

# Radartutorial

## Buch 1 „Radargrundlagen“

Die vorliegende Ausbildungshilfe ist eine Zusammenfassung des ersten Kapitels der Internetpräsentation „Radargrundlagen“ auf [www.radartutorial.eu](http://www.radartutorial.eu). (Stand: 08.04.2012)

### Inhaltsverzeichnis:

Radartutorial.....	1
Lernziele: .....	1
Vorwort .....	2
Geschichtlicher Überblick .....	2
Prinzip eines Radargerätes .....	4
Signalablauf.....	4
Zeitsteuerung eines Radargerätes.....	5
Impulsfolgefrequenz.....	5
Tastverhältnis (Duty Cycle) .....	5
Richtungsermittlung eines Zieles .....	6
Winkelübertragung.....	6
Messung des Höhenwinkels .....	7
Berechnung der Zielhöhe.....	7
Entfernungsbestimmung .....	8
Herleitung der Formel zur Entfernungsbestimmung .....	8
Maximale Messentfernung .....	9
Radargleichung .....	11
Herleitung der Radargleichung .....	11
Einflüsse auf die Reichweite einer Radaranlage .....	14
Die Radargleichung in der Praxis.....	14
Sendeleistung .....	14
Empfängerempfindlichkeit.....	15
Antennengewinn .....	15
Mehrfrequenzradargeräte (Frequenz-Diversity) .....	16
Arbeitsprinzip .....	16
Aufgaben der Baugruppen .....	16
Zusammenfassung Frequenz-Diversity:.....	17
Wissenstest.....	18

### **Lernziele:**

Die hier genannten Lernziele sollen einen Überblick über die zu erwartenden Themen in diesem Kapitel geben. Das Kapitel „Radargrundlagen“ vermittelt die Basiskenntnisse zum Verständnis der folgenden Kapitel über spezielle Radarbaugruppen. Es ist dafür vorgesehen, Hintergrundwissen zum Radarprinzip, der Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen, zu den Radarsignalen, zum Auflösungsvermögen und der Radargrundgleichung zu vermitteln. Am Ende dieses Kapitels sollte der Lernende die Grundlagen des Radars kennen und die wichtigsten Leistungsparameter eines Primärradargerätes bewerten können. Er sollte

- das Prinzip des Impuls-Doppler-Radarverfahrens erklären können;
- die Begriffe Schrägentfernung, Seiten- und Höhenwinkel ein einem Radarsystem definieren können;
- die Einflüsse von Impulsdauer, Impulsleistung und Antennendiagramm auf die Leistung eines Radarsystems kennen;
- die Einflussfaktoren auf die Genauigkeit der Ortung kennen;
- die Vorteile eines Mehrfrequenzradargerätes beschreiben;
- an Hand eines einfachen Blockschaltbildes die Hauptbaugruppen eines Radargerätes und deren Zusammenwirken beschreiben können.

## Vorwort

Das Arbeitsprinzip der Radargeräte ist einfach zu verstehen, obwohl die theoretischen Grundlagen recht komplex sind. Trotzdem ist auch das Verständnis der Theorie eine Grundlage dafür, Radargeräte effektiv zu nutzen und zu bedienen. Der Aufbau und die Bedienung eines Radargerätes berühren viele technische Disziplinen angefangen vom Bauingenieurwesen, über Mechanik und Elektroinstallation bis zur Hochfrequenztechnik und Datenverarbeitungssystemen.

Beginnend mit der Physik haben einige Naturgesetze hier eine besondere grundlegende Bedeutung. Für die Arbeit eines jeden Radargerätes wirken drei grundlegende physikalische Gesetzmäßigkeiten:

1. Die **geradlinige Ausbreitung** der elektromagnetischen Wellen.  
Bei der Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen im Frequenzbereich der Radargeräte geht man von einer geradlinigen Ausbreitung aus.
2. Deren **konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit**.  
Die elektromagnetischen Wellen breiten sich mit annähernder Lichtgeschwindigkeit aus. Ob hier mit der Geschwindigkeit  $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  oder mit  $300\,000 \text{ km/s}$ , oder ob die Lichtgeschwindigkeit sehr genau mit  $299\,792\,458 \text{ m/s}$  angegeben wird, ist eigentlich egal, man sollte nur immer die gleiche Größe benutzen.
3. Die **Reflexion** elektromagnetischer Wellen.  
Wenn diese Wellen auf einen elektrisch leitenden Körper treffen, werden sie reflektiert. Wird die reflektierte Welle am Ursprungsort (als „Echo“) wieder registriert, ist das ein Beweis dafür, dass sich in Ausbreitungsrichtung ein Hindernis befindet.

Man spricht von bei der Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen von quasioptischen Eigenschaften, das heißt, die elektromagnetischen Wellen verhalten sich ähnlich wie das Licht. Natürlich gibt es auch hier Effekte, die von der Optik bekannt sind, wie Beugung, Brechung und Reflexion. Davon haben aber die Beugung und Brechung vorerst nur untergeordnete Bedeutung.

## Geschichtlicher Überblick

Die Entdeckung und Entwicklung der Radartechnik kann sich weder ein einzelner Staat noch eine einzelne Person für sich verbuchen. Man muss sie eher als eine Anhäufung vieler Entwicklungen und Verfeinerungen ansehen, an denen Wissenschaftler mehrerer Nationen parallel Anteil hatten. In der Vergangenheit gibt es dennoch einige Meilensteine, mit der Entdeckung bedeutender Grundkenntnisse und wichtige Erfindungen:

**1865** Der schottische Physiker **James Clerk Maxwell** stellt seine elektromagnetische Lichttheorie auf (Beschreibung der elektromagnetischen Wellen und ihrer Ausbreitung)

**1886** Der deutsche Physiker **Heinrich Rudolf Hertz** entdeckt die elektromagnetischen Wellen und weist damit die Maxwell'sche Theorie nach.



Abb. 1: Wandgemälde aus der Technischen Schule der Luftwaffe 1 (Kaufbeuren) schön zeigend: auch damals stand die Verwaltung im Vordergrund!

- 1904** Der deutsche Hochfrequenztechniker **Christian Hülsmeier** erfindet das „Telemobiloskop“ zur Verkehrsüberwachung auf dem Wasser. Er misst die Laufzeit elektromagnetischer Wellen von einem Metallgegenstand (Schiff) und zurück, eine Berechnung der Entfernung ist damit möglich. Dies ist der erste praktische Radarversuch, Hülsmeier meldet seine Erfindung zum Patent an.
- 1921** Erfindung des Magnetrons als leistungsfähige Senderöhre durch **Albert Wallace Hull**
- 1922** **A. H. Taylor** und **L.C.Young** vom Naval Research Laboratory (USA) orten erstmals ein hölzernes Schiff.
- 1930** **L. A. Hyland**, ebenfalls vom NRL (USA), ortet erstmals ein Luftfahrzeug.
- 1931** Ein Schiff wird mit Radar ausgerüstet. Als Sende- und Empfangsantennen werden Parabolantennen mit Hornstrahlern eingesetzt.
- 1936** Entwicklung des Klystrons durch **Metcalf** und **Hahn**, das als Verstärker oder Oszillator Verwendung findet.
- 1939** Zwei Physiker an der Universität von Birmingham in England, **John Randall** und **Henry Boot**, entwickelten ein leichtes, aber leistungsfähiges Mikrowellenradar und bauten es in einen B-17 Bomber ein. Das brachte die Wende im U-Boot-Krieg.
- 1940** Unterschiedliche Radaranlagen werden in den USA, Russland, Deutschland, Frankreich und Japan entwickelt.

Der Gedanke, elektromagnetische Wellen zur Ortung von Schiffen auszunutzen, ist bereits 1904 von dem Düsseldorfer Ingenieur Christian Hülsmeier in Deutschland und England als Patent angemeldet worden.

Am 30. April 1904 wurde beim kaiserlichen Patentamt unter der Nr. 165 546 das von Christian Hülsmeier entwickelte „Verfahren, um entfernte metallische Gegenstände mittels elektrischer Wellen einem Beobachter zu melden“, patentiert.

In der Patentschrift findet man die Abbildung eines Dampfers, der mit Hilfe der Rückstrahlung ein entgegenkommendes Schiff feststellt. Auf dem Rhein durchgeführte Versuche hatten im Prinzip die Brauchbarkeit des Verfahrens ergeben.

Zusätzlich zu diesem „Telemobiloskop“ (Fernbewegungsseher) wurde Hülsmeier ein Patent über die Entfernungsmessung erteilt. Diese Patente wurden auch in England und Frankreich erteilt.

Angetrieben durch allgemeine Kriegsgeschichte und durch die Entwicklung der Luftwaffen zu bedeutenden Leistungsträgern, erfährt die Radartechnik während des 2. Weltkrieges einen starken Entwicklungsschub und wird während des „kalten Krieges“ in großen Stückzahlen entlang der innerdeutschen Grenze eingesetzt.

Nach dem 2. Weltkrieg wird das Radarverfahren in damals sogenannter „Friedensverwendung“ eingesetzt. Heute ist eine zivile Nutzung von Radaranwendungen zum Alltag geworden.



Abb. 2: Aus der Patentschrift von Christian Hülsmeier



Abb. 3: Würzburg-Riese, ein deutsches Radargerät aus dem 2. Weltkrieg (Exponat in Greding auf dem Kalvarienberg)

## Prinzip eines Radargerätes

Das folgende Bild zeigt stark vereinfacht das Prinzip eines Radargerätes.

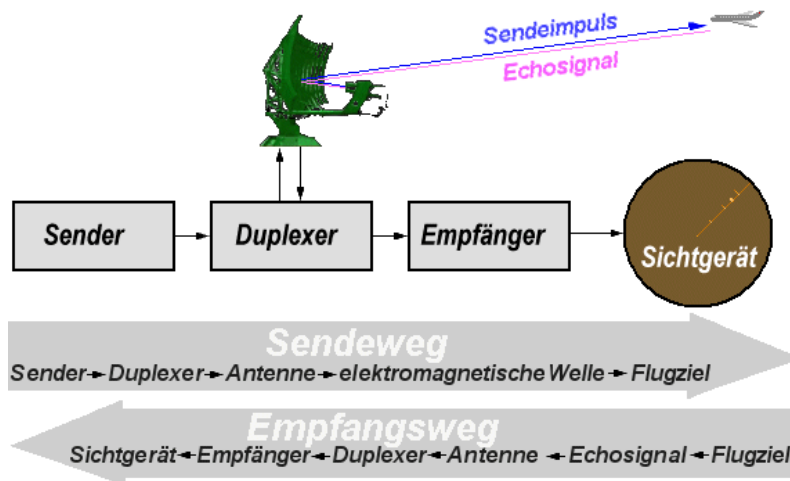


Abb. 4: Prinzip eines Radargerätes

### Signalablauf

1. Ein leistungsfähiger **Sender** erzeugt eine hochfrequente Schwingung.
2. Der **Duplexer** (ein Sende- Empfangsumschalter) leitet zur Sendezeit die hochfrequente Energie zur **Antenne**, zur Empfangszeit leitet er die schwachen Echosignale zum Empfänger.
3. Die **Radarantenne** strahlt die Impulse der Sendeleistung ab.
4. Die **elektromagnetische Welle** breitet sich mit annähernder Lichtgeschwindigkeit aus.
5. An einem Hindernis (hier ein **Flugzeug**) wird ein Teil der Energie reflektiert.
6. Das **Echo** breitet sich ebenfalls mit Lichtgeschwindigkeit aus und erreicht die Antenne.
7. Die **Antenne** empfängt in der Zeit zwischen den Sendepulsen die Echosignale.
8. Der **Duplexer** schaltet in der Empfangszeit die Antenne an den Empfängereingang.
9. Ein hochempfindlicher **Empfänger** verstärkt die Echosignale und verarbeitet diese hochfrequenten Signale zu einem Videosignal um.
10. Der **Radarschirm** zeigt die aus den Echosignalen erzeugten Videoimpulse maßstabsgerecht an.

Die Reflexion an den Flugzeugen geschieht diffus, das heißt, es wird in viele verschiedene Richtungen reflektiert. Das in Richtung des Radargerätes reflektierte Echosignal wird oft mit dem englischen Begriff Backscatter bezeichnet. Die Radarinformationen werden traditionell auf einem PPI-Sichtgerät (**PPI – Plan Position Indicator**) dargestellt, jedoch gibt es auch modernere Sichtgeräte. Das PPI-Sichtgerät zeigt einen rotierenden Auslenkstrahl von der Mitte des Bildschirms zum Rand und zeigt somit Entfernung und Seitenwinkel des georteten Zieles an.

Das elektronische Prinzip von Radargeräten arbeitet ähnlich wie das in der Akustik zu beobachtende Echo einer Schallwelle. Erfolgt am Ursprungsort ab Beginn der Aussendung eines hochfrequenten Impulses eine Zeitmessung bis zum Eintreffen der Reflexion, so lässt sich mit der bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit der Abstand zwischen Ursprungsort und Hindernis errechnen.

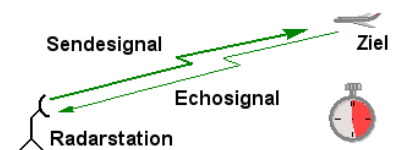


Abb. 5: Das Radarprinzip: eine Laufzeitmessung

Werden die Wellen stark richtungsmäßig gebündelt, so lässt sich zusätzlich die Richtung, in der sich der Gegenstand befindet, bestimmen. Mit den Werten Entfernung und Richtung ist die Position des Gegenstandes bezogen auf den Ursprungsort, eindeutig ermittelt.

Geräte, die diese Positionsermittlung mittels elektromagnetischer Wellen vornehmen, nennt man RADAR- Geräte. Hierbei handelt es sich um ein aus dem englischen Sprachraum stammendes Kunstwort:

## RADio (Aim) Detecting And Ranging <sup>1</sup>

### Zeitsteuerung eines Radargerätes

Bei Radargeräten, deren Sender und Empfänger am gleichen Standort betrieben werden, bietet es sich an, dass die Antenne wie in Abb. 4 gezeigt sowohl zum Senden als auch zum Empfangen verwendet wird. Das wird auch dadurch begünstigt, dass die Sende- und Empfangszeit streng getrennt sind.

### Impulsfolgefrequenz

Die Impulsfolgefrequenz (engl.: **P**ulse **R**epetition **F**requency **PRF**) eines Radargerätes ist die Anzahl der gesendeten Impulse pro Sekunde.

Das Radargerät sendet einen kurzen hochfrequenten Impuls mit der Sendeimpulsdauer  $P_w$  (engl.: **P**ulse **W**idth) und wartet zwischen den Sendeimpulsen auf die Echosignale. Die Zeit vom Beginn des einen Sendeimpulses bis zum Beginn des nächsten Sendeimpulses wird Impulsfolgeperiode (engl.: **P**ulse **R**epetition **T**ime **PRT**) genannt und ist der Kehrwert der Impulsfolgefrequenz:

$$PRT = \frac{1}{PRF} \quad \begin{array}{l} PRT = \text{Pulse Repetition Time} \\ PRF = \text{Pulse Repetition Frequency} \end{array} \quad (1)$$

Die Zeit zwischen den Sendeimpulsen ist allgemein die Empfangszeit. Diese ist immer kleiner als die Differenz zwischen der Impulsfolgeperiode und der Sendezeit und wird manchmal zusätzlich begrenzt durch eine so genannte Totzeit. In der Totzeit vor dem nächsten Sendeimpuls werden bei modernen Radargeräten Systemtests durchgeführt.

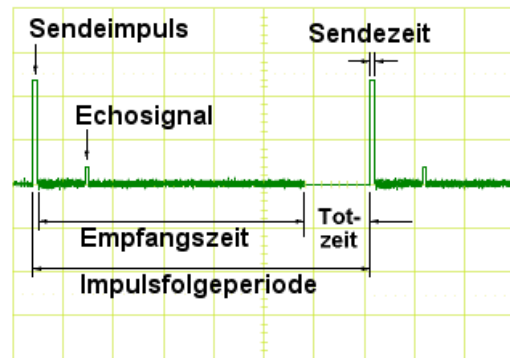


Abb. 6: Zeitsteuerung eines Radargerätes

### Tastverhältnis (Duty Cycle)

Das Tastverhältnis eines Radargerätes (engl. duty cycle) gibt das Verhältnis der Länge des eingeschalteten Zustands (Impulsdauer) zur Periodendauer bei einem Rechtecksignal an.

Mit nebenstehender Proportion kann jeweils zwischen Impulsleistung (engl.: peak power) und Durchschnittsleistung (engl.: average power) umgerechnet werden.

Bei Radargeräten wird die meist die Pulsleistung angegeben, da diese in die Radargleichung eingesetzt werden muss. Diese Leistung wird aber nur für einen sehr kurzen Zeitraum erzeugt, während des Sendeimpulses mit der Pulsweite  $P_w$ . Um diese Leistung dann auch reell messen zu können, werden Powermeter eingesetzt, die auf Grund ihrer relativ frequenzunabhängigen Arbeitsweise (thermische Auswertung der Leistung), nur eine Durchschnittsleistung messen können. Die Stromversorgungsanlage für

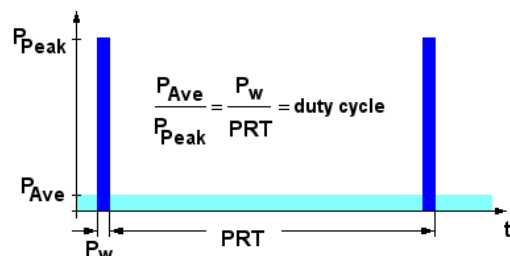


Abb. 7: Tastverhältnis eines Radargerätes

<sup>1</sup> Etwa während der Zeit des Zweiten Weltkrieges wurde das Wort „Aim“ (Flugziel) eingefügt. Später wurde es aber wieder weggelassen, da RADAR ja nicht nur Flugziele betrifft.

den Sender muss durch die kapazitive Speicherung im Modulator auch nur etwas mehr als die Durchschnittsleistung zur Verfügung stellen.

In den oft englisch- sprachigen Büchern über Radargeräte wird oft auch der Begriff duty cycle benutzt. Duty cycle ist das Produkt von der Impulsfolgefrequenz und der Pulslänge und somit auch das Verhältnis von der Sendezeit zur PRT.

## Richtungsermittlung eines Zieles

Eine Bestimmung des Seiten- und Höhenwinkels des Zieles ist durch die Bündelung der gesendeten und empfangenen Energie durch die Antenne möglich. Diese Bündelung ist ein richtungsabhängiger Antennengewinn. Eine Antenne mit einer hohen Bündelung wird auch Richtantenne genannt. Die Winkelmessung wird dadurch möglich, dass die Antenne genau in die Richtung zeigen muss, aus der sie das Echosignal empfängt. Diese Winkel können als Höhen- und Seitenwinkel am Antennendrehtisch gemessen werden. Die Genauigkeit ist ein Maß der Richtwirkung bzw. des Antennengewinns und nimmt mit der steigenden geometrischen Antennengröße zu.

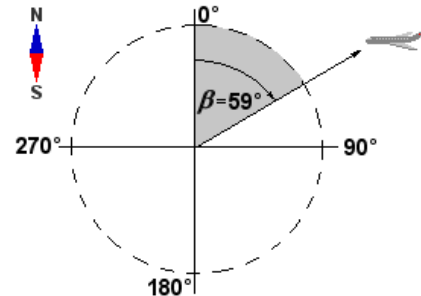


Abb. 8: Messung einer Richtung

Radargeräte arbeiten meist mit sehr hohen Frequenzen. Gründe dafür sind:

- die geradlinige quasioptische Ausbreitung dieser Wellen,
- die hohe Auflösung (je kleiner die Wellenlänge ist, um so kleinere Gegenstände können voneinander unterschieden werden), und
- je höher die Frequenz, desto kleiner kann bei gleichem Antennengewinn die Antenne sein.

Radarantennen drehen sich im Regelfall horizontal, um die Radarerfassung auf eine große Fläche auszudehnen. Dieser Drehbewegung werden Winkelwerte von 0° bis 360° zugeordnet. Die Bezugsrichtung ist geografisch Nord mit einem (Seiten-)Winkel von 0°. Die Erhöhung des Seitenwinkels erfolgt im Uhrzeigersinn (Drehrichtung einer rundumsuchenden Antenne). Der Seitenwinkel kann auch im Uhrzeigersinn relativ zum eigenen Kurs dargestellt werden. Dies ist eine auf Schiffen oder in Flugzeugen häufig gewählte Art der Darstellung. Die Volle Umdrehung entspricht einem Winkel von 360°. Der häufig benutzte englische Begriff für Seitenwinkel lautet Azimuth (Az). Seitenwinkel werden durch die Winkelübertragung von der Antenne zum Sichtgerät übertragen.

Zur genauen Bestimmung des Seitenwinkels ist eine genaue Vermessung der Nordrichtung nötig. Ältere Radargeräte müssen deshalb entweder magnetisch oder nach bekannten Geländepunkten geografisch aufwändig eingemessen werden. Modernere Radargeräte übernehmen diese Aufgabe selbst und bestimmen mit Hilfe der GPS- Satelliten die Richtung geografisch Nord selbst.

## Winkelübertragung

Die Winkelübertragung drehender Antennen kann mittels:

- Servofolgesystem oder dem
- Azimuth- Impulszählverfahren vorgenommen werden.

Während das Servofolgesystem nur in älteren analogen Radargeräten durch ein System von Drehmeldegebern und Drehmeldeempfängern verwendet wird, hat das Verfahren der Azimuth-Change-Pulses sich in moderneren Geräten durchgesetzt. Neueste Radargeräte verzichten teilweise oder völlig auf eine mechanische Bewegung der Antenne. Hier erfolgt eine Zuordnung zum Seitenwinkel durch eine elektronisch gesteuerte Strahlschwenkung (Phased Array Antenne).

## Messung des Höhenwinkels

Der Höhenwinkel ist im Gegensatz zum Seitenwinkel ein vertikaler Winkel. Die Bezugsrichtung, 0° Höhenwinkel ist eine horizontale Linie in Ausbreitungsrichtung, beginnend an der Antenne. Meist wird der Höhenwinkel mit dem griechischen Buchstaben  $\varepsilon$  (Epsilon) bezeichnet.

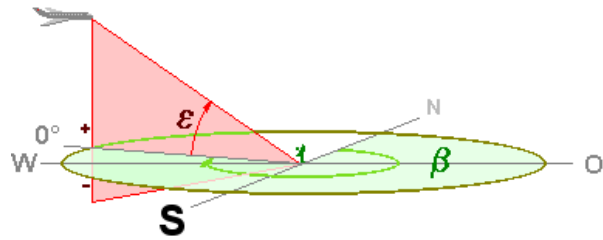


Abb. 9: Prinzip der Messung des Höhenwinkels

Der Höhenwinkel wird über dem Horizont (0° Höhenwinkel) positiv gezählt, unter dem Horizont negativ. Der englische Begriff für Höhenwinkel lautet Elevation ( $EI$ ).

## Berechnung der Zielhöhe

Unter Zielhöhe wird der Abstand eines Zieles über der Erdoberfläche (Höhe über Grund) verstanden. Der manchmal verwendete Begriff Altitude bezeichnet dagegen die Höhe über dem Meeresspiegel. Die Höhe wird mit dem Buchstaben  $H$  (engl.: Height) abgekürzt. Die Höhe kann aus der Zielentfernung  $R$  und dem Höhenwinkel  $\varepsilon$  berechnet werden.

$$\sin \varepsilon = \frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Hypotenuse}}$$

Mit  $R$  für die Hypotenuse und  $H$  für die Gegenkathete ergibt sich:

$$H = R \cdot \sin \varepsilon$$

Bezogen auf ein reelles Flugziel lässt sich die Zielhöhe jedoch nicht so einfach berechnen, da

- die elektromagnetischen Wellen in der Atmosphäre an den Luftschichtübergängen (unterschiedliche Dichte) eine Brechung erfahren und
- die Erdoberfläche eine Krümmung aufweist.

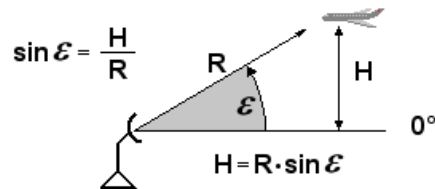


Abb. 10: Winkelbeziehung zur annähernden Höhenbestimmung

Beide Faktoren werden in Radaranlagen mit integrierter Höhenberechnung durch aufwändige Formeln ausgeglichen. Denn die Berechnung der Zielhöhe ist nicht nur eine Winkelfunktionsberechnung in einem Dreieck, sondern es muss auch die für den Standort geltende Erdkrümmung berücksichtigt werden:

$$H = R \cdot \sin \varepsilon + \frac{R^2}{2r_e} \quad \begin{array}{l} R = \text{Schrägentfernung des Zieles} \\ \varepsilon = \text{gemessener Höhenwinkel} \\ r_e = \text{Erdradius (ca.: 6370 km)} \end{array} \quad (2)$$

(Auch diese Formel ist nur eine Annäherung!)

In der Praxis unterliegt aber die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen auch noch einer Refraktion, das heißt, der Sendestrahl des Radargerätes ist keine geradlinige Seite dieses Dreiecks, sondern diese Seite wird zusätzlich auch noch gekrümmt in Abhängigkeit von:

- der Sendefrequenz;
- des atmosphärischen Druckes;
- der Lufttemperatur und
- der Luftfeuchtigkeit.

Für eine annähernde Berechnung einer Höhe unter Berücksichtigung der Refraktion wird oft als äquivalenter Erdradius der praxisorientierte Wert

$$R_{\bar{A}} = \frac{4}{3} \cdot r_e \approx 8500 \text{ km}$$

eingesetzt.

**Beispiel:** Die folgende Formel wird für die Berechnung der Zielhöhe in dem russischen Höhenfinder PRW-16 verwendet:

$$H = \underset{1.}{r \cdot \sin(\pm \epsilon)} + \frac{\underset{2.}{r^2}}{2R_{\text{Erde}}} + \left\{ \underset{3.}{(4 + 0,67\Delta a) \cdot 10^{-7}} \cdot \underset{4.}{[0,8 - (292 - N) \cdot 5 \cdot 10^{-3}]} \right\} r^2 \quad (3)$$

Dabei bedeuten die einzelnen Formelabschnitte:

1. Zielhöhe ohne Beachtung der Erdkrümmung;
2. der Einfluss der Erdkrümmung auf die Zielhöhe;
3. der Einfluss der Refraktion in der Atmosphäre und
4. ein Temperaturkoeffizient.

## Entfernungsbestimmung

Die Entfernung wird aus der Laufzeit des hochfrequenten Sendesignals und der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_0$  ermittelt. Dabei wird eigentlich eine Schrägentfernung gemessen: die Entfernung zwischen dem Radargerät und einem Flugziel. Da hierbei aber der Hin- und Rückweg berücksichtigt werden muss, ergibt sich folgende Formel:

$$R = \frac{c_0 \cdot t}{2} \quad \begin{array}{l} c_0 = \text{Lichtgeschwindigkeit} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \\ t = \text{Laufzeit [s]} \\ R = \text{Entfernung Antenne - Flugziel [m]} \end{array} \quad (4)$$

In der Flugsicherung wird die Entfernung aus historischen Gründen in „nautischen Meilen“, in der Luftverteidigung in Kilometern angegeben.

## Herleitung der Formel zur Entfernungsbestimmung

Unter dem Begriff Zielentfernung  $R$  (vom engl.: Range) wird der Abstand zwischen Radargerät und Ziel verstanden. Die Zielentfernung kann aus der Laufzeit des Radarsignals vom Sender zum Ziel und zurück zum Empfänger bestimmt werden. Grundlage dazu dient die allgemeine physikalische Formel:

$$v = \frac{s}{t} \quad \begin{array}{l} v = \text{Geschwindigkeit [m/s]} \\ t = \text{Zeit [s]} \\ s = \text{Weg [m]} \end{array} \quad (5)$$

$$v = \frac{2R}{t} \quad \begin{array}{l} \text{Da die Strecke } R \text{ vom Radarsignal zweimal durchlaufen wird, muss} \\ \text{für den zurückgelegten Weg der Wert } 2 \cdot R \text{ eingesetzt werden.} \end{array} \quad (6)$$

Die Elektromagnetischen Wellen breiten sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit aus, deshalb wird die Geschwindigkeit  $v$  durch die Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  ersetzt und gleichzeitig wird die Formel nach  $R$  umgestellt:

$$R = \frac{c_0 \cdot t}{2} \quad \begin{array}{l} c_0 = \text{Lichtgeschwindigkeit} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \\ t = \text{Laufzeit [s]} \\ R = \text{Entfernung Antenne - Flugziel [m]} \end{array} \quad (7)$$

Ist die jeweilige Laufzeit  $t$  bekannt, so lässt sich mit Hilfe dieser Gleichung die Entfernung  $R$  zwischen einem beliebigen Ziel und der Radaranlage errechnen.



## Berechnung der geografischen Entfernung

Aus der Abb. 11 kann man den Lösungsansatz entnehmen. Ein Dreieck zwischen den Punkten: Mittelpunkt der Erde, dem Standort des Radargerätes und dem Standort des Flugzieles, dessen Seiten durch den Kosinussatz und somit durch die Gleichung

$$R^2 = R_{\ddot{A}}^2 + (R_{\ddot{A}} + H)^2 - 2R_{\ddot{A}}(R_{\ddot{A}} + H) \cdot \cos \alpha \quad (8)$$

verbunden sind ( $R_{\ddot{A}}$  ist hier der äquivalente Erdradius).

Unter der Annahme, dass die Erde eine Kugel sei, kann aus dem Winkel  $\alpha$  das Teilstück des Erdumfanges schon mit einfacher Verhältnisrechnung aus dem gesamten Erdumfang berechnet werden.

$$360^\circ \cdot R_{topogr.} = \alpha \cdot 2\pi \cdot R_{\ddot{A}} \quad (9)$$

Dieser Teilabschnitt des Erdumfanges kann als eine Annäherung (hier allerdings noch ohne eine Berücksichtigung der Refraktion) an die tatsächliche topografische Entfernung angesehen werden.

**Beispiel:** Die gemessene Schrägentfernung betrage 20 km (etwa 11 nautische Meilen), die bekannte im Flugzeug barometrisch gemessene Zielhöhe sei 3000 m (etwa 10000 Fuß). Die mit den obigen Formeln errechnete Differenz zwischen der Schrägentfernung und der geografischen Entfernung ist dann etwa -238 Meter. Bei geringerer Entfernung kann in dieser Flughöhe schon die zulässige Toleranz von 250 Metern während einer Flugvermessung überschritten werden.

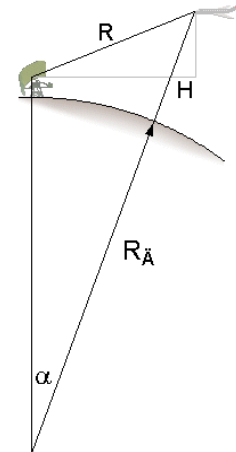


Abb. 11: genauere Berechnung der geografischen Entfernung

## Maximale Messentfernung

Die maximale Messentfernung  $R_{max}$  eines Radargerätes orientiert an der Dauer der Empfangszeit. Die folgenden Formeln für die maximale Messentfernung zeigen, dass die Dauer der Empfangszeit größer sein muss, als die zu messende Laufzeit. Somit wird die maximale Messentfernung durch die Impulsfolgezeit (PRT= Pulse Repetition Time) begrenzt.

$$R_{max} = \frac{(PRT - P_W) \text{ in } [\mu s]}{12,35 \mu s} \text{ in [Nmi]} \quad (10)$$

$$R_{max} = \frac{(PRT - P_W) \text{ in } [\mu s]}{6,66 \mu s} \text{ in [km]} \quad (11)$$

Die Länge des Sendeimpulses ( $P_W$ ) in dieser Formel beruht darauf, dass erst die gesamte Dauer des Echoimpulses empfangen werden muss, um ein Zielzeichen zu erzeugen!

Nach der Empfangszeit eintreffende Echosignale fallen entweder in die

- Sendezeit und bleiben unberücksichtigt, da die Radaranlage in dieser Zeit nicht empfangsbereit ist oder
- in die nachfolgende Empfangszeit und führen so zu Messfehlern (Überreichweiten).

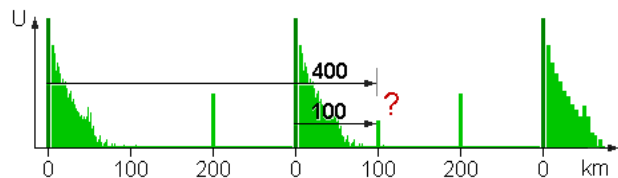


Abb. 12: Das Echo aus einer Überreichweite wird in einer falschen Entfernung dargestellt.

Diese weitentfernten Echos von einem früheren Sendeimpuls werden zusammen mit den Echos aus der aktuellen Pulsperiode empfangen und dargestellt („Entfernungsfaltung“). Moderne digitale Empfänger versuchen allerdings diese Echos zu entfalten.

Ein einfaches PPI-Sichtgerät beginnt bei jedem Sendeimpuls seine Auslenkung wieder in der Bildschirmmitte. Wenn also ein Echo aus sehr großer Entfernung erst nach dem nächsten Sendeimpuls eintrifft, wird auf dem Sichtgerät dieses Zielzeichen mit einer falschen Entfernung dargestellt. Die angezeigte Entfernung auf dem Sichtgerät sollte also die maximale Messentfernung nach der Radargleichung übersteigen. Die Darstellung sollte aber noch vor dem nächsten Sendeimpuls beendet sein.

Bei einer sich ständig ändernden Impulsfolgefrequenz (staggered PRT) wird das Zielzeichen aus einer Überreichweite nicht mehr als kleiner Kreisbogen dargestellt. Durch die ständig von Impuls zu Impuls geänderten Empfangszeiten wird dieses Echo nur als eine Ansammlung von Punkten in einem bestimmten gerätetypischen Muster dargestellt. Durch dieses Unterscheidungsmerkmal könnte eine prozessorgesteuerte Signalverarbeitung die richtige Entfernung errechnen. (Dieser Vorgang wird „Entfaltung“ genannt.)

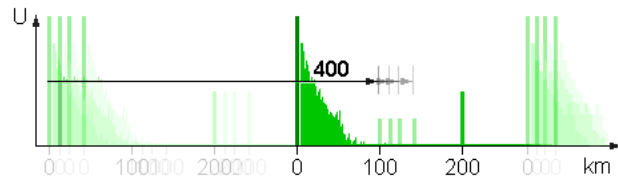


Abb. 13: bei einer sich ständig ändernden Impulsfolgefrequenz hat ein Zielzeichen aus einer Überreichweite keine stabile Position zum folgenden Sendeimpuls.

Abbildung 14 zeigt ein normales Zielzeichen mit einer IFF-Antwort und daneben eine Überreichweite des IFF bei Nutzung einer sich ständig ändernden Impulsfolgefrequenz. Hier ist zusätzlich zur staggered PRT auch zu beobachten, dass das IFF nicht jeden Synchronimpuls des Primärradars benutzt.

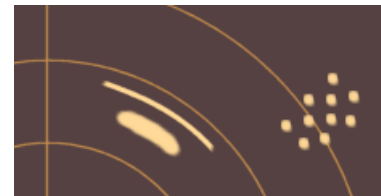


Abb. 14: eine Überreichweite wird bei einer sich ständig ändernden Impulsfolgefrequenz nicht mehr als kompaktes Zielzeichen beschrieben.

Modernere 3D-Radargeräte mit einer Phased Array Antenne (wie etwa das Luftverteidigungsradar RRP-117) kennen dieses Problem der Überreichweiten nicht, da hier der Systemcomputer nach einem festgelegten Schema praktisch jeden Sendeimpuls in eine andere Richtung aussendet. Sollte ein Echo in der folgenden Empfangszeit eintreffen, dann zeigt das Antennendiagramm längst in einen ganz anderen Höhenwinkel.

### Minimale Messentfernung

Die minimale Messentfernung  $R_{\min}$  ist der Abstand von der Antenne, den ein Ziel mindestens haben muss, um erfasst zu werden. Dazu ist es notwendig, dass der Sendeimpuls die Antenne vollständig verlassen und die Radar-Anlage auf Empfang umgeschaltet hat. Die Sendezeit  $P_w$  sollte also so kurz wie möglich sein, wenn Ziele im Nahbereich aufgefasst werden sollen. Die Umschaltzeit des Sende- Empfangsumschalters (Duplexers) geht hier als Schaltzeit oder Erholzeit ebenfalls in die Formel mit ein.

$$R_{\max} = \frac{P_w + \text{Schaltzeit}}{12,35 \mu\text{s}} \quad [\text{Nmi}] \quad (12)$$

$$R_{\max} = \frac{P_w + \text{Schaltzeit}}{6,66 \mu\text{s}} \quad [\text{km}] \quad (13)$$

Selbst wenn durch spezielle Verfahren (Pulskompression) einige Nachteile langer Sendezeiten ausgeglichen werden können: die schlechte minimale Messentfernung bleibt als Nachteil langer Sendezeiten immer erhalten!

Bei Radargeräten mit sehr kleiner Sendeleistung und bei aktiven Antennen mit einer Vielzahl von kleinen Sendeverstärkern kann die Trennung von Sende- und Empfangsweg durch Ferritzirkulatoren realisiert werden. In diesem Fall kann das Radar gleichzeitig senden und empfangen und hat keine ausgeprägte minimale Messentfernung.

## Radargleichung

Die Radargleichung wird dazu benutzt, die physikalischen Zusammenhänge von der Sendeleistung, über die Wellenausbreitung bis zum Empfang darzustellen. Des Weiteren lässt sich mit ihr die betriebliche Leistungsfähigkeit von Radaranlagen beurteilen.

### Herleitung der Radargleichung

Im Folgenden wird zunächst davon ausgegangen, dass sich die elektromagnetischen Wellen unter idealen Bedingungen, also ohne Störeinflüsse, ausbreiten können.

Wird von einem isotropen Kugelstrahler hochfrequente Energie abgestrahlt, so verteilt sich diese gleichmäßig nach allen Richtungen. Demzufolge bilden Flächen gleicher Leistungsdichte Kugeln um den Strahler. Bei größer werdendem Kugelradius verteilt sich die Energie auf eine größere Fläche ( $A = 4 \pi R^2$ ) um den Strahler. Oder anders ausgedrückt: bezogen auf eine angenommene Fläche wird die Leistungsdichte an der Fläche mit steigendem Abstand geringer. Somit ergibt sich für die ungerichtete Leistungsdichte  $S_u$  die folgende

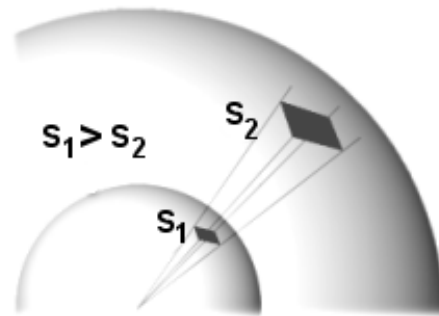


Abb. 15: Ungerichtete Leistungsdichte

Formel:

$$S_u = \frac{P_s}{4 \cdot \pi \cdot R_1^2} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad \begin{array}{l} P_s = \text{Sendeleistung [W]} \\ S_u = \text{ungerichtete Leistungsdichte} \\ R_1 = \text{Entfernung Antenne - Ziel [m]} \end{array} \quad (14)$$

Wird die Abstrahlung (bei gleichbleibender Sendeleistung) durch geeignete Maßnahmen auf eine Kugelteilfläche begrenzt, so ergibt sich in Abstrahlrichtung eine Erhöhung der Leistungsdichte. Man spricht von einem Antennengewinn. Erzielt wird dieser Gewinn durch gerichtete Abstrahlung der Energie. Für die gerichtete Leistungsdichte ergibt sich:

$$S_g = S_u \cdot G \quad \begin{array}{l} S_g = \text{gerichtete Leistungsdichte} \\ G = \text{Antennengewinn} \end{array} \quad (15)$$

Radaranntenen sind in der Realität natürlich keine „teilabstrahlenden“ Kugelstrahler, sondern Richtantennen (z.B. Parabolantennen oder Phased Array Antennen) mit einem Antennengewinn von 30 bis 40 dB.

Die Zielauffassung ist nicht nur von der Leistungsdichte am Ort des Zieles abhängig, sondern zusätzlich von der Einschränkung wie viel davon tatsächlich in Richtung der Radaranlage zurückreflektiert wird. Um die nutzbare reflektierte Leistung bestimmen zu können, wird die Rückstrahlfläche  $\sigma$  benötigt. Diese schwierig zu erfassende Größe ist von mehreren Faktoren abhängig. So ist es zunächst einleuchtend, dass eine größere Fläche mehr Leistung reflektiert als eine kleine Fläche, anders ausgedrückt:

Ein Jumbo-Jet bietet bei gleicher Fluglage mehr Reflexionsfläche als ein Sportflugzeug. Darüber hinaus hängt die Rückstrahlfläche stark von Formgebung, Oberflächenbeschaffenheit und den verwendeten Materialien ab.

Wird das bisher gesagte zusammengefasst, so ergibt sich die reflektierte Leistung  $P_r$  (am Zielort) aus der Leistungsdichte  $S_u$ , dem Antennengewinn  $G$  und der sehr variablen Rückstrahlfläche  $\sigma$ :

$$P_r = \frac{P_s}{4 \cdot \pi \cdot R_1^2} \cdot G \cdot \sigma \quad \begin{array}{l} P_r = \text{reflektierte Leistung} \\ \sigma = \text{Rückstrahlfläche} \end{array} \quad (16)$$

Vereinfacht kann ein Ziel aufgrund der reflektierten Leistung wiederum als Strahler betrachtet werden. Die reflektierte Leistung  $P_r$  wird dann zur abgestrahlten Leistung.

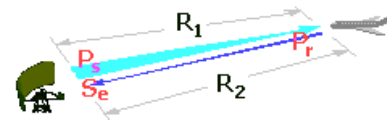


Abb. 16: Zusammenhang zwischen Formel (14), (16) und (17)

Da auf dem Rückweg der Echos die gleichen Verhältnisse wie auf dem Hinweg herrschen, ergibt sich für die Leistungsdichte am Empfangsort  $S_e$ :

$$S_e = \frac{P_s}{4 \cdot \pi \cdot R_2^2} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad \begin{array}{l} S_e = \text{Leistungsdichte am Empfangsort} \\ P_r = \text{reflektierte Leistung [W]} \\ R_2 = \text{Entfernung Ziel - Antenne [m]} \end{array} \quad (17)$$

An der Radarantenne ist die Empfangsleistung  $P_E$  abhängig von der Strahldichte am Empfangsort und der wirksamen Antennenfläche  $A_W$ .

$$P_E = S_e \cdot A_W \quad \begin{array}{l} P_E = \text{Empfangsleistung [W]} \\ A_W = \text{wirksame Antennenfläche [m}^2\text{]} \end{array} \quad (18)$$

Die wirksame Antennenfläche ergibt sich aus der Tatsache, dass eine Antenne nicht verlustfrei arbeitet, d.h. die geometrischen Abmessungen stehen nicht ganz als Empfangsfläche zur Verfügung. In der Regel ist die Wirkung einer Antenne um den Faktor 0,6 bis 0,7 (Faktor  $K_a$ ) kleiner, als die geometrischen Abmessungen vermuten lassen. Für die wirksame Antennenfläche gilt:

$$A_W = A \cdot K_a \quad \begin{array}{l} A_W = \text{wirksame Antennenfläche [m}^2\text{]} \\ A = \text{geometrische Antennenfläche [m}^2\text{]} \\ K_a = \text{Faktor} \end{array} \quad (19)$$

Damit ergibt sich für die Leistung am Empfangsort  $P_E$ :

$$P_E = S_e \cdot A_W \quad (18)$$

$$A_W = A \cdot K_a \quad (19)$$

$$P_E = S_e \cdot A \cdot K_a \quad (20)$$

$$S_e = \frac{P_r}{4 \cdot \pi \cdot R_2^2} \quad (17)$$

$$P_E = \frac{P_r}{4 \cdot \pi \cdot R_2^2} \cdot A \cdot K_a \quad (21)$$

Bisher wurde bei den Herleitungen der Hin- und Rückweg gesondert betrachtet. Mit dem nächsten Schritt werden beide Wege zusammengefasst und da die Strecke  $R_1$  (Antenne - Ziel) gleich  $R_2$  (Ziel - Antenne) ist, wird das im nächsten Schritt berücksichtigt.

$$P_E = \frac{P_r}{4 \cdot \pi \cdot R_2^2} \cdot A \cdot K_a \quad P_r = \frac{P_s}{4 \cdot \pi \cdot R_1^2} \cdot G \cdot \sigma \quad (21) \quad (16)$$

$$P_E = \frac{\frac{P_s \cdot G \cdot \sigma}{4 \cdot \pi \cdot R_1^2}}{4 \cdot \pi \cdot R_2^2} \cdot A \cdot K_a$$

$$P_E = \frac{P_s \cdot G \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^2 \cdot R_2^2 \cdot R_1^2} \cdot A \cdot K_a$$

$$P_E = \frac{P_s \cdot G \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^2 \cdot R^4} \cdot A \cdot K_a \quad R_2 = R_1 \quad (22)$$

Eine weitere Gleichung, die an dieser Stelle nicht hergeleitet werden soll, stellt den Antennengewinn  $G$  in Beziehung zu der verwendeten Wellenlänge  $\lambda$  und der effektiven Antennenfläche  $A \cdot K_a$ .

$$G = \frac{4 \cdot \pi \cdot A \cdot K_a}{\lambda^2} \quad (23)$$

Nach der Umstellung auf die Antennenfläche  $A \cdot K_a$  und dem Einsatz in die Gleichung (22) ergibt nach der Kürzung:

$$P_e = \frac{P_s \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot R^4} \quad (24)$$

Nach der Umstellung auf die Reichweite  $R$  entsteht die klassische Form der Radargleichung:

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_s \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{P_E \cdot (4 \cdot \pi)^3}} \quad (25)$$

Bei der Herleitung der Radargleichung wurden alle Größen, die Einfluss auf die Wellenausbreitung der Radarsignale nehmen, berücksichtigt. Darüber hinaus wurden die Abhängigkeiten der Größen veranschaulicht und letztendlich in der klassischen Radargleichung zusammengefasst.

Über diesen theoretischen Ansatz hinaus lässt sich die Radargleichung sehr wohl auch in der Praxis anwenden, z.B. um die Leistungsfähigkeit von Radaranlagen zu ermitteln. Für diese erweiterten Betrachtungen eignet sich die Form der klassischen Radargleichung jedoch noch nicht. Einige weitere Überlegungen sind notwendig.

Bezogen auf eine bestimmte Radaranlage können die meisten Größen ( $P_s$ ,  $G$ ,  $\lambda$ ) als konstant betrachtet werden, da sie nur in kleinen Bereichen veränderliche Gerätedaten sind. Dagegen stellt die Rückstrahlfläche  $\sigma$  eine schwer fassbare Größe dar und wird deshalb meistens mit dem praxisorientierten Wert  $1 \text{ m}^2$  angenommen.

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_s \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{P_{E_{\min}} \cdot (4 \cdot \pi)^3}} \quad (26)$$

Unter dieser Bedingung ist die Empfangsleistung  $P_E$  interessant, die im Radarempfänger ein gerade noch wahrnehmbares Echosignal hervorruft. Diese Empfangsleistung wird  $P_{E_{\min}}$  genannt. Kleinere Empfangsleistungen sind nicht verwertbar, da sie im Rauschen des Empfängers untergehen.  $P_{E_{\min}}$  in die Radargleichung eingesetzt, bewirkt, dass mit der Gleichung die theoretisch maximale Reichweite  $R_{\max}$  bestimmt werden kann. Eine praxisnahe Anwendung dieser Radargleichung ist die Ermittlung von Leistungsdaten bestimmter Radaranlagen mit dem Ziel, die Anlagen zu vergleichen und zu bewerten.

## Einflüsse auf die Reichweite einer Radaranlage

Alle Betrachtungen in Zusammenhang mit der Radargleichung wurden bisher unter der Voraussetzung angestellt, dass sich die elektromagnetischen Wellen unter idealen Bedingungen ausbreiten können. In der Praxis ergeben sich allerdings eine Reihe von Verlusten, die nicht unberücksichtigt bleiben können, da sie die Wirksamkeit einer Radaranlage zum Teil erheblich reduzieren.

Dazu wird zunächst die Radargleichung um den **Verlustfaktor**  $L_{ges}$  erweitert (von engl. *Losses*).

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_s \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{P_{Emin} \cdot (4 \cdot \pi)^3 \cdot L_{ges}}} \quad (27)$$

Dieser Faktor fasst die nachfolgend beispielhaft aufgeführten Verlustarten zusammen:

- $L_D$  = geräteinterne Dämpfungsverluste auf dem Sende- und Empfangsweg
- $L_f$  = Fluktuationsverluste bei der Reflexion am Ziel
- $L_{Atm}$  = atmosphärische Dämpfungsverluste auf dem Ausbreitungsweg zum Ziel und zurück.

Geräteinterne Dämpfungsverluste entstehen in der Hauptsache an Hochfrequenzbauteilen wie Hohlleiter, Filter, aber auch durch ein Radom. Diese Verlustart ist, bezogen auf eine bestimmte Radaranlage, in ihrem Wert relativ konstant und auch gut ermittelbar (messbar). Als ständiger Einfluss ist noch die atmosphärische Dämpfung und Reflexionen an der Erdoberfläche zu nennen.

## Die Radargleichung in der Praxis

### Sendeleistung

Zur Betrachtung des Einflusses der Sendeleistung nehmen wir an, dass alle anderen Faktoren in der Radargleichung konstant sind.

Somit erhalten wir, dass die Reichweite proportional der vierten Wurzel der Sendeleistung ist. Es muss also die Sendeleistung versechzehnfacht werden, damit sich die Reichweite verdoppelt

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_s \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{P_{Emin} \cdot (4 \cdot \pi)^3 \cdot L_{ges}}}$$

$$R_{max} \approx \sqrt[4]{P_s} \cdot \text{Konstante Faktoren} \quad (28)$$

**Beispiel:** In einer Senderendstufe eines Radargerätes arbeiten 32 Module gleicher Leistung parallel, deren Leistung anschließend zur Gesamtleistung summiert wird. Wenn eines dieser Sendermodule ausfällt, verringert sich also die Sendeleistung um ein zweiunddreißigstel.

Auf wie viel Prozent verringert nun sich die Reichweite des Radargerätes?

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{31}{32}} \cdot 100\% = \underline{\underline{99,2\%}}$$

Die Reichweite beträgt unter Anwendung der Formel (24) nur noch 99,2%, ein vernachlässigbarer Unterschied zur vollen Sendeleistung! Das Radar kann also trotz des Ausfalls eines Sendermoduls ohne Unterbrechung bis zur nächsten Wartung weiterarbeiten.



Abb. 17: Halbleitersender mit 32 Sendermodulen

## Empfängerempfindlichkeit

Analog wie bei der Sendeleistung werden alle anderen Faktoren als konstant angenommen. Sie steht zwar auch unter der 4. Wurzel, aber im Nenner.

$$R_{\max} \approx \frac{1}{\sqrt[4]{P_{E_{\min}}}} \quad \text{Eine Verringerung der minimalen Empfangsleistung des Empfängers bringt also die Erhöhung der Reichweite.} \quad (29)$$

Es gibt für jeden Empfänger eine bestimmte Empfangsleistung, ab der er überhaupt arbeiten kann, ab der das empfangene Signal um einen bestimmten Betrag über dem Rauchpegel liegt. Diese kleinste verarbeitbare Empfangsleistung wird in der Radartechnik häufig mit der Bezeichnung MDS (Minimum Detectable Signal) versehen. Radartypische Größen des MDS-Echos liegen im Bereich von -104 dBm bis -110 dBm.

## Antennengewinn

Unter der 4. Wurzel der Radargleichung steht das Quadrat des Antennengewinns. Wir erinnern uns: die gleiche Antenne wird hier ja auch auf dem Hin- und dem Rückweg benutzt.

$$R_{\max} \approx \sqrt[4]{G^2} = \sqrt{G} \quad \text{Damit wird eine Vervielfachung des Antennengewinns eine Verdopplung der Reichweite bewirken.} \quad (30)$$

Das zeigt, dass der Zustand der Antenne einen sehr großen Einfluss auf die Reichweite des Radargerätes hat.

## Rückstrahlfläche

Diese, in manchen Veröffentlichungen auch effektive Reflexionsfläche genannte Rückstrahlfläche ist eine flugkörperspezifische Größe, die von vielen Faktoren abhängig ist.

Die rechnerische Ermittlung des wirksamen  $\sigma$ -Wertes ist nur bei einfachen Körpern möglich, und zwar ist die Rückstrahlfläche abhängig von der Körperform und der Wellenlänge, oder besser gesagt, vom Verhältnis der Strukturabmessungen des Körpers zur Wellenlänge.

Praktisch hängt die effektive Rückstrahlfläche von:

- der Größe des Flugkörpers,
- der momentanen Fluglage,
- der Sendefrequenz des Radargerätes
- den verwendeten Materialien
- und den elektrischen Eigenschaften der Oberfläche des Flugkörpers ab.

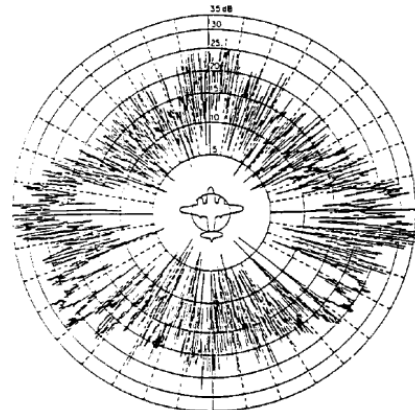


Abb. 18: experimentell ermittelte relative Rückstrahlfläche  $\sigma / \sigma_0$  eines B 26-Bombers bei einer Frequenz von 3 GHz (nach Skolnik)

Während bei der Konstruktion eines Passagierflugzeuges mehr Augenmerk auf Effektivität und Sicherheit gelegt wird, wird bei einem militärisch genutzten Flugzeug schon darauf geachtet, dass diese Rückstrahlfläche möglichst klein ist. Diese sogenannte Stealth- Technologie („Tarnkappenbomber“) wurde im Golfkrieg schon erfolgreich angewendet, hat aber im Kosovokrieg wegen der extrem niedrigen Frequenz der serbischen Radargeräte (VHF-Bereich) bekanntlich große Probleme für die Piloten der Stealth - Bomber gebracht.

Praktische Werte liegen zwischen  $0,01 \text{ m}^2$  bei Stealth- Flugzeugen,  $1 \text{ m}^2$  bei klassischen Jagdflugzeugen und können bis zu  $50 \text{ m}^2$  bei strategischen Bombenflugzeugen erreichen.

## Mehrfrequenzradargeräte (Frequenz-Diversity)

### Arbeitsprinzip

Die Verwendung von verschiedenen Frequenzen hat das Ziel, den Anteil von Fluktuationsverlusten  $L_f$  bei der Reflexion am Ziel, deren Größe mit der Sendefrequenz variiert, zu verringern. Diese Fluktuationsverluste treten auf, weil sich die reflektierte Energie an mehreren Teilflächen des Flugzeuges durch geringe Laufzeitunterschiede überlagern und sogar gegenseitig auslöschen können.

Mehrfrequenzradargeräte strahlen deshalb mehrere Sendepulse unterschiedlicher Frequenz mit sich gegenseitig überdeckender Antennenrichtcharakteristik aus. Von jedem Ziel im Auffassungsbereich empfangen sie also mehrere Echosignale unterschiedlicher Frequenz, die einer gemeinsamen logischen Bearbeitung unterliegen. Wenn bei einer Frequenz zufällig eine Auslöschung durch Interferenz erfolgt, dann soll durch einen geeigneten Frequenzabstand die zweite Frequenz an dieser Stelle ein Maximum haben.

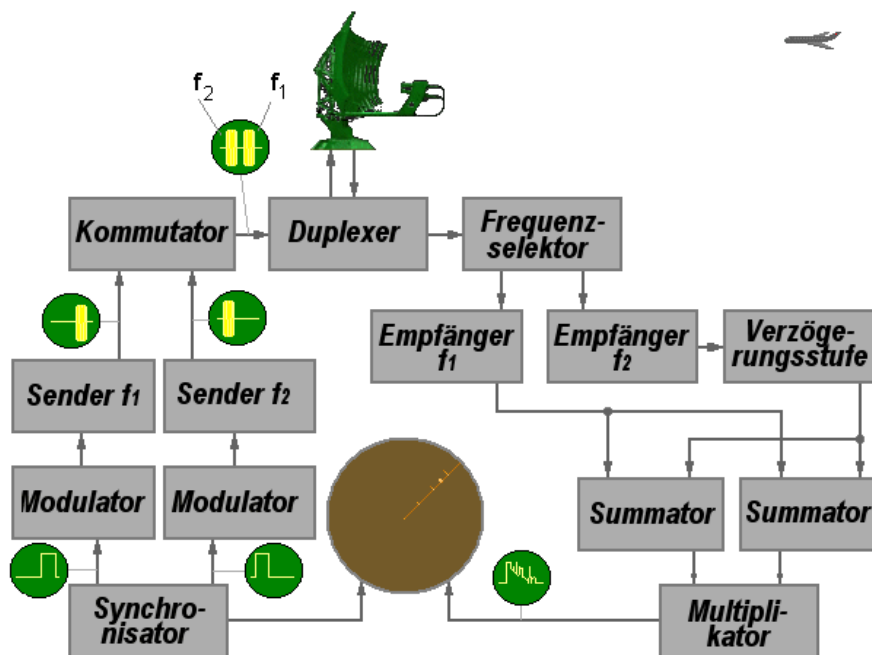


Abb. 19: Blockschaltbild eines Frequenz-Diversity-Radars

### Aufgaben der Baugruppen

- Synchronizer** Der Synchronizer ist eine Impulszentrale und steuert alle zeitlichen Abläufe im Radargerät. Er erzeugt eine Reihe von Synchronimpulsen für den Sender, die Sichtgeräte sowie andere angeschlossene Baugruppen.
- Modulator** Der Modulator schaltet für den Sendemoment die Hochspannung an den Sender. Dabei werden hier beide Sender kurz hintereinander eingeschaltet.
- Sender** Der Radarsender erzeugt einen sehr kurzen, hochfrequenten Impuls mit sehr hoher Leistung.
- Kommutator** Ein Kommutator (das Wort kommt aus dem Lateinischen und bedeutet soviel wie „Sammelschiene“ oder „Vermittlung“) ist eigentlich ein zeitlich gesteuerter Schalter. Er kann entweder passiv arbeiten (alle ankommenden HF-Impulse auf den beiden Eingangsleitungen werden zum Ausgang geleitet), oder mittels Torimpulsen (siehe Bild) die HF- Eingangsimpulse zeitlich korrekt getrennt zum Ausgang schalten. Da sehr schnell sehr hohe Frequenzen geschaltet werden müssen, wird im Kommutator eine Technologie ähnlich wie im Sendempfangsumschalter eingesetzt.



<b>Duplexer</b>	Der Duplexer ist der Sende-Empfangsumschalter und schaltet die Antenne im Sendemoment an den Sender und in der Empfangszeit an den Empfänger. Im Sendemoment muss er den empfindlichen Empfängereingang vor der großen Sendeleistung schützen.
<b>Antenne</b>	Die Antenne setzt die hochfrequente Energie des Senders in elektromagnetische Felder um und verteilt die Leistung in bestimmte Richtungen. Dieser Prozess ist umkehrbar für den Empfang der Echosignale.
<b>Frequenzselektor</b>	Der Frequenzselektor ist eine Frequenzweiche, um die ankommenden Echosignale frequenzmäßig dem passenden Empfänger zuzuordnen.
<b>Empfänger</b>	Die Empfänger verstärken und demodulieren das empfangene Echosignal. Am Ausgang der Empfänger liegen Videoimpulse an.
<b>Verzögerungsstufe</b>	Der Impuls $f_1$ wurde im Sender um einen bestimmten Zeitbetrag gegenüber dem Impuls $f_2$ verzögert. Diese Verzögerung auf dem Empfangsweg wieder rückgängig zu machen, das geht nur, indem nun auch der Impuls $f_2$ um genau diesen Zeitbetrag verzögert wird, damit die Echoverarbeitung beide Signale gleichzeitig verarbeiten kann. Beachte, dass der als erstes gesendete Impuls auch als erstes auf dem Oszilloskop, also links gezeigt wird!
<b>Signalverarbeitung</b>	Bei einem Mehrfrequenzradargerät werden die Einzelsignale in getrennten Kanälen parallel bearbeitet, summiert und mit einem Schwellwert verglichen. Dabei kommen mehrere Bearbeitungsverfahren zur Anwendung: <ul style="list-style-type: none"><li>• lineare Addition der Amplituden aller Kanäle (maximaler Reichweitengewinn bei geringer Störfestigkeit);</li><li>• Multiplikation der Amplituden aller Kanäle (maximaler Störschutz);</li><li>• Summierung der Quadrate der Amplituden aller Kanäle (optimales Verfahren!); lineare Addition der Amplituden mehrerer Kanäle mit nachfolgender Multiplikation der Summen (in diesem Blockschaltplan gezeichnet);</li><li>• Multiplikation der Amplituden mehrerer Kanäle mit nachfolgender Addition der Produkte.</li></ul> Eine hohe Effektivität wird durch eine situationsangepasste Auswahlmöglichkeit einer der genannten Bearbeitungsverfahren erreicht. Welches Verfahren in welchem Radargerät wann zur Anwendung kommt, bleibt meist Firmengeheimnis oder unterliegt mindestens einer Geheimhaltungsstufe.
<b>Radarsichtgeräte</b>	Das Radarsichtgerät zeigt eine einfach zu erfassende grafische Darstellung der Position der Radarziele in Echtzeit. Es werden nach Möglichkeit auch zusätzliche Informationen, wie etwa die Identifikation des Zieles angezeigt.

### Zusammenfassung Frequenz-Diversity:

Mit dem Mehrfrequenzradarverfahren ist es möglich, bei gleicher Entdeckungswahrscheinlichkeit und gleicher Falschalarmrate eine wesentlich höhere Reichweite zu erzielen. Die physikalische Grundlage bildet die Glättung der Fluktuation des komplexen Echosignals. Infolge der Unterschiede im Sekundärstrahlungsdiagramm des Zieles für die unterschiedlichen Trägerfrequenzen sind die Extrema (Minima und Maxima) gegeneinander verschoben, was bei einer Summierung der Einzelsignale zu einer Glättung des resultierenden Signals führt. Notwendige Bedingung für diese Reichweitenerhöhung durch Erhöhung der Wahrscheinlichkeit der Zielerkennung ist die Unabhängigkeit der reflektierten Einzelsignale. Das ist genau dann der Fall, wenn sich die unterschiedlichen Spektren der Sende- und somit der Echosignale nicht überdecken.

Ein wesentlicher Vorzug des Mehrfrequenzradarverfahrens ist die höhere Störfestigkeit des Verfahrens. Wesentlichen Einfluss dabei hat die Art und Weise der Weiterverarbeitung der einzelnen Empfangssignale. So bietet die lineare Summierung der Frequenzkomponenten des Mehrfrequenzsignals die größte Wahrscheinlichkeit für die Zielerkennung, bringt aber hinsichtlich der Störfestigkeit nur einen geringen Gewinn gegenüber einem Radargerät mit nur einer Sendefrequenz. Deshalb wird die lineare Summierung vorwiegend in Flugsicherungsradargeräten eingesetzt. Luftverteidigungsradargeräte nutzen hier eine komplexere Signalverarbeitung.

## Wissenstest

1. Nennen Sie den Verlauf eines Radarsignals vom Radarsender bis zu einer Darstellung auf dem Sichtgerät!

Radarsender →.....

..... → Sichtgerät

2. Was sind die Aufgaben eines Duplexers und nennen Sie eine mögliche Bedingung, unter der man auf eine solche Baugruppe verzichten kann!

- 
- 
- 
- 

3. Bei einem Flugsicherungsradargerät mit zwei gleichen Sendern im Frequenz-Diversity- Betrieb muss ein Sender wegen eines Defektes abgeschaltet werden.

- 3.1. Um welchen Faktor verringert sich gemäß der Radargleichung die Reichweite des Radars, ohne Berücksichtigung der Fluktuationsverluste?

- 3.2. Wie wirkt sich das Fehlen des zweiten Senders unter Berücksichtigung der Fluktuationsverluste auf die Reichweite aus?

- Sinkt die Reichweite noch mehr, oder*
- wird der beim ersten Teil der Frage berechnete Reichweitenverlust wenigstens ein bisschen ausgeglichen?*

4. Bei einem Impulsradargerät beträgt die Sendeimpulsdauer  $1,5 \mu\text{s}$  und die Erholzeit des Duplexers  $0,5 \mu\text{s}$ . Wie weit von der Antenne muss ein Flugzeug mindestens entfernt sein, um auf dem Sichtgerät dargestellt werden zu können?