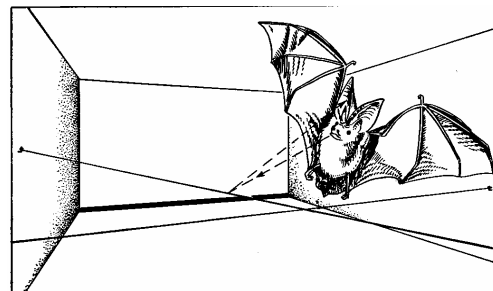


Das Jahrhundert des Radars

- von Christian Hülsmeier zur Shuttle Radar Topography Mission -

Dr.-Ing. Wolfgang Holpp
EADS Deutschland GmbH
Defence Electronics
Ulm

Seit Jahrmillionen schon nutzt die Natur ein Prinzip, das im 20. Jahrhundert in die technische Anwendung "Radar" umgesetzt wurde. Die Fledermaus nämlich orientiert sich bei ihrer nächtlichen Jagd mittels akustischer Ortung. Sie sendet dabei Ultraschallwellen mit einem dafür spezialisierten Stimmorgan aus und empfängt deren Echos mit trichterförmigen Ohren.



Die Fledermaus: Ortung und Entfernungsmessung mittels Akustik

Diese Technik erlaubt es der Fledermaus, Hindernisse, die sich in ihrem Flugweg befinden, zu orten und darüber hinaus - sicherlich von ebensolcher Bedeutung - potentielle Beute zu erjagen. Das "Prinzip Radar" ist also nicht neu.

Elektromagnetische Wellen

Im 19. Jahrhundert wurden die theoretischen Grundlagen geschaffen, die die Voraussetzung für die Erfindung und Entwicklung des Radars hundert Jahre später werden sollten.

Die erste Eisenbahn in Deutschland war gerade seit einem Jahr zwischen Nürnberg und Fürth in Betrieb, als 1836 der bedeutende englische Wissenschaftler Michael Faraday - in einer freilich weniger publikumswirksamen Weise - die Theorie elektrischer und magnetischer Felder formulierte.

(65) The complete equations of electromotive force on a moving conductor may now be written as follows:—

Equations of Electromotive Force.

$$\begin{aligned}
 P &= \mu \left(\gamma \frac{dy}{dt} - \beta \frac{dz}{dt} \right) - \frac{dF}{dt} - \frac{d\psi}{dx} \\
 Q &= \mu \left(\alpha \frac{dz}{dt} - \gamma \frac{dx}{dt} \right) - \frac{dG}{dt} - \frac{d\psi}{dy} \dots\dots\dots (D). \\
 R &= \mu \left(\beta \frac{dx}{dt} - \alpha \frac{dy}{dt} \right) - \frac{dH}{dt} - \frac{d\psi}{dz}
 \end{aligned}$$

The first term on the right-hand side of each equation represents the electromotive force arising from the motion of the conductor itself. This electromotive force is perpendicular to the direction of motion and to the lines of magnetic force; and if a parallelogram be drawn whose sides represent in direction and magnitude the velocity of the conductor and the magnetic induction at that point of the field, then the area of the parallelogram will represent the electromotive force due to the motion of the conductor, and the direction of the force is perpendicular to the plane of the parallelogram.

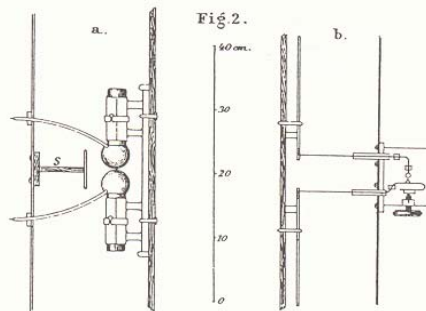
The second term in each equation indicates the effect of changes in the position or strength of magnets or currents in the field.

The third term shows the effect of the electric potential ψ . It has no effect in causing a circulating current in a closed circuit. It indicates the existence of a force urging the electricity to or from certain definite points in the field.



J. C. Maxwell und seine *Equations of Electromotive Force*

Im Jahr 1865 dann stellte der schottische Mathematiker und Physiker James Clerk Maxwell die fundamentalen Gleichungen auf, die das Zusammenwirken elektrischer und magnetischer Felder beschreiben und so die Existenz elektromagnetischer Wellen voraussagten. Es dauerte daraufhin allerdings weitere 23 Jahre, bis es dem deutschen Physiker Heinrich Hertz gelang, den experimentellen Nachweis solcher Wellen zu erbringen. Im Jahr 1888 veröffentlichte er sein wegweisendes Werk „Über Strahlen elektrischer Kraft“ in der Berliner Akademie der Wissenschaften.



H. Hertz und sein erster Sender und Empfänger

Hertz beschreibt darin die wesentlichen Eigenschaften elektromagnetischer Wellen, also deren Ausbreitung, die Charakteristika von Polarisation und Brechung und, aus der Sicht der späteren Anwendung für Radar von entscheidender Bedeutung, deren Eigenschaft, an metallischen Körpern reflektiert zu werden.

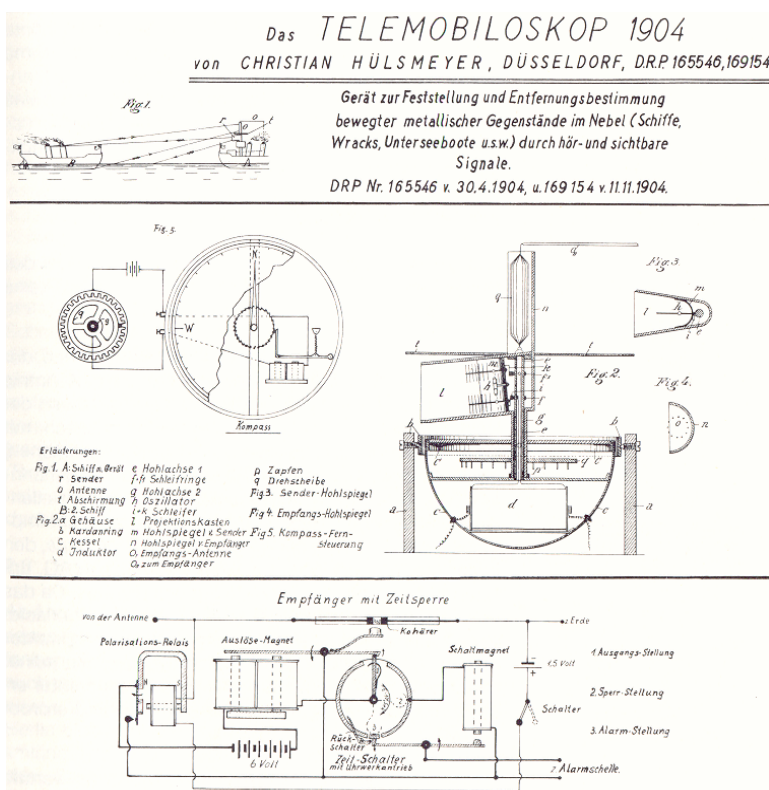
Das IEEE hat in einer Veröffentlichung im Jahr 2000 Heinrich Hertz als den ersten *Radar-Wissenschaftler* und Christian Hülsmeier als den ersten *Radar-Ingenieur* der Welt titulierte. Wer aber war Christian Hülsmeier?

Christian Hülsmeier

Christian Hülsmeier wurde am 25. Dezember 1881 in Eydelstedt bei Diepholz geboren. Auf Veranlassung seines Vaters begann er seine Berufsausbildung 1898 auf dem Lehrerseminar in Bremen. Dort hatte er das Glück, einen verständnisvollen Physiklehrer zu treffen, der ihm die Benutzung des schuleigenen Labors für seine seit langem gehegten Versuche mit elektromagnetischen Wellen gestattete. Ein Schiffsunglück auf der Weser, bei dem unter schlechten Witterungs- und Sichtverhältnissen ein junger Mann aus Hülsmeyers Umgebung ums Leben kam, bestärkte ihn in seiner Idee, die Reflexion elektromagnetischer Wellen zur Warnung vor Hindernissen auf dem Kurs eines Schiffes einzusetzen.

Hülsmeier wechselte 1899, schon nach einem Jahr, zur damaligen Firma Siemens & Halske in Bremen. Dort entwickelte er seine Idee konsequent weiter und fand dann in dem Kölner Kaufmann Mannheim einen Geldgeber zur Gründung der gemeinsamen Firma "Telemobiloskop-Gesellschaft Hülsmeier & Mannheim". Damit hatte seine Erfindung einen Namen bekommen, den man etwas schwerfällig mit "Fernbewegungs-Seher" übersetzen könnte.

Am 17. Mai 1904, Hülsmeier war gerade 22 Jahre alt, führte er im Hof des Kölner Domhotels sein *Telemobiloskop* erstmals Vertretern von Schifffahrtsgesellschaften und der lokalen Presse vor. Am Tag darauf fand eine noch eindrucksvollere, öffentliche Präsentation an der Hohenzollernbrücke am Rhein statt. Das *Telemobiloskop* war mit seinen Antennen auf den Fahrweg der Schiffe gerichtet und meldete durch die Aktivierung einer Klingel zuverlässig jedes vorbeifahrende Schiff.



Darstellung des *Telemobiloskops* und die Hohenzollernbrücke zu Köln

Wenige Wochen später demonstrierte Hülsmeier sein Gerät mit großem Erfolg an Bord des Tenders *Columbus* vor internationalem Publikum anlässlich des "Technical Nautical Meeting" im Hafen von Rotterdam. Auch die Fachwelt nahm nun mit Interesse seine Leistung zur Kenntnis

Hülsmeier hatte seine Erfindung vor den öffentlichen Vorstellungen zum Patent angemeldet. Die am 30. April 1904 beim Deutschen Patentamt in München eingereichte Schrift trägt den Titel "Verfahren, um entfernte metallische Gegenstände mittels elektrischer Wellen einem Beobachter zu melden". Am 10. Juni 1904 folgte die Anmeldung in Großbritannien mit dem für heutige Verhältnisse etwas seltsam anmutenden Text „Hertzian-wave Projecting and Receiving Apparatus Adapted to Indicate or Give Warning of the Presence of a Metallic Body, such as a Ship or a Train, in the Line of Projection of such Waves“.



C. Hülsmeier im Jahr 1904 und sein Patent

Hülsmeyers *Telemobiloskop* bestand aus jeweils einer Antenne für Sendung und Empfang, einem Funkeninduktor zur Erzeugung hochfrequenter Wellen und einem Kohärer als Empfangselement. Die Betriebsfrequenz kann man nachträglich nur mutmaßen; durch das Prinzip der Schwingungserzeugung bedingt wurde aber wohl ein Spektrum von einigen hundert Megahertz abgestrahlt. Die gesamte Anordnung konnte in der azimuthalen Ebene um 360° synchron zu einer abgesetzten Anzeigeeinrichtung, die Hülsmeier *Kompass* nannte, gedreht werden. Dieser *Kompass* diente zur Anzeige der Richtung, aus der von einem Ziel reflektierte Wellen beim *Telemobiloskop* eintrafen.

Ohne Zweifel bereitete Hülsmeier mit seinen Arbeiten die Basis für das, was erst viele Jahre später "Radar" (Radio Detection and Ranging) genannt wurde, auch wenn er zunächst nur den Vorgang der „Detection“ und noch nicht des „Ranging“ nachwies. Das Fehlen einer Entfernungsmessung als wichtige Ergänzung zur

Entdeckung eines Ziels war ihm sehr wohl bewußt und veranlasste ihn zu weiteren Arbeiten und schließlich zur Anmeldung eines Zusatzpatents mit dem Titel "Improvement in Hertzian-wave Projecting and Receiving Apparatus for Locating the Position of Distant Metal Objects". Er schlug darin zwei Möglichkeiten vor, den Elevationswinkel der Sendeantenne des *Telemobiloskops* zu messen und aus der Position maximaler Empfangsfeldstärke die Zielentfernung zu berechnen.

Die Tragik aller Arbeiten Christian Hülsmeyers aber lag letztendlich darin, daß er trotz aller Erfolge - in Rotterdam hatte das *Telemobiloskop* Schiffe in 3 km Entfernung detektiert - keine nachhaltige Unterstützung bei den potentiellen Anwendern seiner Erfindung fand. Seine Ideen eilten den Gegebenheiten jener Zeit um ein Vierteljahrhundert voraus. Er beendete alle diesbezüglichen Arbeiten im Jahr 1905 und wandte sich anderen Themen zu. Erst in den fünfziger Jahren erfuhr er zahlreiche Ehrungen, so z. B. vom damaligen Bundeskanzler Konrad Adenauer.

Hülsmeyer verstarb am 31. Januar 1957 in Ahrweiler.

Die vergessene Erfindung

Während des ersten Viertels des 20. Jahrhunderts stand die drahtlose Kommunikation im Mittelpunkt der Anwendungen elektromagnetischer Wellen. Hülsmeyers Erfindung war in Vergessenheit geraten. Der Italiener Guglielmo Marconi fügte eine Funkenstrecke und eine Antenne zusammen und sendete bereits 1886 telegraphische Signale über mehrere Kilometer. Seine Versuche erreichten einen ersten Höhepunkt, als er im Jahr 1901 den Nordatlantik über eine Entfernung von 3600 km von England nach Neufundland auf drahtlosem Wege überbrückte. Im Zuge der fortschreitenden Entwicklung der Elektrotechnik baute Marconi nach und nach ein kommerzielles Netz von Funkstationen auf. 1922 kam auch er, mit großer Wahrscheinlichkeit ohne Kenntnis der Arbeiten Hülsmeyers, auf die Idee, metallische Objekte mittels Reflexion elektromagnetischer Wellen zu orten. Aber auch seine Initiative fand keine Resonanz in der damaligen wissenschaftlichen Gesellschaft.

Lediglich zwei amerikanische Physiker, A. H. Taylor und L. C. Young vom US Naval Research Laboratory (NRL), führten seine Gedanken weiter. Sie experimentierten mit Frequenzen um 60 MHz und beobachteten starke Interferenzen in ihrem Empfänger, sobald ihre Sendeantenne auf bewegte Objekte gerichtet war. Sie schlossen daraus, daß die Veränderungen der empfangenen Feldstärke durch Interferenzen der abgestrahlten und der an einem Ziel reflektierten Wellen verursacht sein müßten. Drei Jahre später, 1925, vermaßen die Amerikaner Breit und Tuve erstmalig die Höhen verschiedener Lagen der Ionosphäre mit breitbandigen Impulsen im Frequenzbereich 3 bis 30 MHz. Sie können als die Erfinder der Impulstechnik gelten.

Die Wiederentdeckung des Radarprinzips

In den frühen dreißiger Jahren des vergangenen Jahrhunderts schließlich erkannte man in mehreren Ländern Europas und in Übersee die Bedeutung des Radarprinzips in vollem Umfang, wohl nicht zuletzt als Folge des ihm innewohnenden militärischen Potentials. Von dieser Zeit an wird es sehr schwierig, den weiteren Weg der Radarentwicklung geschlossen und auf einem Pfad nachzuzeichnen. Erfolgt die Arbeiten

in verschiedenen Ländern zunächst noch unabhängig voneinander, so entbrannte während des Zweiten Weltkrieges ein wahres Rennen von Aktionen und Reaktionen einer stetig fortschreitenden Leistungssteigerung der eigenen und der gegnerischen Radartechnik.

Um den Rahmen dieser Abhandlung überschaubar zu halten, soll im folgenden der Blick auf wesentliche Entwicklungen in Deutschland, in Großbritannien und in den USA gerichtet sein. Im Sinne historischer Korrektheit muß aber erwähnt werden, daß zu Beginn des Zweiten Weltkrieges im September 1939 operationelle Radarsysteme auch in Frankreich, der Sowjetunion, Japan, Italien und in den Niederlanden zur Verfügung standen.

Funkmeßtechnik in Deutschland

Dr. Rudolf Kühnhold von der Nachrichten-Versuchsabteilung (NVA) der damaligen Reichsmarine in Kiel meldete 1931 ein Patent an zur Unterwasser-Schallortung von Zielen, heute *Sonar* genannt. Zur selben Zeit dachte Kühnhold aber bereits daran, elektromagnetische Wellen für Ortungszwecke außerhalb von Wasser zu nutzen. Zur Umsetzung seiner Ideen veranlaßte er 1934 die Gründung einer neuen Firma, der GEMA (Gesellschaft für Elektroakustische und Mechanische Apparate), die sich mit der neuen Technik, in Deutschland mittlerweile *Funkmeßtechnik* genannt, befassen sollte.

Im September 1935 präsentierte die GEMA zum ersten Mal ein voll funktionsfähiges Funkmeßgerät vor hochrangigen Marineoffizieren. Es bestand aus einem gepulsten Sender mit einer Frequenz von etwa 600 MHz und hatte eine Ausgangsleistung von 800 W. Die Laufzeit eines Impulses vom Sender zum Ziel und zurück zum Empfänger wurde gemessen, und daraus die Zielentfernung errechnet. Für Sendung und Empfang wurde eine sog. *Tannenbaum-Antenne*, bestehend aus einem Dipolfeld und einem Reflektornetz, verwendet. Ein kleineres Schulschiff konnte auf eine Distanz von 8 km detektiert werden.

Im selben Jahr arbeitete Dr. Wilhelm Runge bei der Firma TELEFUNKEN an Richtfunk-Anlagen im UHF-Bereich. Aus reiner Neugier legte er versuchsweise die Antenne eines solchen 600 MHz-Senders senkrecht nach oben schauend auf den Boden und daneben eine zweite Antenne, die mit einem Detektor verbunden war. Er wollte damit mögliche Rückstrahlungen von überfliegenden Flugzeugen untersuchen. Eine *Ju 52*, die in 5000 m Höhe flog, konnte auf diese Weise einwandfrei detektiert werden.

Die Firma Lorenz, als dritter industrieller Vertreter der damaligen deutschen Funkmeßtechnik, machte 1936 erfolgreich Versuche mit einem Radar bei 430 MHz und einer Sendeleistung von 400 W vom Dach ihrer Labors in Berlin aus.

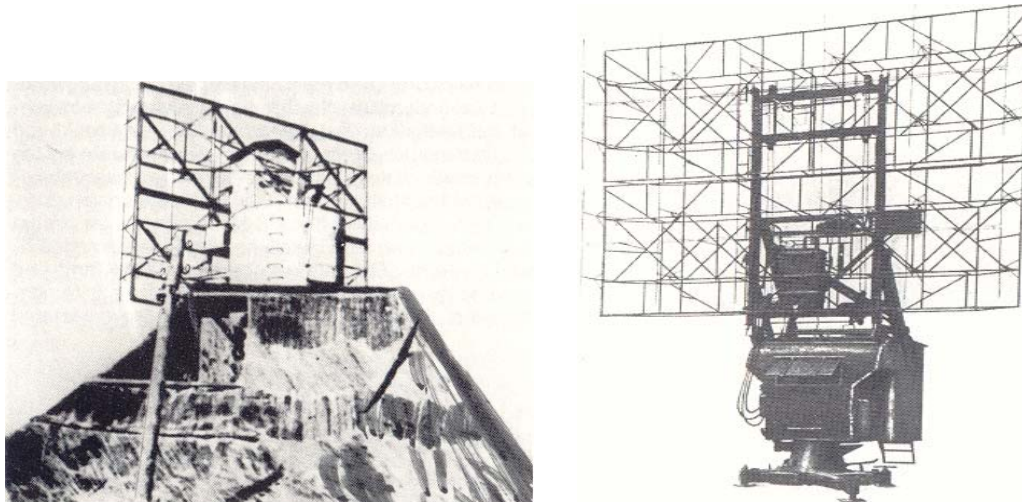
Neben der Industrie waren auch mehrere Forschungsinstitute auf dem Gebiet der Funkmeßtechnik tätig. Die beiden namhaftesten Vertreter sind die "Drahtlos-Luftelektrische Versuchsgesellschaft Gräfelfing" (DVG) sowie das "Flugfunk-Forschungsinstitut Oberpfaffenhofen" (FFO).

Radar war nun definitiv geboren! Industrie und Forschungsinstitute hatten den Boden bereitet für die Entwicklung einer Vielzahl von Radarsystemen, von denen sich viele anschickten, Berühmtheit zu erlangen.

Deutsche Funkmeßtechnik im Zweiten Weltkrieg

Die Entwicklung der deutschen Funkmeßtechnik in den Jahren vor und insbesondere während des Zweiten Weltkrieges war in vielerlei Hinsicht von äußeren und nicht-technischen Einflüssen geprägt. Die politische Führung jener Epoche zeigte nur sehr begrenztes Interesse für die Möglichkeiten, die Radar bot. In Anbetracht der ungünstigen Randbedingungen, unter denen die deutschen Ingenieure gezwungen waren zu arbeiten, müssen ihre fundamentalen und weitsichtigen Errungenschaften umso mehr gewürdigt werden. Im folgenden sollen einige repräsentative Schrittmacher der Radartechnik vorgestellt werden.

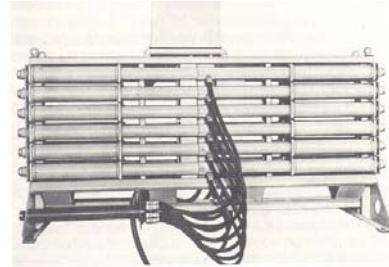
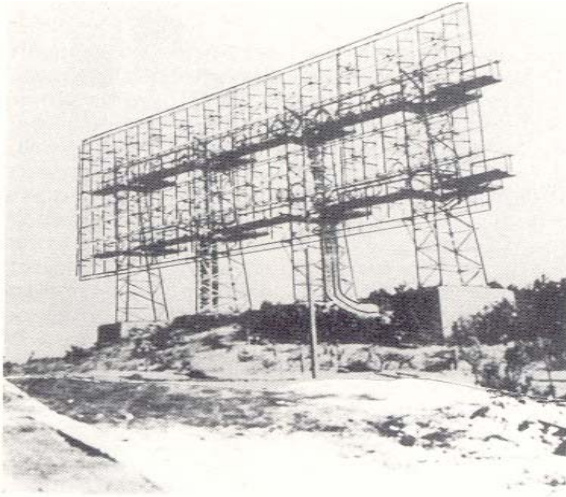
Freya entstand als Ergebnis der Arbeiten der GEMA auf dem Gebiet des Pulsradars und wurde erstmals 1938 von der Marine zur Küstenüberwachung eingesetzt. Das Gerät arbeitete auf einer Frequenz von 125 MHz und verfügte über eine Ausgangsleistung von 8 kW. Nach der anfangs angewandten, relativ ungenauen Maximumpeilung wurde ab 1940 das sog. Minimumpeilverfahren eingeführt, das mit zwei schielenden Antennendiagrammen arbeitete, deren Schnittpunkt eine scharfe Nullstelle aufwies. Die Winkelpeilgenauigkeit erreichte damit einen Wert von $\pm 0.8^\circ$.



Erstes *Freya*-Gerät auf Wangerooge und die erste Serienausführung

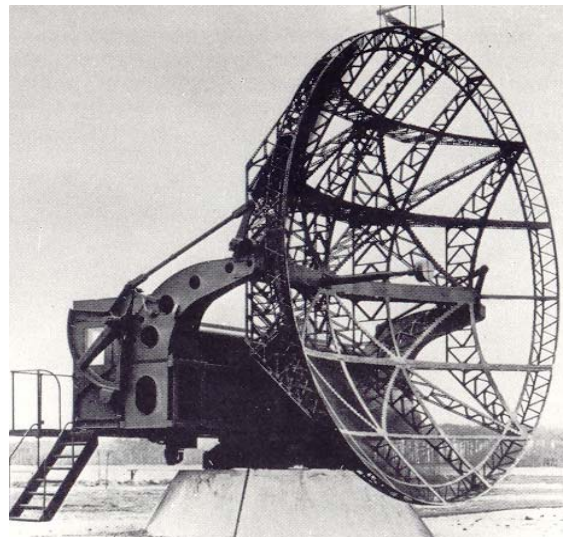
Seine Feuerprobe bestand das *Freya*-Gerät am 18. Dezember 1939 auf der Nordseeinsel Wangerooge, als mit seiner Hilfe ein britischer Bomberverband auf eine Entfernung von 130 km im Anflug auf die Deutsche Bucht entdeckt wurde. Der darauf folgende Einsatz deutscher Abfangjäger kann wohl als die erste durch Radar unterstützte Aktion der Luftwaffe gelten.

Kaum jemand denkt heute daran, daß die Wurzeln moderner phasengesteuerter Radare in eine Zeit vor mehr als 60 Jahren zurückreichen. Die Fernsuchanlage *Mammut 1* war ein Frühwarngerät mit einer Antenne von beeindruckendem Ausmaß. Sie bestand aus acht *Freya*-Antennen und spannte eine Fläche von 10 m x 25 m auf. Die Strahlrichtung konnte mittels sog. Wellenschieber im Azimut elektronisch um $\pm 50^\circ$ geschwenkt werden. *Mammut 1* war in der Lage, von der deutschen Nordseeküste aus den Luftraum von der Kanalküste bis zu den britischen Midlands zu überwachen.



Fernsuchanlage *Mammut 1* und Phasenschieber zur elektronischen Strahlschwenkung

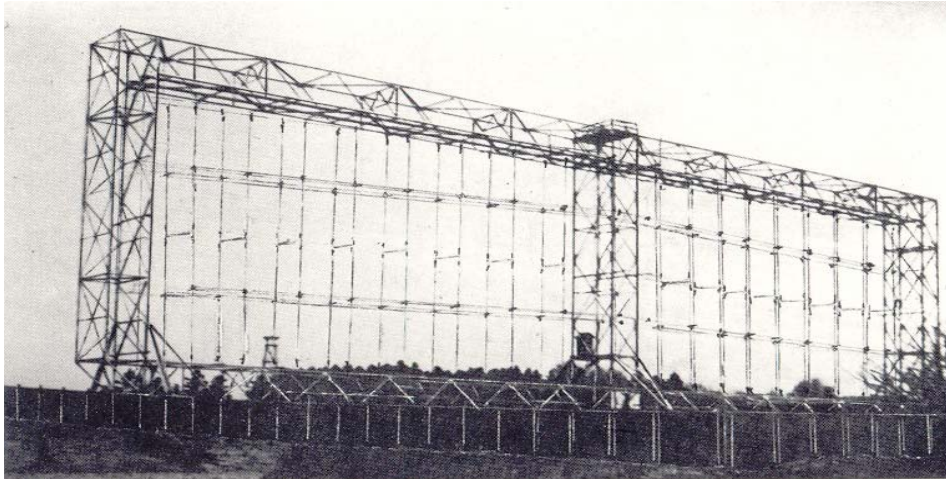
Im März 1939 stellte TELEFUNKEN das Flakzielgerät *Würzburg* mit seiner charakteristischen Parabol-Reflektorantenne vor. Sie hatte einen Durchmesser von 3 m, das Gerät arbeitete bei einer Frequenz von 565 MHz und erreichte mit 8 kW Pulsleistung eine instrumentierte Reichweite von 40 km. *Würzburg C* verfügte als Verbesserung gegenüber der Version *A* über eine Antenne mit einem exzentrisch rotierenden Speisedipol anstelle eines feststehenden, sodaß das Antennendiagramm auf einem Kegelmantel umlief und eine Minimumpeilung in zwei Ebenen möglich war. Seine Meßgenauigkeit erreichte mit maximalen Fehlerwerten von $\pm 25\text{m}$ bis $\pm 40\text{m}$ für die Entfernung und von $\pm 0.5^\circ$ für den Azimut- und Elevationswinkel eine beachtliche Präzision. Bis zum Kriegsende wurden 4000 *Würzburg*-Geräte gebaut.



Würzburg A und *Würzburg-Riese*

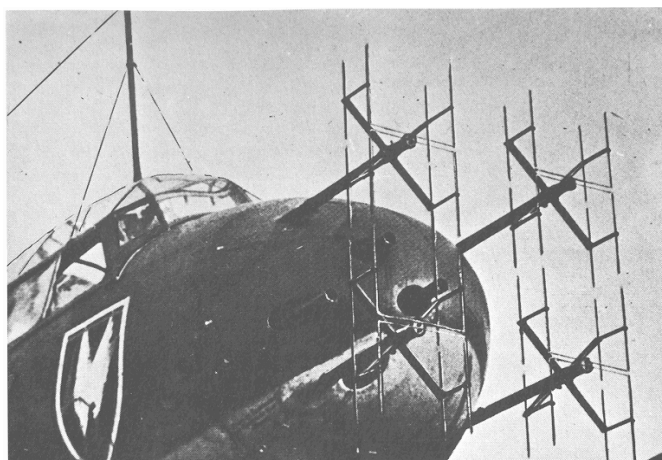
Zur Unterstützung der Jägerführung durch *Freya* wurde das Gerät *Würzburg-Riese* als Zielverfolgungsradar eingeführt. Es besaß einen Parabolspeigel von 7.4 m Durchmesser und eine dadurch vergrößerte Reichweite von bis zu 70 km.

Ein weiterer Meilenstein deutscher Radartechnik war die Leitstrahlanlage *Knickebein*, eines der ersten Überhorizont-Versuchsgeräte. Im Jahr 1941 wurde es von TELEFUNKEN in Betrieb genommen. Die Betriebsfrequenz lag bei 30 MHz, also am oberen Ende des Kurzwellenbereichs. Durch Nutzung der Reflexion der abgestrahlten und empfangenen Signale an leitenden Ionosphärenschichten und an der Erdoberfläche wurden Reichweiten von mehreren tausend Kilometern erreicht.



Leitstrahlanlage *Knickebein*

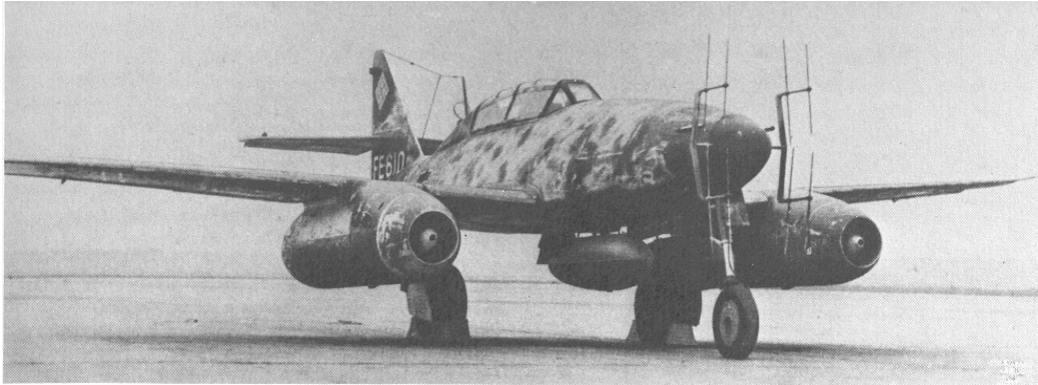
Einer der wichtigsten Vertreter im Bereich der Bordradare war das ebenfalls von TELEFUNKEN entwickelte Gerät *Lichtenstein BC* für Nachtjäger. Es war im Herbst 1941 einsatzbereit, arbeitete bei einer Frequenz von 490 MHz und verfügte über eine Ausgangsleistung von 1.5 kW. Seine Antenne bestand aus vier Quadranten zu jeweils vier Dipolen und Reflektoren. Die Quadranten konnten über einen mechanisch rotierenden kapazitiven Schalter einer kreisförmigen Phasenleitung gespeist werden, wodurch ein konisch rotierender Strahl entstand. Die Zielverfolgung war damit durch eine zweidimensionale Minimumpeilung möglich. Auf eine Reichweite von 4 km konnte eine Entfernungsmeßgenauigkeit von ± 100 m mit einem maximalen Winkelfehler von $\pm 2.5^\circ$ erzielt werden.



FuG 202 Lichtenstein BC installiert in einer *Ju 88*

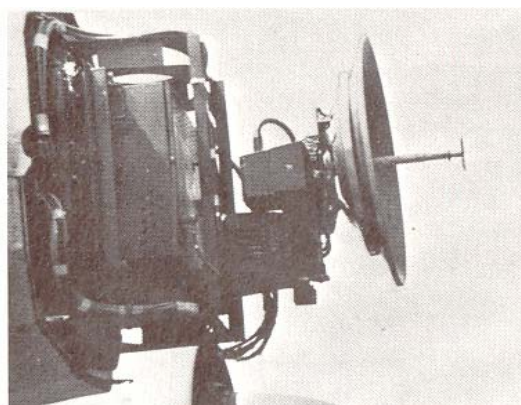
Spätere Ausführungen mit der Bezeichnung *Lichtenstein SN2* wurden bei vergleichsweise tiefen Frequenzen unter 100 MHz eingesetzt um deren Reichweite zu erhöhen. Mehr als 2000 Geräte wurden gebaut.

Parallel zu den Aktivitäten bei TELEFUNKEN entwickelten SIEMENS und das FFO die *Neptun*-Gerätefamilie, vorgesehen für kleinere Flugzeuge. Als eine von mehreren Varianten wurde das Gerät *FuG 218 V2* in einer Stückzahl von über 150 Exemplaren gebaut. Sein Frequenzbereich lag zwischen 162 und 187 MHz, die Sendeleistung bei 2 kW. Wie bei *Lichtenstein* kam als Antenne eine Dipol/Reflektor-Gruppe zum Einsatz.



FuG 218 V2 Neptun in einer *Me 262*

Das erste deutsche Bordradar mit den wesentlichen Merkmalen späterer Nachkriegsgeräte wurde im Jahr 1943 bei TELEFUNKEN fertiggestellt und trug die Bezeichnung *Berlin N1A*. Es arbeitete bei einer Frequenz von 3.3 GHz und verfügte über eine Parabol-Reflektorantenne von 70 cm Durchmesser und rotierendem Speisedipol. Das komplette Radar wurde von einem hölzernen Radom abgedeckt. Die von einem Magnetron-Sender erzeugte Ausgangsleistung von 15 kW ermöglichte eine Reichweite von 9 km gegen Luftziele. Insgesamt wurden 25 *Berlin*-Geräte gebaut.

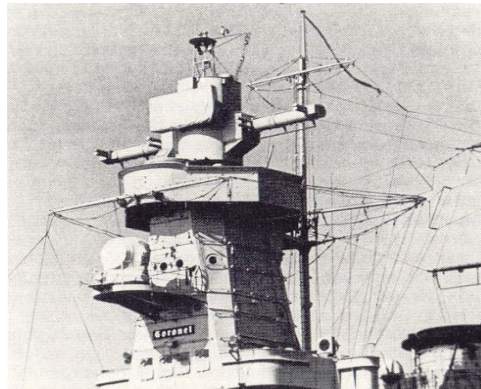


Bordradar *Berlin N1A*

Der Anwendung von Radar auf Schiffen kam zumindest zu Beginn des Krieges wesentlich geringere Bedeutung zu als der für Boden- oder Bordradare in Flugzeugen. Erst die positiven Erfahrungen, die die Marine im Kampfeinsatz mit Versuchsgeräten an Bord von Schiffen sammelte, öffnete deren Akzeptanz für die

neue Technik. Viele taktische Regeln schienen nun ihre Bedeutung zu verlieren: es existierte kein Unterschied mehr zwischen Tag und Nacht, schlechte Sicht infolge von Regen oder Nebel war kein Hindernis mehr.

Die ersten *Seetakt*-Geräte (von: *seetaktisch*) waren unmittelbare Ergebnisse der Entwicklungen der GEMA im Jahr 1935. Als erstes Schiff wurde das Panzerschiff *Admiral Graf Spee* 1938 mit einem *FuMG 38 G* ausgerüstet. Das Gerät verfügte über eine Ausgangsleistung von 1 kW bei einer Frequenz um 500 MHz. Infolge der exponierten Montage an der Mastspitze konnten Schiffsziele auf 25 km Entfernung geortet werden. Der maximale Winkelpfeilfehler lag im Bereich von $\pm 5^\circ$.



FuMG 38 G (von einem Segeltuch abgedeckt) montiert am Mast der *Admiral Graf Spee*

In den Jahren nach 1939 wurden *Seetakt*-Geräte auf einer großen Zahl deutscher Schiffe installiert. Auch als Bodenradare wurden sie ab 1942 entlang der deutschen Küsten und in den besetzten Gebieten eingesetzt.

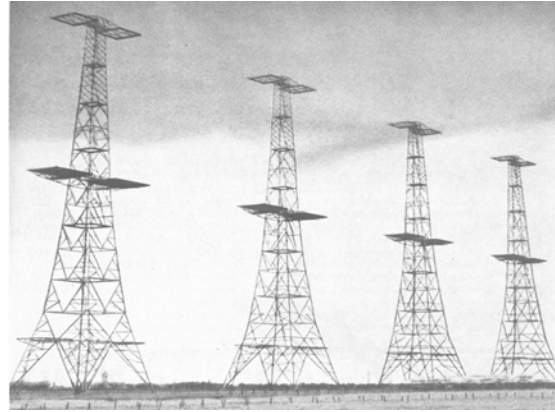
Darüber hinaus wurden *Würzburg* und *Lichtenstein*-Geräte von der Marine für die Verwendung an Bord von Schiffen wie auch an Land modifiziert. Selbst U-Boote wurden mit Radar ausgerüstet, allerdings unter großen Schwierigkeiten, verursacht durch erhebliche Platzbeschränkungen und widrige Umweltbedingungen beim Betrieb.

Britische Radarentwicklungen im Zweiten Weltkrieg

Mitte der dreißiger Jahre sah sich Großbritannien einer zunehmenden Bedrohung durch die deutsche Wiederaufrüstung ausgesetzt. Dies veranlasste den Leiter des National Physical Laboratory, Sir Robert Watson-Watt, im Februar 1935 eine inzwischen historische Denkschrift zu verfassen und dem Parlament vorzulegen. Sie trägt den Titel „Detection and Location of Aircraft by Radio Methods“. Dies war die Geburtsstunde der britischen Radarentwicklung, deren Ziel zunächst der Aufbau eines Frühwarnsystems zur Luftverteidigung war.

Bereits im März 1936 ging die erste Station der später *Chain Home* benannten Radarkette in Bawdsey Manor an der Themsemündung in Betrieb. Ab dem Frühjahr 1939 kontrollierten 20 Stationen mit jeweils 80 m hohen Antennentürmen lückenlos die gesamte englische Süd- und Ostküste. Die *Chain Home* arbeitete im Frequenzbereich von 22 bis 30 MHz mit Leistungen von 200 kW pro Station; damit ergaben

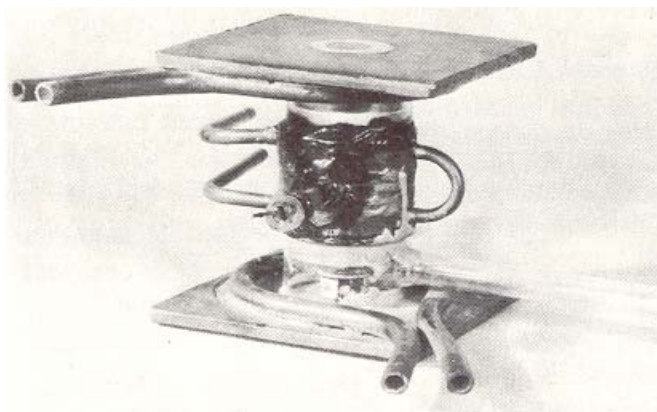
sich Reichweiten von bis zu 200 km gegen Luftziele. Wenig später folgte als Ergänzung die *Chain Home Low* bei 200 MHz, um insbesondere tieffliegende Objekte mit einer höheren Ortungsgenauigkeit zu entdecken.



Sendetürme der *Chain Home*

Das erste operationelle Bordradar wurde im Herbst 1940 in ein britisches Jagdflugzeug eingebaut. Im April 1941 waren bereits 110 Flugzeuge mit Radargeräten ausgestattet. Sie arbeiteten im Frequenzbereich um 200 MHz.

Ein Meilenstein auf dem Weg zu höheren Frequenzen war die Erfindung des Magnetrons durch F. Randall und A. H. Boot von der Universität Birmingham im Februar 1940. Es stellte das Kernelement aller späteren Radargeräte im Mikrowellenbereich dar, die zunächst bei Frequenzen um 3 GHz arbeiteten. Nachdem sowohl in Großbritannien als auch in den USA das Potential der Magnetron-Technik in vollem Umfang erkannt worden war, wurde deren gemeinsame Weiterentwicklung am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Boston beschlossen.



Magnetron von Randall und Boot im Jahr 1940

Eine sehr wirkungsvolle Methode, Radar zu stören, wurde erstmals von britischen Bombern während ihres Angriffs auf Hamburg im Juli 1943 eingesetzt. Sie bestand im Abwurf von großen Mengen schmaler Stanniolstreifen mit der Bezeichnung *Window* (deutsches Synonym: *Düppe*). Sie waren in ihren Abmessungen auf die halbe Wellenlänge der deutschen Luftabwehr-Radare ausgelegt und wirkten so als langsam herabsinkende Wolken von Dipolen, deren Echos die anfliegenden Verbände im Radar nicht mehr erkennbar machten.

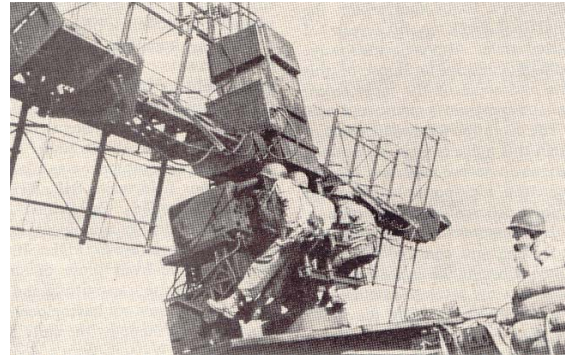
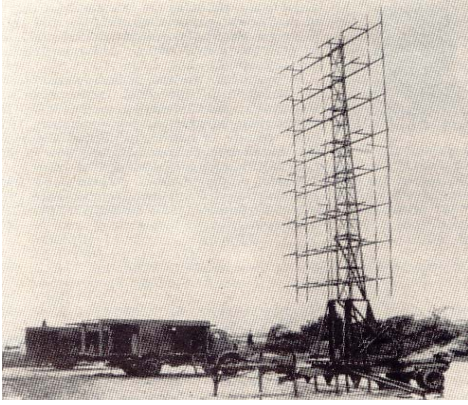


Produktion von *Window* und *Lancaster*-Bomber beim Abwurf über Deutschland im Juli 1943

Als Gegen-Gegenmaßnahme machten sich deutsche Ingenieure daran, das zu entwickeln, was heute mit "Moving Target Indication" (MTI) bezeichnet wird. Ziel war die Unterdrückung der unerwünschten quasistationären Echos der *Düppe*-Wolken, um die sich bewegenden Luftziele wieder sichtbar werden zu lassen. Eine große Zahl von *Würzburg*-Geräten wurden daraufhin mit dieser Technik nachgerüstet.

Ein Blick über den Atlantik: Radar in den USA bis 1945

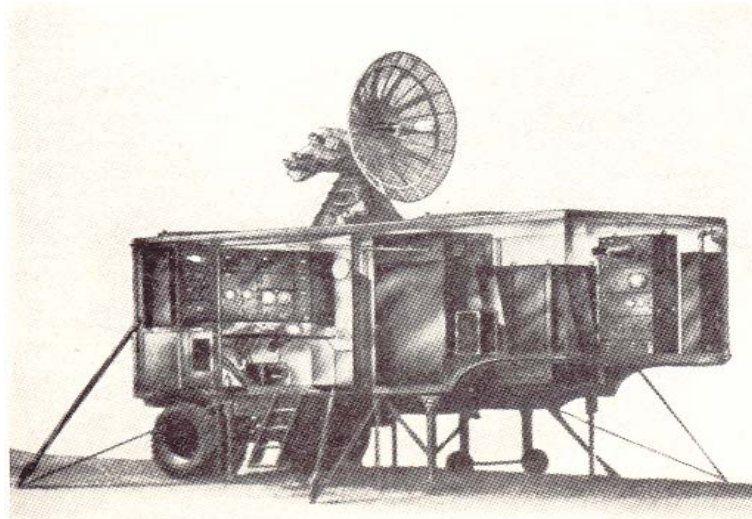
In den Vereinigten Staaten bestand nach Ausbruch des Zweiten Weltkriegs nicht der Zeitdruck, dem die Radarentwicklung in Deutschland und Großbritannien ausgesetzt war. Das Naval Research Laboratory (NRL) beschäftigte sich zunächst vorwiegend mit der Impulstechnik im VHF-Bereich. Als die USA in den Krieg eintraten, standen neben anderen das Luftüberwachungsradar *SCR-270* bei einer Frequenz von 106 MHz und das Zielverfolgungsradar *SCR-268* bei 205 MHz zur Verfügung. Bereits im Juni 1937 hatte das US Air Corps die Spezifikation für ein Weitbereichs-Zielentdeckungs- und Verfolgungsradar herausgegeben, das eine Reichweite von mindestens 50 Meilen haben sollte. Aufgrund dieser Spezifikation entstanden die Geräte *SCR-270* (mobil) und *SCR-271* (stationär) mit einer Ausgangleistung von 100 kW. Rund 800 Geräte dieses Typs wurden insgesamt gebaut. Mit dem *SCR-270* wurden nachweislich die anfliegenden japanischen Verbände beim Angriff auf Pearl Harbour im Dezember 1941 entdeckt. Die nachgeschaltete Führungs- und Befehls-ebene erkannte jedoch den Inhalt und die Bedeutung der Radarsignale zu spät. Der größte Teil der US Pazifikflotte wurde daraufhin zerstört oder schwer beschädigt.



Luftüberwachungsradar SCR-270 und Zielverfolgungsradar SCR-268

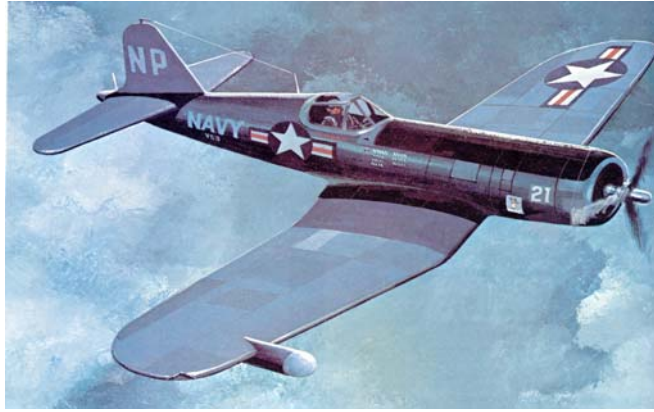
Das SCR-268 wurde erstmals von der US Army in Fort Monroe im Dezember 1938 in Betrieb genommen. Die Antenne bestand, wie zur damaligen Zeit weit verbreitet, aus Dipolfeldern mit Reflektoren. Die Signalauswertung und die Zielverfolgung wurde vom Bedienpersonal vorgenommen, das dann auch manuell die Antennen nachführte. Infolge seiner für die Feuerleitung unzureichenden Genauigkeit der Winkelmessung musste das SCR-268 mit optischen Zielverfolgungseinrichtungen ergänzt werden. Bei Nachteinsätzen kamen zur Unterstützung vom Radar gesteuerte Scheinwerfer zum Einsatz.

Auf der Grundlage der mit Großbritannien gemeinsamen Entwicklung der Magnetron-Technologie am MIT begann 1943 die Produktion der ersten Mikrowellen-Feuerleitradare SCR-584. Sie arbeiteten im Frequenzbereich um 3 GHz mit einem wesentlich reduzierten Winkelmeßfehler von nur noch etwa 0.1° . Die zusätzliche optische Zielvermessung war nun nicht mehr notwendig.



Feuerleitradar SCR-584

Auch die Technik der Bordradare profitierte von den britisch/amerikanischen Arbeiten am MIT und wies einen sehr weit fortgeschrittenen Stand auf. Als erster Nachtjäger war der *Vought F4U-4N Corsair* von 1944 an mit einem Bordradar ausgerüstet, das bereits damals im X-Band bei 10 GHz arbeitete.



Nachtjäger *Corsair* mit Bordradar AN/APS-6

Das von Sperry entwickelte Radar AN/APS-6 ging aus dem bei 9375 MHz mit einer Ausgangsleistung von 40 kW arbeitenden SCR-537 hervor. Zum Einbau im Flugzeug wurde aus dem rechten Flügel eine Kanone entfernt; an deren Stelle traten das Gehäuse des Radars und ein Radom. Der *Corsair* kam vorwiegend bei der amerikanischen Marine noch bis zum Korea-Krieg zum Einsatz.

Nachkriegsentwicklungen

Nach Ende des Zweiten Weltkrieges kam die Radarentwicklung in Deutschland gänzlich zum Erliegen. Jegliche Forschung auf diesem Gebiet war von den Alliierten bis 1950 verboten. Dennoch, die wesentlichen Grundlagen von Radarsystemen existierten, die Prinzipien von Puls- und Dauerstrich-Radaren waren erarbeitet, ihre erfolgreiche Anwendung zur Zielentdeckung und -verfolgung war nachgewiesen. Dies war eine stabile Grundlage für den Wiederbeginn der Arbeiten einer neuen deutschen Radarindustrie.

Erhebliche Fortschritte machte die Radartechnik in den Nachkriegsjahren insbesondere in den USA. Es entstanden die ersten kohärenten Systeme, und die Doppler-Signalverarbeitung wurde eingeführt. Hochleistungs-Klystrons stellten die dafür notwendige technologische Voraussetzung zur Verfügung. Die neue Technik der Puls-kompression führte zusammen mit kohärenter Doppler-Signalverarbeitung zur Hochauflösung bei Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessung. Eine weitere Neuerung bei der Zielverfolgung war die Einführung von Monopuls-Systemen. Parallel zu systemtheoretischen Arbeiten wurden neue Technologien verfügbar. Stellvertretend für viele seien Halbleiter und Mikroprozessoren genannt, die Schlüsselfunktionen in der weiteren Radarentwicklung einnahmen.

Als wesentlicher Meilenstein muß die Idee zum Synthetischen Apertur Radar (SAR) erwähnt werden, die im Juni 1951 von C. Wiley von der Goodyear Aircraft Corporation veröffentlicht wurde. Er wies theoretisch nach, daß durch eine geeignete Analyse der Empfangssignale eines kohärenten Radars im Frequenzbereich eine extrem hohe Winkelauflösung zu erreichen sei. Im Juli 1953 demonstrierte eine Gruppe von Wissenschaftlern der Universität von Illinois erste experimentelle Ergebnisse eines SAR.

Deutsche Firmen bauten von 1950 an zunächst britische Radargeräte zur zivilen Luftraum- und Küstenüberwachung auf Lizenzbasis nach. Die nachfolgenden Jahre waren in Europa und weltweit durch zahlreiche internationale Kooperationen gekennzeichnet. Aus diesem Grund kann die Geschichte der Radartechnik von dieser Zeit an nicht mehr nur auf nationaler Basis weiterverfolgt werden.

In den folgenden Abschnitten soll deshalb die Entwicklung in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts anhand typischer Anwendungen und technischer Meilensteine nachgezeichnet werden.

Überwachung von Luft- und Schiffsverkehr

Eine der ersten und bis heute wichtigsten zivilen Anwendungen der Radartechnik ist die Überwachung und Lenkung des Luftverkehrs (Air Traffic Control, ATC). Mittel- und Weitbereichsradare decken dabei jeweils Sektoren von einigen hundert Kilometer Durchmesser ab. Im unmittelbaren Flughafenbereich werden Radare mit geringeren Reichweiten für die tageslicht- und wetterunabhängige Anflugkontrolle (Ground Controlled Approach, GCA) eingesetzt.

Ein früher Vertreter eines ATC-Radars ist die Mittelbereichs-Rundsicht-Radaranlage *GRS* (Ground Radar System). Sie entstand nach vorausgegangenen Lizenzfertigungen als erste Eigenentwicklung eines Großradars zwischen 1955 und 1957 bei TELEFUNKEN und kam in mehreren europäischen Ländern zum Einsatz. Besondere Erwähnung verdient die gewaltige Antenne mit einem Reflektor von 7 m x 14.5 m und einem Gesamtgewicht von ca. 30 t. *GRS* arbeitete im L-Band (1250 bis 1350 MHz) mit einer Reichweite von 220 km und einer Zielerfassungshöhe von bis zu 16000 m.



Mittelbereichs-Rundsicht Radaranlagen *GRS* und *SRE-M*

Die Anlage *SRE-M* (Surveillance Radar Equipment-Medium Range) folgte *GRS* nach und ist seit 1976 bis heute in Betrieb. Sie verfügt über einen kohärenten Klystron-Sender mit einer Impulsausgangsleistung von 2.5 MW. Die Reichweite gegen ein Ziel mit 8 m² Rückstrahlquerschnitt beträgt ca. 550 km.

Das weltgrößte radarüberwachte Schiffsverkehrssicherungssystem wird an den Mündungen von Elbe, Weser und Jade unter dem Namen *SEATRACK 7000* betrieben. Kernelement ist eine Radarkette, die im Frequenzbereich 8.8 bis 9.2 GHz arbeitet und eine variable instrumentierte Reichweite von 12 bis 48 km ermöglicht. Bis zu 200 feste oder bewegte Ziele können pro Sekunde detektiert und lokalisiert werden.



Verkehrszentrale und Lotsenarbeitsplätze von *SEATRACK 7000*

Bordradar

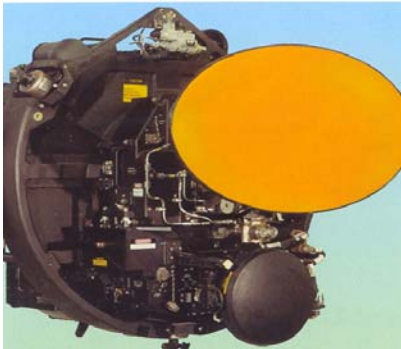
Bordradare für Jagdflugzeuge sind seit jeher eine der größten technischen Herausforderungen für Radaringenieure. Die militärischen Betreiber verlangen eine Vielzahl von Systemeigenschaften, die oft nur schwer in Einklang zu bringen sind, wie höchste Leistungsfähigkeit, geringes Gewicht und Volumen, limitierte Leistungsaufnahme aus dem Flugzeugbordnetz, größtmögliche Zuverlässigkeit, Redundanz der wesentlichen Funktionen.

Die ersten Bordradare der Nachkriegszeit gehörten zur Generation der "analogen" Radare. Ein charakteristischer Vertreter dieser Gattung ist das *NASARR* (*North American Search and Ranging Radar*), das im *F-104 Starfighter* zum Einsatz kam. Dieses Navigations- und Feuerleitradar wurde in den Jahren 1961 bis 1966 von einem europäischen Firmenkonsortium in Lizenz der US-Firma Autonetics gebaut.



Feuerleitgerät *NASARR* im *F-104 Starfighter*

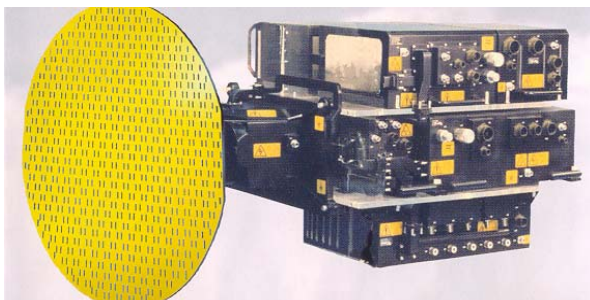
Die weitere Entwicklung führte vom analogen zum digitalen Multifunktionsradar. Nahezu alle Funktionen dieser Geräte werden von einem Kontrollcomputer per Software gesteuert. Das „*Tornado Nose Radar*“ ist ein markantes Beispiel dieser Entwicklungsstufe. Sein Radarprozessor steuert mehrere Betriebsmoden wie Luft-Luft- und Luft-Boden-Angriff, Geländeabbildung oder Geländeverfolgung im Tiefflug.



Tornado Nose Radar und MRCA Tornado

Den derzeitigen Stand der Technik repräsentiert in eindrucksvoller Weise *Captor*, das Bordradar des *Eurofighter*. Vier Nationen haben dieses Radar gemeinsam entwickelt und produzieren es: Deutschland, Großbritannien, Italien und Spanien. Das Radar *Captor* ebenso wie das Flugzeug *Eurofighter* sind aktuelle Beispiele für den internationalen Charakter heutiger Hochtechnologie.

Captor arbeitet im für moderne Bordradare üblichen Frequenzbereich um 10 GHz und verfügt über eine planare Hohlleiter-Schlitzantenne, die in Azimut und Elevation geschwenkt wird. Der Sender ist mit einer Wanderfeldröhre ausgestattet, Signal- und Datenprozessor arbeiten voll digital und ermöglichen den Einsatz von mehr als 30 Betriebsmoden.



Multifunktionsradar Captor für den Eurofighter

Insbesondere bezüglich der Antenneneigenschaften hat *Captor* einen Leistungshöchststand erreicht. Er ist mit dieser Technologie nicht mehr zu verbessern. Trotzdem verbleibt ein systembedingter Schwachpunkt: die aufgrund der mechanischen Bewegung gegebene eingeschränkte räumliche Agilität der Antennenblickrichtung. Aus diesem Grund gehört die Zukunft der Bordradare sicher dem Radar mit elektronisch geschwenkter Antenne.

Schiffsradar

Auch im Bereich des Schiffsradars entstanden die ersten Nachkriegsentwicklungen auf der Basis von Lizenzverträgen. Eine der ersten modernen Schiffsradaranlagen, die schließlich zur Standardausrüstung der Bundesmarine wurde, war *TRS-N*.



Schiffsradaranlage *TRS-N*

TRS-N wurde in den fünfziger und sechziger Jahren von TELEFUNKEN entwickelt und in 69 Exemplaren ausgeliefert. Es handelte sich um eine Zweiband-Anlage, deren Betriebsfrequenz wahlweise von 5.5 auf 9.3 GHz umgeschaltet werden konnte. Für beide Frequenzen wurde derselbe Antennenreflektor, ein Zylinderparabol, verwendet. *TRS-N* wurde hauptsächlich auf kleinen Einheiten der Marine, z.B. auf Minenräumbooten, eingesetzt.

Früher noch als an Bord von Flugzeugen faßte bei Boden- und Schiffsradaren die schon erwähnte neue Technik Fuß: Radare mit elektronischer Strahlschwenkung durch phasengesteuerte Antennen.

Radare mit elektronischer Strahlschwenkung

Einen Quantensprung ihrer Leistungsfähigkeit erfährt die neue Generation von Radaren durch den Einsatz von Antennen mit elektronischer Strahlschwenkung. Solche "Phased Array"-Radare für Kampfflugzeuge werden heute weltweit entwickelt und bald zur Serienausstattung moderner Jets gehören. Im Boden- und Schiffsbereich, wo in der Regel weniger strenge Einschränkungen bezüglich Gewicht, Volumen, Leistungsaufnahme und Kühlmöglichkeiten herrschen, gehören phasengesteuerte Radare schon seit Jahren zum Standard.

Diese Radare verfügen über Antennenaperturen mit hunderten oder gar tausenden einzelner Strahlerelemente anstelle einer Reflektorantenne mit nur einem Speisestrahler oder einer phasenstarrten Hohlleiterschlitzeantenne. Die den Strahlerelementen zugeführte Leistung kann von diesen individuell in Betrag und Phase beeinflusst werden, wodurch die Gesamtantenne Wellenfronten nahezu beliebiger Gestalt erzeugen kann. Aufgrund ihrer reziproken Natur verfügt die Antenne über

diese Eigenschaft im Sende- wie im Empfangsfall. Im praktischen Betrieb kann das Diagramm auf diese Weise um etwa $\pm 60^\circ$ geschwenkt werden; für größere Winkel sinkt der Wirkungsgrad der Antenne. Im Vergleich zu einer herkömmlichen, mechanisch bewegten Antenne kann ein "Phased Array" sein Diagramm nahezu verzugsfrei im Raum schwenken.

Radare mit elektronischer Strahlschwenkung gliedern sich grundsätzlich in zwei Gruppen. Bei der ersten wird die Sendeleistung an zentraler Stelle erzeugt und von einem Verteilnetzwerk, das mit planaren Leistungsteilern oder in Hohlleitertechnik ausgeführt ist, den Strahlerelementen zugeführt. Im zweiten, fortschrittlicheren Fall des sog. "Active Phased Array" verfügt dieses statt über passive Strahlerelemente über aktive Sende-/Empfangsmodule. Jedes dieser Module stellt einen hochminiaturisierten Sender und Empfänger dar, bei dem Sende- und Empfangsweg in Amplitude und Phase gesteuert werden können. Ein so ausgestattetes System wird als AESA (Active Electronically Steered Array) - Radar bezeichnet. Gegenüber einem "passiven" Array bietet ein AESA-Radar zunächst eine sehr viel höhere Zuverlässigkeit, da seine Betriebsbereitschaft nicht mehr von einer einzigen Leistungsquelle, z. B. einer Wanderfeldröhre, abhängt. Dies führt zu einem Charakteristikum, für das keine deutsche Übersetzung üblich ist, der „Graceful Degradation“. Es bezeichnet die Tatsache, daß von der Gesamtzahl der Sende-/Empfangsmodule einer solchen Antenne etwa 5 bis 10 % ausfallen können, ohne daß eine merkbare Beeinträchtigung der Gesamtleistung der Antenne auftritt.

Eines der ersten Radarsysteme mit elektronischer Strahlschwenkung, das zudem auch einer der imposantesten Vertreter der Gattung ist, ist *AN/FPS-108 Cobra Dane*, ein hochauflösendes Weitbereichs-Bodenradar, das bereits 1977 auf Shemya Island/Alaska in Betrieb genommen wurde. Seine Aufgabe ist die Luftraumüberwachung über der Halbinsel Kamtschatka. *Cobra Dane* wurde von der Raytheon Company entwickelt, arbeitet im L-Band (1215 bis 1400 MHz) und verfügt über eine Apertur von 29 m Durchmesser. 15360 Sende/Empfangsmodule sind darauf untergebracht und strahlen eine Spitzenleistung von 15.4 MW ab. Dies erlaubt die Überwachung von Zielen mit einer Entfernungsauflösung von 1 m in einem 120° breiten Sektor bis zu Entfernungen von rund 1000 nautischen Meilen.



Cobra Dane und ein Teil des Arrays

Ein typisches Beispiel eines der ersten mobilen Luftraumüberwachungs-Radare ist *TRMS-3D (Telefunken Radar Mobil Such)*, das in den Jahren 1971 bis 1979 von TELEFUNKEN entwickelt wurde. Es handelt sich um ein passives "Phased Array" mit 4000 Strahlerelementen. Das im C-Band (4 bis 8 GHz) arbeitende System verfügt

damit über eine Antenne, die in Elevation elektronisch und im Azimut mechanisch geschwenkt werden kann. *TRMS-3D* überwacht gleichzeitig bis zu 4000 Ziele in einer Entfernung von maximal 200 km und in einem Höhenerfassungsbereich von bis zu 10000 m.



Mobiles Luftraumüberwachungs-Radar *TRMS-3D* und Ausschnitt aus dem Array

Weitgehend auf der Basis von *TRMS* entstand in den achtziger Jahren eine neue Generation von 3D-Schiffsradaren zur See- und Luftraumüberwachung. Sie eröffnete in diesem Aufgabenbereich eine weit höhere Leistungsfähigkeit als bisherige Systeme mit Parabol-Reflektorantennen. TELEFUNKEN SYSTEMTECHNIK lieferte im Jahr 1992 die erste Anlage mit der Bezeichnung *TRS-3D/16* an die dänische Marine zur Ausstattung ihrer neuen Schiffsklasse *SF-300* aus.



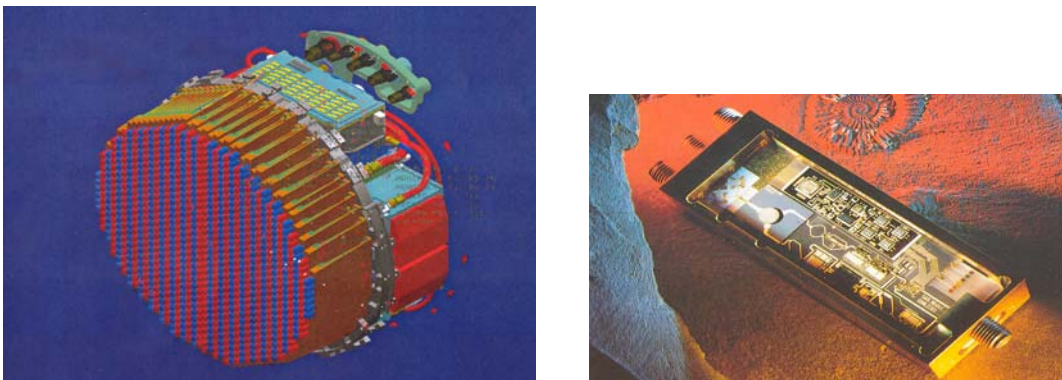
TRS-3D/16 auf einem Schiff *SF-300*

Ein bedeutendes luftgestütztes Weitbereichs-Überwachungsradar ist das von Westinghouse entwickelte *AN/APY-2* für *AWACS* (*Airborne Warning & Control System*). Seine Antenne, ein passives "Phased Array" für die Diagrammsteuerung in Elevation, rotiert zusammen mit dem sog. *Rotodome* mit 6 U/min auf dem Rumpf einer Boeing *E-3A Sentry*, der militärischen Version der legendären *B 707*. Sie besteht aus 28 übereinander liegenden Zeilen von Hohlleiter-Schlitzstrahlern, denen jeweils ein Phasenschieber zugeordnet ist, und mißt 8 m x 1.6 m. *AN/APY-2* arbeitet im S-Band (2 bis 4 GHz) und kann aus 10000 m Flughöhe tieffliegende Ziele bis zu einer Entfernung von 370 km verfolgen. Das erste *AWACS*-System wurde im März 1977 in Dienst gestellt.



E-3A Sentry / AWACS und die Antenne des AN/APY-2 Radars

Der Einsatz mit den höchsten Anforderungen an ein aktives "Phased Array"-Radar ist ohne Zweifel der an Bord eines Kampfflugzeuges. Mit dem Ziel, die potentielle Leistungsfähigkeit eines solchen Systems nachzuweisen, entstand in der Zusammenarbeit dreier Nationen der Demonstrator *AMSAR (Airborne Multi-Role Solid State Active Array Radar)*. Er ist eine gemeinsame Entwicklung der Firmen EADS (Deutschland), BAES (Großbritannien) und Thales (Frankreich). Das aktive Array arbeitet im X-Band (um 10 GHz) und besteht aus 1000 Sende-/Empfangsmodulen, die auf einer Fläche von 60 cm Durchmesser untergebracht sind. Die Module sind in GaAs-MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) -Technologie realisiert. *AMSAR* verfügt neben den schon genannten Merkmalen eines AESA-Radars über zusätzliche Eigenschaften, wie adaptives Leistungsmanagement oder die Möglichkeit, in Richtung erkannter Störer Nullstellen des Antennendiagramms zu erzeugen und diese damit auszublenden (Adaptive Beam Forming).



Radardemonstrator *AMSAR* und Sende/Empfangsmodul

An Bord von Schiffen werden heute AESA-Radare installiert, die den Status der Serienreife erreicht haben. Die deutsche Bundesmarine rüstet ihre Fregatten *F 124* mit dem Multifunktionsradar *APAR (Active Phased Array Radar)* aus, das zentraler Teil eines komplexen Verteidigungssystems zur Bekämpfung von See- und Luftzielen ist. *APAR* ist eine trinationale Entwicklung der Firmen EADS (Deutschland), Thales-NL (Niederlande) und Nortel (Kanada). Es besteht aus vier aktiven Antennen mit jeweils 3200 Sende/Empfangsmodulen, die im X-Band arbeiten und den gesamten Azimutsektor von 360° abdecken. Als Multifunktionsradar erfüllt *APAR* unterschiedlichste Aufgaben, wie Zielsuche und -erfassung, Ermittlung von Zielkursen, Durchführung von Bedrohungsrechnungen, Zielbeleuchtung und Führung von Abwehrraketen. Das erste System wurde im Jahr 2000 auf der Fregatte *F 124 "Sachsen"* installiert.

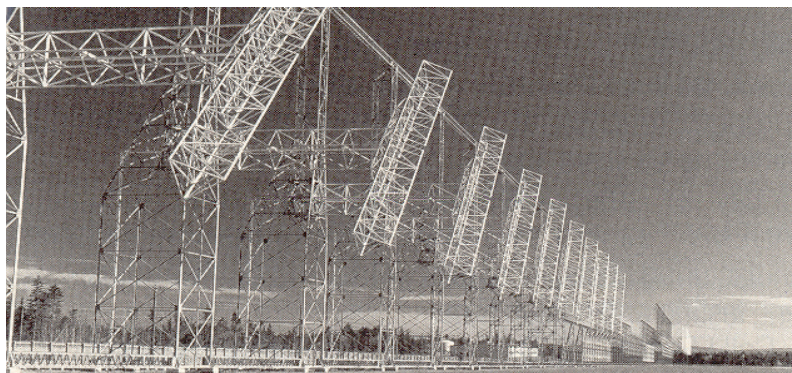


Fregatte F 124 "Sachsen" und APAR

Radar im Kurzwellen- und Millimeterwellenbereich

Weitaus die meisten Radarsysteme arbeiten im Mikrowellenbereich zwischen etwa 2 und 20 GHz. Für besondere Anwendungen werden jedoch sehr viel tiefere wie auch höhere Frequenzen eingesetzt. Überhorizontradare beispielsweise nutzen die spezifischen Eigenschaften von Kurzwellen, also von Frequenzen zwischen 3 und 30 MHz. Aus der HF-Kommunikation ist seit langem bekannt, daß sich Kurzwellen weit über den "Radiohorizont" hinaus ausbreiten können, indem sie teilweise mehrfach an leitenden Schichten der Ionosphäre und an der Erdoberfläche reflektiert werden.

Das amerikanische Überhorizontradar *AN/FPS-118 OTH-B (Over-the-Horizon Backscatter)* wurde in einer ersten Ausbaustufe im Oktober 1970 in Moscow/Maine in Dienst gestellt und ist einer der modernsten Vertreter dieser Technik. Die Anlage arbeitet als bistatisches FM/CW (Frequency Modulated Continuous Wave) -Doppler-radar im Frequenzbereich 5 bis 28 MHz. Die Sendeantenne hat eine Länge von mehr als 1200 m und 10 bis 45 m Höhe. Sie wird von 12 Sendern mit einer maximalen Dauerstrichleistung von 1 MW gespeist. Die Empfangsstation liegt in rund 150 km Entfernung in Columbia Falls/Maine. Innerhalb der Auffaßreichweite von *AN/FPS-118*, die sich von 500 bis 1800 nautischen Meilen erstreckt, werden selbst kleine Flugzeuge oder Marschflugkörper sicher detektiert.



Antennengruppe von AN/FPS-118 OTH-B

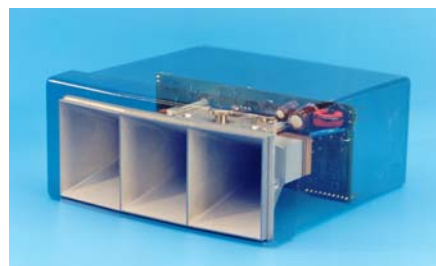
Das hochfrequente Ende des Radarspektrums um 100 GHz fand ab etwa 1970 das Interesse militärischer Nutzer. Als Folge der kurzen Wellenlängen um 3 mm ist es hier möglich, äußerst kompakte Geräte aufzubauen und mit kleinen Antennenaperturen relativ hohe Reichweiten zu erzielen. Zu den wichtigsten Anwendungen im sog. W-Band (75 bis 110 GHz) gehören Radarsuchköpfe für autonom gelenkte Flugkörper und endphasengelenkte Munition. Im Standardkaliber von 155 mm für Artilleriemunition wurde z. B. der Prototyp eines Radarfrontends mit einer Betriebsfrequenz von 94 GHz realisiert, das nicht mehr als 100 mm Durchmesser hat.



Flugprofil einer endphasengelenkten Munition und 94 GHz-Suchkopf

Parallel zu den militärischen Entwicklungen machte man sich Gedanken über zivile Anwendungen der Millimeterwellentechnik. Das Problem einer allwetterfähigen Hinderniswarnung für Kraftfahrzeuge schien sich durch den Einsatz miniaturisierter Radarsensoren mit hoher Entfernungsauflösung lösen zu lassen. Die dafür notwendigen kurzen Pulse bzw. großen Frequenzhübe bei FM/CW-Radaren bedingen entsprechend große Bandbreiten. Diese lassen sich bei sehr hohen Frequenzen einfacher realisieren als im klassischen Mikrowellenbereich.

Zunächst waren in Deutschland die Firmen AEG-TELEFUNKEN, SEL und VDO auf dem neuen Gebiet automobiler Abstandswarnradare aktiv. Bei AEG-TELEFUNKEN entstand Mitte der siebziger Jahre zunächst ein Versuchsgerät bei 35 GHz, später wechselte man in den inzwischen für Kfz-Anwendungen (*Adaptive Cruise Control, ACC*) international eingeführten Frequenzbereich um 77 GHz. Als Modulationsart hat sich FM/CW durchgesetzt, die Sendeleistungen liegen um 10 mW und die Auswertereichweiten zwischen 2 und 150 m.



Testfahrt mit einem 35 GHz-Abstandswarnradar und späterer Prototyp bei 77 GHz

Bemerkenswert ist die Tatsache, daß ACC-Systeme sicherlich die Klasse von Millimeterwellenradaren ist, die erstmals in sehr großen Stückzahlen gebaut wird. Als einer der ersten Kraftfahrzeughersteller stellte Mercedes-Benz sein System *Distronic* im Jahr 1999 für die S- und E-Klasse vor.

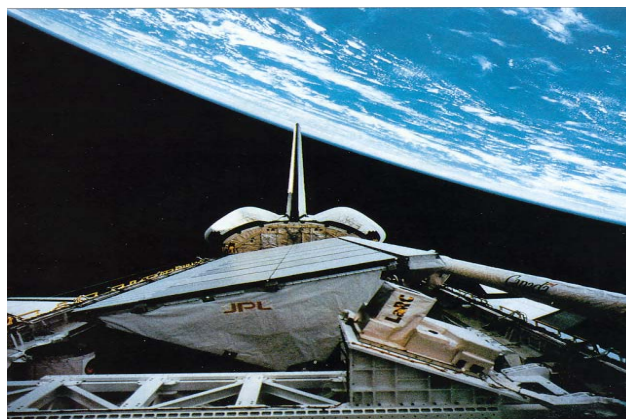


Anzeige der *Distronic* aus der Sicht des Fahrers und der Radarsensor mit Auswerteeinheit

Radar im Weltraum

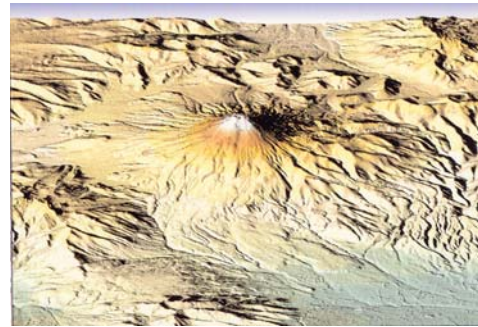
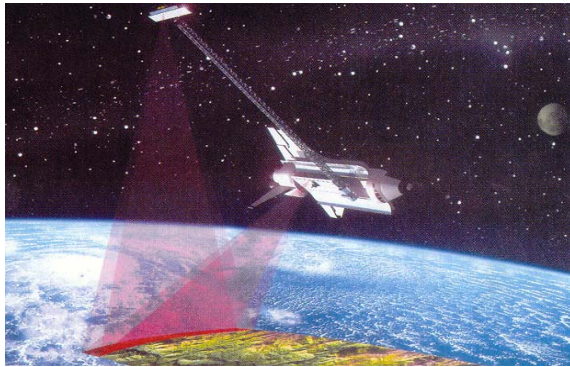
Im Jahr 1994 startete die NASA das Programm "Mission zum Planeten Erde" mit dem Ziel weltraumgestützter Erd- und Umwelterforschung mit Radar. Die Plattform für diese Experimente war das Spaceshuttle *Endeavour*. In einer Kooperation von NASA/JPL (National Aeronautics and Space Administration / Jet Propulsion Laboratory), DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) und ASI (Agenzia Spaziale Italiana) wurden zwei Radarsysteme mit synthetischer Apertur im C- und im X-Band entwickelt: *SIR-C* (*Shuttle Imaging Radar, Version C*) bei 5.3 GHz und *X-SAR* bei 9.6 GHz. Zusätzlich war ein L-Band SAR an Bord.

Erstmalig bot sich die Möglichkeit, Radarsignaturen der Erde bei verschiedenen Frequenzen, Polarisierungen und Einfallswinkeln über Land und See zu erhalten. Alle drei SAR-Systeme arbeiteten exakt synchronisiert um identische Verhältnisse bezüglich der Rückstreugeometrien vorzufinden; nur so bestand die Möglichkeit eines direkten Vergleichs der Empfangssignale bei den verschiedenen Frequenzen. Die Radar-Rohdaten wurden zu einer Bodenstation gesendet und dort zu SAR-Bildern prozessiert.



SIR-C/X-SAR in der Ladebucht des Spaceshuttle *Endeavour*

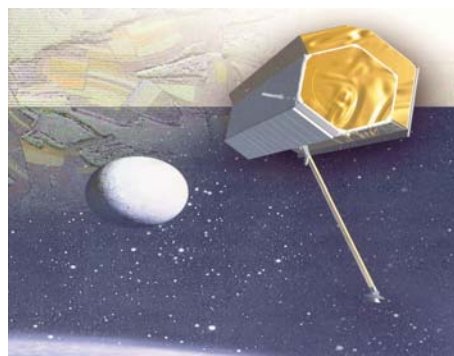
Sechs Jahre später, in der Zeit vom 12. bis 22. Februar 2000, war *Endeavour* erneut der Träger für eine Mission mit der unscheinbaren Bezeichnung STS 99, die aber aus der Sicht der Erderkundung mit Radar bis heute den Höhepunkt darstellt. Das Unternehmen mit der Bezeichnung "*Shuttle Radar Topography Mission*" (*SRTM*) benutzte SAR-Systeme, die aus *SIR-C/X-SAR* weiterentwickelt worden waren. Aus einer durchschnittlichen Höhe der Umlaufbahn von 233 km wurde die Erde zwischen dem 60. Grad nördlicher und dem 56. Grad südlicher Breite dreidimensional kartographiert. Mehr als 80 % der Landoberfläche wurden so erfaßt. Die gesamte Dauer der Meßkampagne betrug 222 Stunden; in dieser Zeit konnten Radardaten aufgezeichnet werden, die einem Umfang von etwa 20000 CDs entsprechen.



Spaceshuttle *Endeavour* während *SRTM* und ein 3D-Radarbild des Cotopaxi/Equador

Die technische Basis für *SRTM* war Radar-Interferometrie. Sende- und Empfangsantennen beider Sensoren waren in der Nutzlastbucht des Shuttle untergebracht. Zusätzlich war eine zweite Gruppe von Empfangsantennen an einem 60 m langen Ausleger montiert. Mit dem so realisierten interferometrischen System konnten 3D-Radarbilder mit bislang unerreichter Qualität gewonnen werden. Die laterale Auflösung liegt bei 30 m, die Höhenauflösung bei 6 m. Direkten Nutzen aus diesen Daten können z.B. Warnsysteme für die Luftfahrt ziehen. Insbesondere in bislang schlecht kartographierten Teilen der Welt werden diese Systeme erstmals in die Lage versetzt, auf genaue Geländeinformationen zuzugreifen.

Der nächste Schritt auf dem Weg satellitengestützter Erderkundung wird die Mission "*TerraSAR*" sein. Sie stützt sich auf zwei Satelliten mit SAR-Sensoren im X- und L-Band. Das ausschließlich für zivile Nutzer vorgesehene Projekt soll 2006 starten.



Trägersatellit für *TerraSAR-X*

Blick in die Zukunft

Der Kreis ist nun geschlossen von Christian Hülsmeyers Experimenten im Jahr 1904 bis zu *SRTM* im Jahr 2000. Im Rückblick auf die Entwicklung der Radartechnik im 20. Jahrhundert erscheint der Fortschritt nahezu unglaublich. Glücklicherweise gibt es auch heute keine Anzeichen, daß Ingenieure nicht auch in Zukunft neue Ideen haben und die Radartechnik zu weiteren Fortschritten führen werden.

Eine der wichtigsten Visionen der Zukunft sind Multi-Sensor-Systeme, also die Fusion von Radar- und Infrarot- oder anderer Systeme. Auf diese Weise können die Stärken der einzelnen kombiniert und etwaige Schwächen in den Hintergrund gerückt werden.

Militärische Bordradare werden sich in zunehmendem Maße mit Stealth-Eigenschaften moderner Flugzeuge auseinandersetzen haben. Der Widerspruch der Forderungen an ein Flugzeug, selbst Stealth-Eigenschaften zu haben, sich andererseits aber durch den Einsatz seines eigenen Bordradars nicht zu verraten, muß gelöst werden. Eine Möglichkeit kann hier das bistatische Radar mit einem abgesetzten Beleuchter und lediglich einem Empfänger an Bord des Flugzeugs bieten.

Radaranntenen werden zukünftig in vielen Fällen keine diskreten Körper mit den entsprechenden Radomen mehr sein, sondern als strukturintegrierte Antennen den gegebenen Geometrien ihrer Träger, seien es Flugzeuge, Schiffe oder andere Plattformen, angepaßt sein. Die nächsten Generationen von AESA-Radaren an Bord von Flugzeugen werden über mehr als ein festes Array verfügen um größere Raumwinkel abdecken zu können.

Nicht zuletzt wird die Geschwindigkeit digitaler Radardatenverarbeitung durch paralleles Prozessing erhöht werden um die hohen Datenraten für hochauflösende Radar-Betriebsmoden verarbeiten zu können.

Für Anregungen oder Kommentare zu dieser Veröffentlichung setzen Sie sich bitte mit dem Autor in Verbindung:

Dr.-Ing. Wolfgang Holpp
EADS Deutschland GmbH
Defence Electronics
Wörthstraße 85
89077 Ulm/Donau

E-mail: wolfgang.holpp@eads.com

Telefon: 0731-392-5606
Fax: 0731-392-4947