolgungsindikator. Die vom Radar laufend gemessenen Zielkoordinaten werden automatisch ins Rechengerät eingegeben, das fortlaufend die Vorhaltewinkel errechnet und an die sich automatisch richtenden Geschütze überträgt [3].

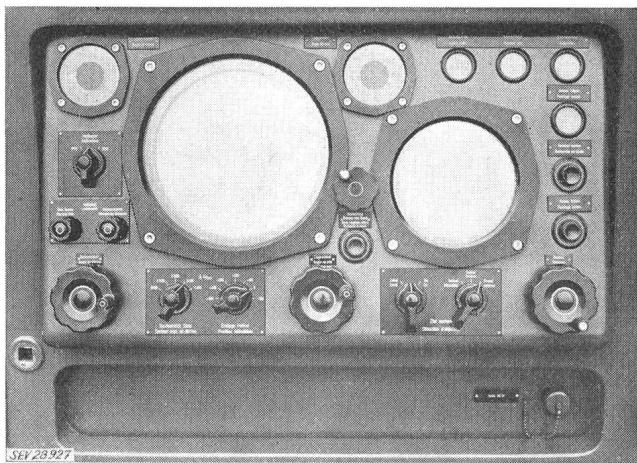


Fig. 15

Feuerleitergerät «Fledermaus», Bedienungsgerät

- oben: Anzeige Seitenwinkel und Höhenwinkel, Signallampen
- mitte: links Suchindikator PPI/RHI, rechts Distanzindikator A/R, Druckknöpfe für Gedächtnissesteuerung und Aufschalten
- unten: Handkurbeln für Seitenwinkel, Höhenwinkel, Distanz, sowie Bedienungselemente der Suchbewegungen

2. Probleme

2.1 Wellenlänge und Bündelungsschärfe

Die Wahl von Wellenlänge und Bündelungsschärfe sind wichtige Entscheide beim Bau eines Radargerätes. Die Wellenlänge ist eng verknüpft mit Grösse und Gewicht des Gerätes sowie mit Reichweite, Sucheigenschaften und Wettereinflüssen.

Die Bündelungsschärfe von Radaranennen ist im wesentlichen abhängig vom Antennendurchmesser gemessen in Wellenlängen. Eine runde Antenne von 30 Wellenlängen Durchmesser ergibt bei mittlerer Antennenausleuchtung eine Strahlbündelung von etwa 2° Öffnung zwischen Punkten halber Leistung. Tabelle I zeigt die hiefür erforderlichen Antennenabmessungen bei verschiedenen für Radargeräte ge-

Antennenabmessungen bei verschiedenen Wellenlängen für eine Bündelungsschärfe von 2°

Tabelle I

Wellenlänge cm	0,8	1,66	3,2	5,5	10	24
Antennendurchmesser m	0,24	0,5	1	1,65	3	7,2
Antennenfläche m ²	0,045	0,2	0,78	2,1	7	41

bräuchlichen Wellenlängen. Es ist zu erkennen, dass die gleiche Bündelungsschärfe, die bei 8-mm-Wellenlänge eine Antenne von der Grösse eines Suppentellers benötigt, bei 24 cm Wellenlänge eine Antennenfläche von 41 m² erfordert. Aus diesem Zusammenhang erklärt sich die Bevorzugung kurzer Wellenlängen für Zielverfolgungsradar. Es lassen sich mit ihnen kleine, gut transportable, leistungsfähige Radargeräte bauen. Dem Trend nach immer kür-

zeren Wellen wird jedoch eine Grenze gesetzt durch wachsende Absorption und Streuung in der Atmosphäre und durch Niederschläge, abnehmende Leistung der Mikrowellengeneratoren und abnehmende Empfindlichkeit der Empfänger. Daher werden die ganz kurzen Wellenlängen von 0,8 und 1,6 cm vorwiegend für Geräte von kleiner Reichweite und sehr hohem Auflösungsvermögen bevorzugt, während für mittlere Reichweite 3 cm und 5,5 cm und für sehr grosse Reichweiten 10 cm und längere Wellen Anwendung finden.

Auch die Wahl der Bündelungsschärfe läuft auf einen Kompromiss zwischen verschiedenen sich widersprechenden Forderungen hinaus. Steigerung der Bündelungsschärfe bedeutet höhere Reichweite durch stärkere Konzentration der Senderleistung auf das Ziel sowie grösseres Winkelauflösungsvermögen und höhere Winkelmessgenauigkeit. Mit abnehmendem Strahlquerschnitt werden aber die Sucheigenschaften schlechter. Um einen gegebenen Raumwinkel lückenlos abzusuchen, muss die Anzahl der vom Strahl bestreichenen Bahnen vermehrt und um beim Überstreichen genügend Impulse aufs Ziel zu bringen, muss die Suchgeschwindigkeit herabgesetzt werden. Dies führt zu einer erheblichen Verlängerung der Suchzeiten. Wo der günstigste Kompromiss liegt, ist von Fall zu Fall zu entscheiden. Die heute gebräuchlichen Werte für die Strahloffnung (inklusive konische Suchbewegung) liegen im Bereich von $2\ldots 10^\circ$.

2.2 Wettereinflüsse

2.2.1 Dämpfung

Radarwellen werden bei ihrer Ausbreitung durch die atmosphärischen Gase und den Wasserdampfgehalt der Luft etwas gedämpft. Diese Dämpfung ist sehr frequenzabhängig und bei den kurzen Wellenlängen stärker ausgeprägt. Nebel, Wolken, Regen, Schnee und Hagel erhöhen diese Dämpfung. Die Wirkung auf das Radargerät besteht in einer Herabsetzung der Echoenergie und damit einer Reichweitenverminderung. Sie kann durch entsprechend stärkere Senderleistung ausgeglichen werden.

2.2.2 Streuung

Treffen die Mikrowellen bei ihrer Ausbreitung auf Niederschlagsteilchen, wie Regentropfen, Hagelkörner oder Schneeflocken, so werden sie an diesen Objekten gestreut, d. h. die Teilchen strahlen als neue Wellenzentren Mikrowellenenergie aus, sie ergeben Echos wie das verfolgte Flugziel. Die Summe dieser Teilchenechos kann grösser sein als das Ziellecho und die Erkennung und Verfolgung eines Flugzeuges erschweren oder verunmöglichen. Eine Erhöhung der Sendeleistung hilft in diesem Falle nichts, da die Störenchos im gleichen Masse wie das Nutzecho zunehmen.

Der Streuquerschnitt der Niederschlagsteilchen hängt von ihrer stofflichen Beschaffenheit ab (Eis, Schnee, Wasser), aber noch in weit stärkerem Masse von ihrer Grösse bezogen auf die Wellenlänge. Solange die Teilchen sehr klein sind gegen die Wellenlänge, gilt die Rayleighsche Streuformel, die aussagt, dass der Streuquerschnitt runder Teilchen mit der sechsten Potenz des Verhältnisses Durchmesser

zu Wellenlänge zunimmt. Diese sehr starke Abhängigkeit der Streuung von der Teilchengrösse ist der Grund, dass Nebel und Wolken ausser auf Millimeterwellen keine messbaren Radarechos ergeben. Bildet sich beispielsweise aus Wolkenteilchen von 10 μm Durchmesser ein Regentropfen von 1 mm Durchmesser, so reflektiert dieser 10⁶mal stärker als die Gesamtheit der Wolkenteilchen, aus denen er sich gebildet hat.

Die häufig auf Radarschirmen beobachteten «Wolkenechos» sind Echos von Niederschlagsteilchen in diesen Wolken. Diese Teilchen erreichen den Boden viel später und bei starkem Wind weit von der Stelle der ersten Beobachtung entfernt, so dass häufig in der Gegend der ersten Beobachtung kein Niederschlag beobachtet wird. Dies mag zu der Auffassung von «Wolkenechos» geführt haben.

Da die Niederschlagsteilchen regelmässig verstreut im Raum fallen, bestehen zwischen den Echos der einzelnen Teilchen keine geordneten Phasenbeziehungen, d. h. die Streuung ist inkohärent und die Gesamtstreuung einer gewissen Niederschlagsmenge entsteht durch Addition der Streuleistung aller Einzelstreuer. Man erhält daher den Streuquerschnitt einer gewissen Niederschlagsmenge durch einfache Summierung der Streuquerschnitte der einzelnen Teilchen und als Mass für die Streueigenschaften von Niederschlägen wird meist die Grösse Streuquerschnitt pro Volumeneinheit angegeben.

In Tabelle II sind einige Zahlenwerte für die Streuung von Regen verschiedener Niederschlagsdichte auf 3,2 cm und auf 10-cm-Wellen gegeben.

Als Vergleich mag dienen, dass die Rückstrahlquerschnitte von Flugzeugen (gleiche physikalische Definition wie der Streuquerschnitt von Teilchen) je nach Flugzeuggrösse und Lage etwa im Bereich von 1...100 m² liegen.

Streuquerschnitt in m²/km³ von Regen verschiedener Stärke bei einer Wellenlänge von $\lambda = 3,2 \text{ cm}$ und 10 cm

Tabelle II

Regenstärke (mm/h)		Streuquerschnitt [m ² /km ³]	
		$\lambda = 3,2 \text{ cm}$	$\lambda = 10 \text{ cm}$
schwach	(0,5)	25	0,32
mittel	(2)	210	2,5
stark	(4)	550	7
Platzregen	(16)	5000	50

Die das Ziel zudeckende Wirkung wird von jenen Echoanteilen verursacht, die gleichzeitig mit dem Zielecho eintreffen. Sie stammen von denjenigen Teilchen, die so nahe beim verfolgten Ziel liegen, dass sie vom Radar nicht mehr von diesem unterschieden werden können. Dies ist für Teilchen innerhalb des bereits definierten Auflösungsvolumens der Fall. Die darin enthaltene Niederschlagsmenge, und nur diese, trägt zur Verschleierung des Ziels bei. Steigerung des Auflösungsvermögens eines Radargerätes in Winkeln und Distanz verbessert damit auch dessen Unterscheidungsvermögen zwischen Ziel und Niederschlagsecho. Bei Annäherung eines Ziels an das Radargerät wird das Verhältnis Zielecho zu Niederschlagsecho immer besser, da die Zielfläche konstant bleibt, während das Auflösungsvolumen und damit die störende Niederschlagsmenge sich im gleichen Verhältnis wie der Strahlquer-

schnitt verringert. Die Reichweitenverkürzungen durch Niederschläge lassen sich aus Zielquerschnitt, Niederschlagsstärke und Radarauflösung einfach berechnen.

Basierend auf den Symmetrieeigenschaften der Regentropfen lässt sich durch die Verwendung zirkularpolarisierter Wellen das Verhältnis Regenecho zu Zielecho wesentlich verbessern.

2.3 Bodeneinflüsse und Standortwahl

2.3.1 Ziel in Bodennähe

Geländeteile, die vom Radarstrahl erfasst werden, aber auch Häuser, Türme, Masten geben Echos, die beim Suchen für Zielechos gehalten werden können und die das Verfolgen beeinträchtigen und im ungünstigsten Fall sogar unterbrechen können. Der Suchvorgang ist störempfindlicher als die Zielverfolgung, da der Strahl hiebei einen grossen Raumwinkel abtastet und gewöhnlich bis zum Boden herunter gesucht wird. Die Darstellungsweise der Suchindikatoren muss daher so gewählt sein, dass Flugziele gut von Geländeechoes unterschieden werden können. Diese Forderung ist beim RHI-Scope besonders gut erfüllt (Fig. 12). Die Flugziele erscheinen hier als Punkte über den Geländeechoes und können meist gut erkannt werden.

Bei der Zielverfolgung in Bodennähe gelten die im Abschnitt 1.4 angestellten Überlegungen. Solange bei der automatischen Verfolgung keine Bodenziele in das Auflösungsvolumen eintreten, wird diese nicht beeinflusst (Fig. 8). Durchlaufen kurzzeitig Störechoes das Auflösungsvolumen, wie dies beim Vorbeiflug an anderen Flugzeugen, an Türmen und Masten der Fall ist, so kann der Operateur die gefährliche Situation auf dem A-Scope frühzeitig erkennen und das Gerät mit «Gedächtnissesteuerung» über den gefährlichen Punkt steuern. In dieser Betriebsart werden die Radarfehlerspannungen ausgeschaltet, und die Servos laufen mit der zuletzt innegehabten Geschwindigkeit solange weiter, bis die schwierige Zone durchlaufen ist und der Radar wieder die Steuerung übernimmt. Fliegt das Ziel sehr niedrig, so dass dauernd Störzeichen vorhanden sind, so hilft bei entsprechend ausgerüsteten Geräten optische Winkelverfolgung mittels Richtfernrohr und Steuerknüppel. Die Distanz lässt sich meist auch noch unter sehr schwierigen Verhältnissen mittels Radar messen.

2.3.2 Einfluss einer vorgelagerten Bergkuppe

Ein Höhenzug zwischen Flugzeug und Radar wirkt als optische «Blende». Verdeckt der Höhenzug das Ziel, dann ist die Verfolgung unmöglich («Abschattung»). Erscheint das Ziel gerade über dem Hindernis, dann ist die Verfolgung ohne Winkelfehler möglich, jedoch mit etwas reduzierter Reichweite, da ein Teil der Hochfrequenzleistung abgeblendet wird. Ist das Flugziel so weit über dem Horizont, dass die erste Fresnelzone frei über das Hindernis wegeht, dann besteht praktisch kein Bodeneinfluss mehr (Fig. 16).

Die Fresnelzone ist nicht von der Antennenbündelung, sondern nur von Wellenlänge und Abständen abhängig. Sie hat die Form eines Rotationsellipsoïdes, in dessen Brennpunkten die Sendean-

tenne bzw. das verfolgte Ziel liegen und dessen erzeugende Ellipse der Beziehung gehorcht:

$$d_1 + d_2 = d + \lambda/2$$

d Abstand der Brennpunkte

d_1, d_2 Abstände eines Ellipsenpunktes von den Brennpunkten.

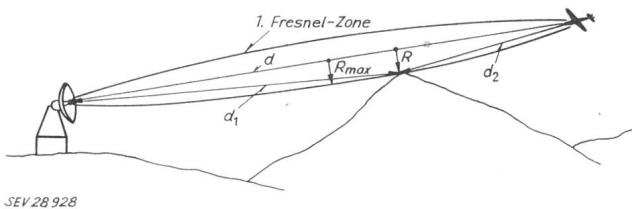


Fig. 16

Wirkung von vorgelagertem Höhenzug (1. Fresnelzone)
d Abstand Radar-Ziel; d_1 Abstand Radar-Berg; d_2 Abstand Berg-Ziel; R Abstand Strahlachse-Berg; R_{max} Grösster Querschnittsradius der ersten Fresnelzone

Der Radius eines Querschnittes ist angenähert:

$$R = \sqrt{\lambda \frac{d_1 d_2}{d}}$$

Der grösste Radius ergibt sich für $d_1 = d_2 \approx d/2$ zu:

$$R_{max} = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda d}$$

Beispielsweise wird für $d = 10$ km:

$$\begin{array}{ll} \text{bei } \lambda = 10 \text{ cm} & R_{max} = 16 \text{ m} \\ \text{bei } \lambda = 3 \text{ cm} & R_{max} = 9 \text{ m} \end{array}$$

Der Einfluss von vorgelagerten Höhenzügen verschwindet also rasch, sobald das Ziel darüber sichtbar wird.

2.3.3 Spiegelung

Wird eine in bezug auf die Wellenlänge als eben zu betrachtende Fläche streifend vom Radarstrahl getroffen, dann wird ausser der sich direkt ausbreitenden Welle eine reflektierte Welle gebildet, die mit der ersten interferiert und Messfehler im Höhenwinkel verursacht. Solche Erscheinungen treten über Wasserflächen oder relativ ebenem Boden auf. Der Bodenbereich für die Spiegelung der ersten Fresnelzone ergibt sich leicht aus dem Reflexionsgesetz als Schnittfigur des Fresnel-Ellipsoides mit der reflektierenden Fläche. Bei der Wahl der Gerätestandorte ist auf die Abschirmung dieses Bereiches Rücksicht zu nehmen, oder es sind in den ganz tiefen Lagen die Winkel optisch zu messen.

2.3.4 Standorteinflüsse

Neben der Bündelungsschärfe einer Radaranenne sind ihre Nebenstrahlungseigenschaften von Bedeutung. Nebenmaxima der Strahlungscharakteristik lassen sich nicht ganz vermeiden, sollen aber so klein wie möglich gehalten werden. Sie nehmen Echoleistung aus einer Seitenrichtung zur Strahlachse auf und verursachen damit eine Mehrdeutigkeit der Radarpeilung. Dadurch wird das Suchen erschwert und die Zielverfolgung beeinträchtigt.

Da von Geländezielen infolge ihrer grossen Ausdehnung im Vergleich zu Flugzielen oft die 10^4 -fache Echoleistung und mehr zurückgestrahlt wird, sollten die Nebenmaxima mindestens 20 db unter dem Hauptmaximum liegen, was für Senden und Emp-

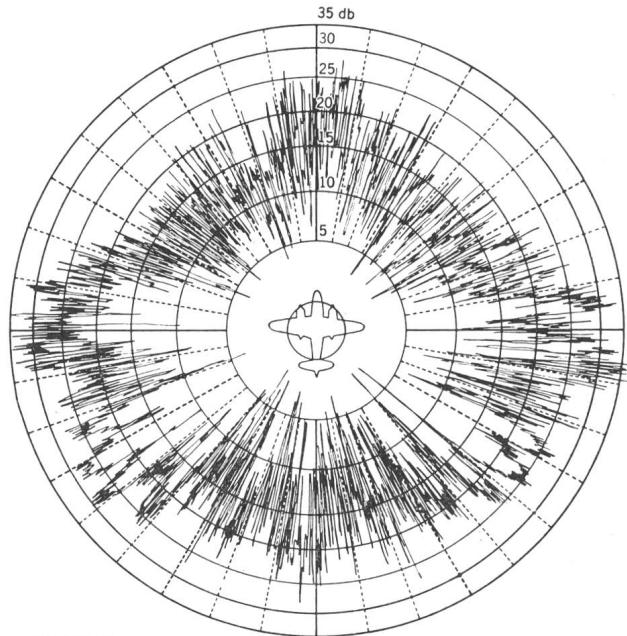
fang eine Dämpfung der Nebenzipfelleistung von 10^4 ergibt. In gebirgigem Gelände ist eine etwas höhere Nebenstrahlungsdämpfung erwünscht.

Durch zweckmässige Wahl des Gerätestandortes kann der Einfluss der Nebenstrahlung zusätzlich herabgesetzt werden. Gute Radarstandorte sind flache Muldenstellungen, die eine gewisse Nahabschirmung der Seitenmaxima bewirken und damit die Beleuchtung grosser Geländezeichen durch die Seitenstrahlung verhindern. Die in den freien Raum gehende Nebenstrahlung ist harmlos, da sie zu schwach ist, um Flugziele anzuzeigen [5].

2.4 Einflüsse des Ziels auf die Verfolgungs-genaugkeit

2.4.1 Eigenschaften der Radarziele

Bei der Radarverfolgung eines bewegten Objektes ist es erwünscht, eine möglichst genaue Bahnkurve frei von Schwankungsscheinungen zu erhalten. Diesem Wunsch steht das praktische Verhalten der meisten Radarziele entgegen. Die Zielobjekte haben meist Ausdehnungen von vielen Radarwellenlängen. Ihre Echos setzen sich aus Beiträgen der ganzen vom Strahl getroffenen Oberfläche zusammen. Diese Teilechos bilden durch Interferenz am Ort der Radarantenne das Zielecho und addieren sich oder löschen sich bei Gegenphase mehr oder weniger aus. Demgemäß weisen Flugziele ein kompliziertes Rückstrahl-Diagramm auf, bei dem sich Maxima und Minima sehr rasch folgen. Fig. 17 zeigt ein an einem



SEV 28929
Fig. 17
Rückstrahldiagramm eines amerikanischen Bombenflugzeuges in der Horizontalebene
(nach [6] S. 76)

amerikanischen Bomber in der Horizontalebene gemessenes Rückstrahldiagramm [6]. Variationen von Zehntels-Winkelgraden in der Einfallsrichtung lassen die Echostärke um Größenordnungen schwanken. Winkelschwankungen in dieser Grösse treten beim Flug aber dauernd auf, so dass die Radarechos von Flugzielen stets starke und sehr rasche Schwankungen zeigen. Die relative Grösse dieser Amplitu-

denschwankungen ist von der Entfernung des Ziels unabhängig.

Aber auch die Einfallsrichtung der Zielechos ist nicht konstant. Je nach Winkellage des Flugkörpers ist bald die Rückstrahlung von diesem, bald von jenem Teil überwiegend und entsprechend scheint das Radarecho von diesen Teilen auszugehen. Diese Winkelschwankungen der Radarechos sind jedoch, was nicht unmittelbar aus der Anschauung heraus verständlich ist, grösser als der Winkel, unter dem das Flugziel, vom Radar aus gesehen, erscheint. D. h. die Echos scheinen zuweilen von Punkten ausserhalb des Flugzieles her zu kommen. Dies merkwürdige Verhalten des Ziels wird durch spezielle Kombinationen von Phasen- und Amplitudenverhältnis der Teilreflektoren hervorgerufen, die eine solche Neigung der Phasenflächen der Echowelle verursachen, dass die Flächennormale zeitweise neben das Ziel zeigt. In Fig. 18 ist die Fehlweisung für ein Ziel, das aus nur 2 Teilreflektoren im Abstand L besteht, in Funktion der relativen Phasenlage und des Amplitudenverhältnisses der Reflektoren dargestellt. Man erkennt, dass der Peilfehler mehrere Zielgrössen betragen kann, wenn die Reflektoren in Gegen-

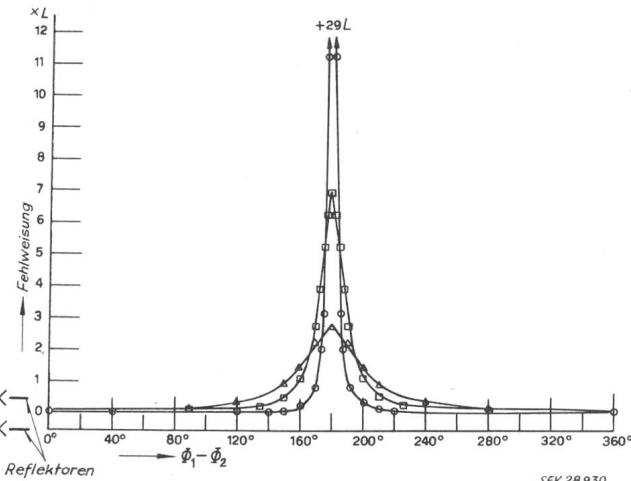


Fig. 18

Scheinbare Lage eines Zweireflektor-Zieltes in Funktion der Phasenlage der Reflektoren für 3 Amplitudenverhältnisse α
(nach [8] S. 860)

L Abstand der Reflektoren; $\phi_1 - \phi_2$ Phasenunterschied

- $\alpha = 0,966$
- $\alpha = 0,866$
- △ $\alpha = 0,682$

phase sind und nahezu die gleiche Amplitude aufweisen, d. h. wenn fast vollständige Auslöschung auftritt. Dieser interessante Zusammenhang, dass die Winkelfehler dann ihren grössten Wert erreichen, wenn die Amplituden am kleinsten sind, gibt wertvolle Hinweise für die Signalauswertung.

Bei praktisch vorkommenden Zielen besteht eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Lage des scheinbaren Reflexionspunktes, deren Fläche etwas grösser ist als die Zielfläche. Bei den kleinen Kurschwankungen und Stabilisierungsbewegungen des Fluges tanzt der scheinbare Reflexionspunkt mit grosser Schnelligkeit im ganzen Bereich dieser Wahrscheinlichkeitsverteilung umher, so dass die eintreffenden Echosignale eine Winkelmodulation aufweisen, deren Frequenzspektrum etwa demjenigen der Amplitudenmodulation entspricht. Fig. 19 zeigt die an einem Flugzeug gemessene Wahrschein-

lichkeitsverteilung für die Schwankungsamplituden des Seitenwinkels. Es ist aus der Messung klar zu erkennen, dass Winkelschwankungen der Echosignale auftreten, die über die Flugzeugbreite hinausgehen.

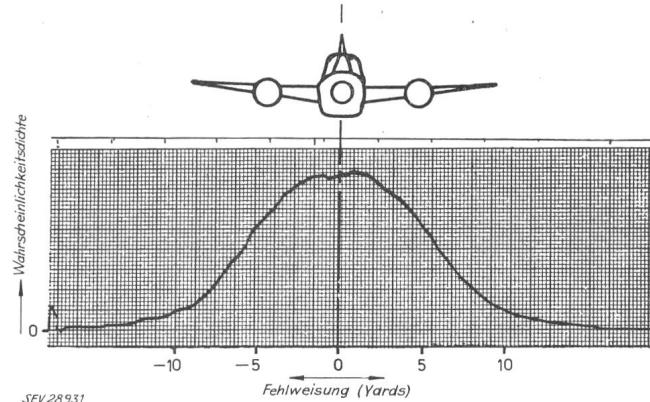


Fig. 19

Wahrscheinlichkeitsverteilung für Messung des Seitenwinkels
(gemessen an einem Flugzeug; nach [8] S. 863)

Das Verhältnis: Fläche der Wahrscheinlichkeitsverteilung zu Zielfläche eines Radarzieles ist unabhängig von der Distanz vom Radargerät. Daher nimmt mit wachsender Zieldistanz D der Betrag der Winkelmodulation wie $1/D$ ab.

2.4.2 Radarverhalten bei Doppelzielen

Einen für die Anwendung interessanten Fall bildet das Verhalten der Radargeräte bei Auftreten von Doppelzielen. Solange die Ziele bezogen auf die Bündelung des Radarstrahles eng beieinander liegen, wirken sie wie ein entsprechend grosses Ziel, und die Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Winkelmessung erstreckt sich über den ganzen Bereich der beiden Ziele und darüber hinaus, d. h. das Gerät pendelt zwischen den Zielen. Bei einem Abstand in der Grössenordnung der Strahlöffnung zeigt das Radargerät mehr und mehr die Tendenz, nur eines der beiden Ziele zu verfolgen, wie das in Fig. 20 darge-

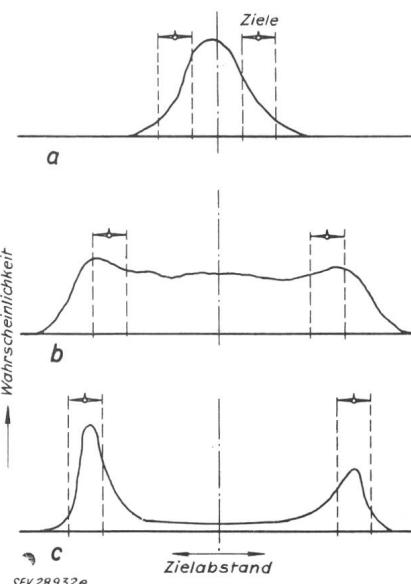


Fig. 20
Wahrscheinlichkeitsverteilung für Seitenwinkelmessung bei Doppelziel und verschiedenen Zielabständen

(nach [8] S. 859)

Zielabstand gemessen in Strahlbreiten
a 0,3 Strahlbreiten; b 0,75 Strahlbreiten; c 0,85 Strahlbreiten

stellt ist, und geht schliesslich zu stabiler Verfolgung eines Ziels über.

Diese Überlegungen gelten natürlich nur für den Fall, dass beide Ziele etwa gleiche Distanz vom Radargerät haben und in das Distanzfenster fallen. Auch die Distanzverfolgung zeigt dann das gleiche unschlüssige Verhalten in bezug auf die beiden Ziele. Fällt ein Ziel ausserhalb des Distanzfensters, so hört seine Wirkung sofort auf und es wird das andere Ziel unbeeinflusst verfolgt.

2.5 Wirkung der Echoschwankungen von Einzelzielen auf das Radargerät

Die Amplituden- und Winkelschwankungen der Zielechos bewirken Schwankungen des Radargerätes bei der Zielerfassung. Je nach Radarsystem, Zielcharakter und Distanz sind die Amplituden- oder die Winkelfluktuationen von grösserem Einfluss.

Bei Zielerfassung nach dem Prinzip des konischen Abtastens werden aus der Amplitudenmodulation der eintreffenden Zielechos die Fehlerspannungen für die Winkelverfolgung gebildet. Der Nutzmodulation durch die Abtastbewegung des Strahles überlagern sich als Störmodulation die Amplitudenschwankungen des Ziels und verursachen durch die Frequenzanteile, die in den Bereich der Abtastfrequenz fallen, ein Schwanke der Fehlerspannungen und damit der Zielerfassung.

Das Monopuls-System ist gegen die Amplitudenschwankungen der Echos unempfindlich, da es die Winkelinformation nicht aus einem zeitlich nacheinander erfolgenden Abtasten des Ziels gewinnt, sondern jeden Impuls gleichzeitig mit verschiedenen Antennencharakteristiken betrachtet und aus den Verhältnisanteilen die Winkelinformation ableitet.

Bezüglich der Winkelschwankungen der eintreffenden Echos unterscheiden sich die Radarsysteme nicht. Jede Peilung bezieht sich auf die Phasenfläche der Welle und vermutet die Strahlungsquelle auf der Normalen zu dieser Fläche. Dass diese Voraussetzung bei komplizierten Zielen nicht jederzeit exakt erfüllt ist, kann auf der Radarseite nicht korrigiert werden. Da jedoch das Ziel im Mittelpunkt der Winkelschwankungen liegt, schwankt auch die Radarpeilung um den richtigen Wert, und die Messung wird durch zeitliche Mittelung zunehmend genauer. Durch richtige Bemessung der Bandbreite der Verfolgungs-Servos kann man erreichen, dass das Radargerät den schnellen Winkelschwankungen nicht mehr zu folgen vermag, wohl aber den Bewegungen des Ziels. Schränkt man die Bandbreite weiter ein, so wird eine immer ruhigere und genauere Verfolgung bei Geradeflug erzielt; es treten aber bei Beschleunigungen des Ziels, z. B. Kurvenflug, grössere Fehler auf. Da die Amplitudenschwankungen distanzunabhängig sind, während die Winkelschwankungen mit wachsender Zielentfernung abnehmen, überwiegen bei grossen Entfernung die Amplitudenschwankungen. In diesem Bereich weist ein Monopuls-Radar wegen seiner Unabhängigkeit gegen Amplitudenschwankungen Vorteile gegen ein Gerät mit konischer Abtastung auf, und der beträchtliche Mehraufwand macht sich bezahlt.

Es wurden hierüber im U. S. Naval Research Laboratory jahrelange eingehende Untersuchungen

durchgeführt und kürzlich in den Arbeiten von Dunn, Howard und King veröffentlicht [7; 8].

Fig. 21 zeigt den Verlauf der Schwankungseinflüsse in Funktion der Zieldistanz. Zu den Schwankungen, die vom Ziel verursacht werden, kommen noch Störungen durch Unvollkommenheiten der Servoantriebe und der Einfluss des Empfängerrauschens. Die Servoeinflüsse sind distanzunabhängig, während der Einfluss des Empfängerrauschens bei

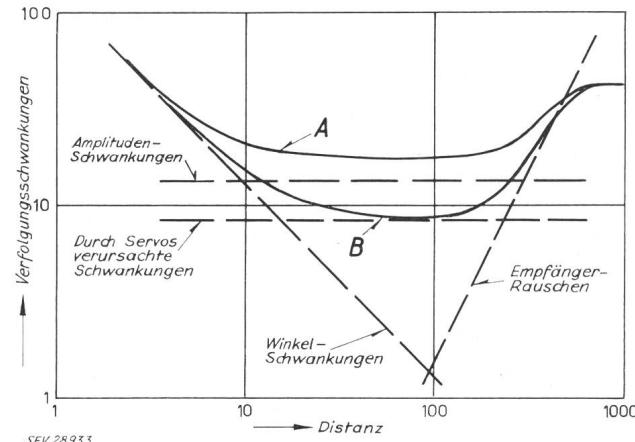


Fig. 21
Verlauf der Radar-Verfolgungsschwankungen und
Schwankungsursachen in Funktion der Distanz
(nach [8] S. 858)

A Radar mit konischer Abtastung; B Monopuls-Radar

abnehmender Echoamplitude überhand nimmt und am Ende des Distanzbereiches die Schwankungen bestimmt. Kurve A zeigt den Verlauf für ein konisch abtastendes Radargerät, dessen Schwankungen nicht unter den Wert sinken können, der durch die Echo-Amplitudenschwankungen gegeben ist. Kurve B gilt für Monopuls-Radar. Bei verschwindenden Echo-Winkelschwankungen gehen die Schwankungen von Monopuls-Radar bis auf den durch die Qualität der Servos gegebenen Wert zurück.

Von welcher Distanz an das Monopuls-System überlegen ist, hängt von der Zielgröße ab. Bei Distanzen, die etwa das 2000...3000fache der grössten Zielabmessung betragen, liegen die vom Ziel ausgehenden Winkelschwankungen in der Größenordnung von einigen Zehntels-Winkelpromille. Es ist zu erwarten, dass von diesen Distanzen an aufwärts das Monopuls-System zunehmende Überlegenheit zeigt.

Literatur

- [1] Rhodes, D. R.: Introduction to Monopulse. New York: McGraw-Hill 1959. Kap. 1.4: Early Monopulse Radar Systems, S. 12...19.
- [2] Page, R. M.: Monopulse Radar. IRE Convention Rec. Bd. 3 (1955), Part 8, S. 132...134.
- [3] Braun, A. F.: «Fledermaus», ein radargesteuertes, vollautomatisches Feuerleitgerät. Flugwehr u. Techn. Bd. 19(1957), Nr. 10, S. 268...271; Nr. 11, S. 303...307.
- [4] Braun, A. F.: Der Einfluss der Witterung auf die Reichweite von Radargeräten. Albiswerk-Ber. Bd. 6(1954), Nr. 2, S. 38...52; Bd. 7(1955), Nr. 1, S. 16...25.
- [5] Braun, A. F.: Feuerleitradar für schweizerische Verhältnisse. Flugwehr u. Techn. Bd. 19(1957), Nr. 7, S. 184...186.
- [6] Ridenour, L. N.: Radar System Engineering. MIT Rad. Lab. Ser. Bd. 1. New York, London: McGraw-Hill 1947. Kap. 3, Sekt. 9: Actual Complex Targets, S. 76.
- [7] Dunn, J. H. und D. D. Howard: The Effects of Automatic Gain Control Performance on the Tracking Accuracy of Monopulse Radar Systems. Proc. IRE Bd. 47(1959), Nr. 3, S. 430...435.
- [8] Dunn, J. H., D. D. Howard und A. M. King: Phenomena of Scintillation Noise in Radar-Tracking Systems. Proc. IRE Bd. 47(1959), Nr. 5 (Part I), S. 855...863.

Adresse des Autors:

Dr. sc. techn. A. F. Braun, Albiswerk Zürich AG, Albisriederstrasse 245, Zürich 9/47.