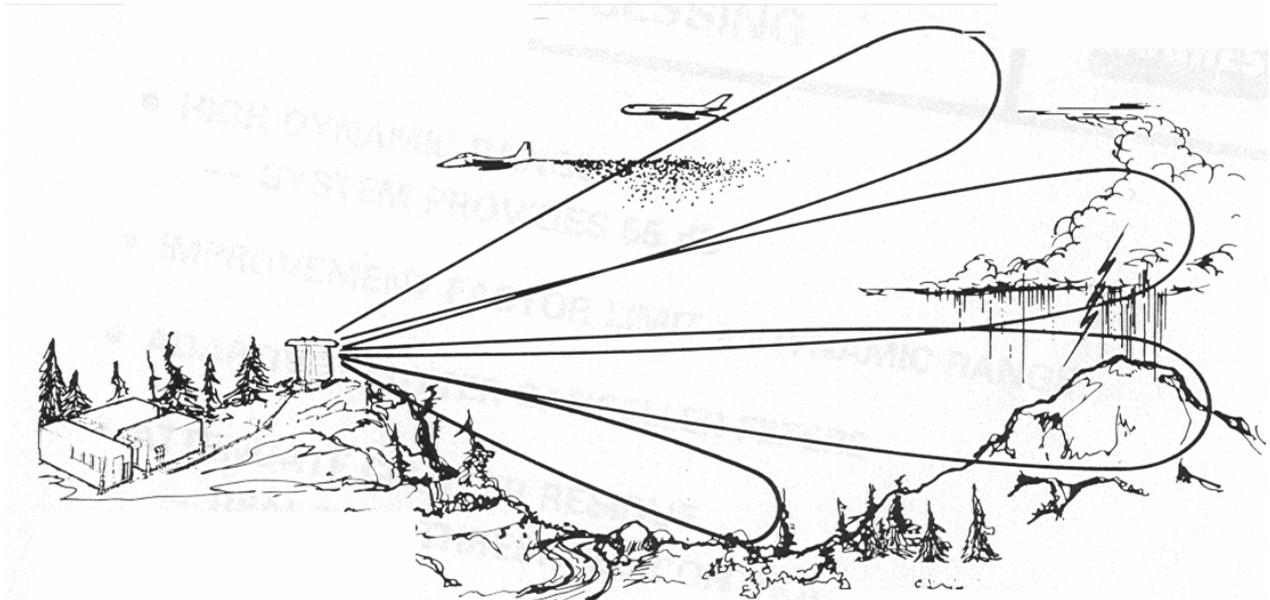


## Zur Geschichte der militärischen Radaranwendungen in der Schweiz Evaluation der Tiefflieger Radarsysteme Hans H. Jucker, Zielackerstrasse 7, 8603 Schwerzenbach

Im Frühling 1977 wurden die zukünftig möglichen Standorte für die Tiefflieger Radarsysteme evaluiert und erkundet. Es ergab sich daraus die Erkenntnis, dass abgesehen von der Clutter - Verarbeitung der Parameter „Tiltwinkel“ der Radarantennen beachtet werden musste. Auf Grund der topographischen Lage dieser Standorte stellte man bereits zu diesem Zeitpunkt die Forderung, dass der „Tiltwinkel“ der Radarantenne von  $0^\circ$  bis  $-1.5^\circ$  einstellbar sein musste. Weil die erkundeten Standorte erhöht über dem Mittelland lagen, musste damit gerechnet werden, dass von den Radar überall grosse Flächen Boden beleuchtet würden.

Die bei einer erhöhten Aufstellung eines Tiefflieger Radars auftretende Problematik mit dem negativen „Tiltwinkel“ und den dafür erforderlichen „**down looking beams**“, den beleuchteten Standzeichenflächen, Radarschatten, Wettereinflüssen und „Chaff“ Störungen gehen aus der nachstehender Figur hervor.



Das Gelände ist zudem auch im Mittelland sehr geschnitten; hinter jedem Hügel und über den Tälern sind Radarschatten vorhanden. Es stellten sich daher primär einmal die folgenden Fragen:

- Wie gross werden die beleuchteten Clutter - Flächen sein ?**
- Wie weit kann man mit dem Radar sehen ?**
- Ab welchen Flughöhen können Flugzeuge überhaupt erfasst werden ?**

In der Folge wurden für alle erkundeten taktischen Standorte sowie für die vorgesehenen Versuchsstandorte Wangenerberg und Homberg von der ETH Zürich sog. **Rimini - Schattenkarten** berechnet und deren Resultate auf Filmen aufgezeichnet.

In einem weiteren Prozess wurden daraus anschauliche Karten erstellt, auf denen die Radarüberdeckungen für die unterschiedlichen Flughöhen farbig hervorgehoben erschienen.

### **Diese Rimini-Darstellungen brachten drei wesentliche Erkenntnisse:**

- Ziele die nur ein paar hundert Meter über Grund fliegen, können nicht weiter als bis ca. 100 km erfasst werden.
- Dort wo tief gesehen werden kann (tiefer als 300 m über Grund), werden Standzeichen sichtbar. Mehr als die Hälfte der auf 300 m über Grund liegenden Fläche ist mit Standzeichen überdeckt. Die Standzeichenunterdrückung ist für die gesamte instrumentierte Reichweite von 100 km, für den gesamten Azimutbereich und für die unteren Elevationswinkel notwendig. Das Mass der Unterdrückung (wie viel dB Improvement Factor, Subcluttervisibility oder dergleichen) kann nicht aus den Rimini - Auswertungen entnommen werden, da sich die Reflektionsfläche der Standzeichen daraus nicht ableiten lässt.
- In den tieferen Flugbereichen von 100 und 300 m über Grund, ist die überdeckte Fläche ziemlich von Standzeichen durchlöchert. Wenn man die Ueberdeckung benachbarter Standorte übereinander legt, werden die überdeckten Gebiete jedoch zusammenhängend. Es müssen daher bei den Tiefflieger Radarsystemen günstige Voraussetzungen für die Zusammenarbeit benachbarter Systeme geschaffen werden.

Als Ergänzung zu der Rimini - Beurteilung wurden die Standzeichen von drei der taktischen Standorte sowie den Versuchsstandorten Wangenerberg und Homberg zusätzlich mit einem mobilen Radar vermessen.

Obwohl man sich dabei bewusst war, dass diese Methode ihre Grenzen hat, nämlich dort, wo die mit dem Vermessungsradar erzielten Resultate auf ein anderes System zu extrapolieren sind, lieferten diese Clutter (Standzeichen) Vermessung sehr aufschlussreiche Resultate:

- Die Clutter Messungen bestätigten weitgehend die Erkenntnisse der Rimini-Auswertungen.
- Auf sämtlichen Standorten muss mit Standzeichen gerechnet werden, deren Intensitäten bis  $10^5 \text{ m}^2$  Streuquerschnitt aufweisen. Wenn man allerdings deren Verteilung berücksichtigte, lagen auf den taktischen Standorten 90% der Standzeichen - Intensitäten unter  $10^4 \text{ m}^2$ .
- Daraus ergab sich die Forderung, dass die Tiefflieger Radars Standzeichen von mindestens 40 dB über  $1 \text{ m}^2$  unterdrücken mussten.
- Weiter musste daraus die Forderung abgeleitet werden, dass in einer solchen Standzeichenumgebung ein Ziel von  $0.5 \text{ m}^2$  auf 70km in  $\geq 80\%$  der Fälle erfasst werden sollte.
- Der Vergleich der taktischen Standorte mit den Versuchsstandorten Wangenerberg und Homberg ergab, dass die letzteren absolut repräsentative Standzeichen aufwiesen, deren Intensitäten zum Teil sogar höher lagen. Dies ergab die Möglichkeit, dass die geplanten Erprobungen der Tiefflieger Radars den konkurrierender Firmen auf den Versuchsstandorten durchgeführt werden konnten.

Neben den zu erwartenden Clutter - Intensitäten waren die realistischen Reflexionsquerschnitte der Flugziele für die Beurteilung der Radarerfassung von ausschlaggebender Bedeutung.

Aus den seinerzeitigen **Vermessungen von Florida Testflügen mit dem High Speed Buffer**, die im Rahmen der **Arbeitsgruppe Florida** durchgeführt wurden, lagen für die Flugzeugtypen Hunter und Mirage IIIS relativ viele Resultate vor, aus denen der Zielquerschnitt berechnet werden konnte.

Man ging dabei von der Annahme aus, dass die mit dem im C - Band arbeitenden Florida Radar aufgenommenen Zielsignalstärken auch für das im S - Band arbeitende Tiefflieger Radar aussagefähig sein würden.

Für das auf eine Radarentfernung von 120 km normierte Hunter Mk 58 Flugzeug welches mit 4 Flügeluntertanks ausgerüstet war, ergaben sich bei den High Speed Buffer Aufnahmen für 30° Aspektwinkel Signalstärken (Medianwerte) von 29 – 31 dB.

Die Minima lagen bei Aspektwinkeln von 0° und 180° und verursachten Streuungen von ca. 15 dB. Unter Berücksichtigung der Florida Radarparameter lassen sich daraus folgende Streuquerschnitte errechnen:

$\sigma_{\text{Median}}$       0.53 m<sup>2</sup>    für 29dB  
                         0.83 m<sup>2</sup>    für 31dB



Für das auf eine Radarentfernung von 120 km normierte Mirage IIIBS Flugzeug ergaben sich bei den High Speed Buffer Aufnahmen um ca. 2dB niedrigere Werte als beim Hunter Mk58 für 30° Aspektwinkel Signalstärken (Medianwerte) von 27 – 29 dB. Die Minima lagen bei Aspektwinkeln von 0° und 180° und verursachten Streuungen von ca. 15dB. Unter Berücksichtigung der Florida Radarparameter lassen sich daraus folgende Streuquerschnitte errechnen:

$\sigma_{\text{Median}}$       0.33 m<sup>2</sup>    für 27 dB  
                         1.63 m<sup>2</sup>    für 29.5 dB



Für das Tiger F5E Flugzeug lagen damals noch keine Erfahrungswerte aus High Speed Buffer Aufnahmen vor. Es konnte jedoch angenommen werden, dass der Streuquerschnitt des F5 Jägers eher niedriger liegt als derjenige des Mirage III S.



Die unter praxisnahen Bedingungen gemessenen Streuquerschnitte von Flugzeugen liessen darauf schliessen, dass das berühmte in der Radarliteratur öfters zitierte  $1 \text{ m}^2$  Ziel für eine Systemsdefinition des Tiefflieger Radars ungeeignet sein würde und das man anstelle davon gegenüber dem Lieferanten vorzugsweise die Detektions - Wahrscheinlichkeit ( $P_d$ ) für einen bestimmten Flugzeugtyp definieren sollte.

Auf Grund des Einsatzkonzeptes der Raumschutz-Verbände musste davon ausgegangen werden, dass das Erfassungsvolumen des Tiefflieger Radars voll im Bereich von wetterwirksamen Zonen liegen würde.

Verursacht durch diese Einsatzbedingungen und die zu erwartenden Niederschlagsmengen und Windeinflüsse waren die Anforderungen an das Gesamtsystem relativ hoch.

**Die Ausbreitungsdämpfung (Signalabschwächung durch Absorption) ist für das im S - Band arbeitende Radarsystem bei den praktisch vorkommenden Niederschlags- und „Chaff“ - Mengen ohne Bedeutung.**

Hingegen werden die nachfolgenden Parameter des Radarsystems von den Wetter- und Windeinflüssen tangiert und mussten an die vorherrschenden Bedingungen wie folgt optimal angepasst werden:

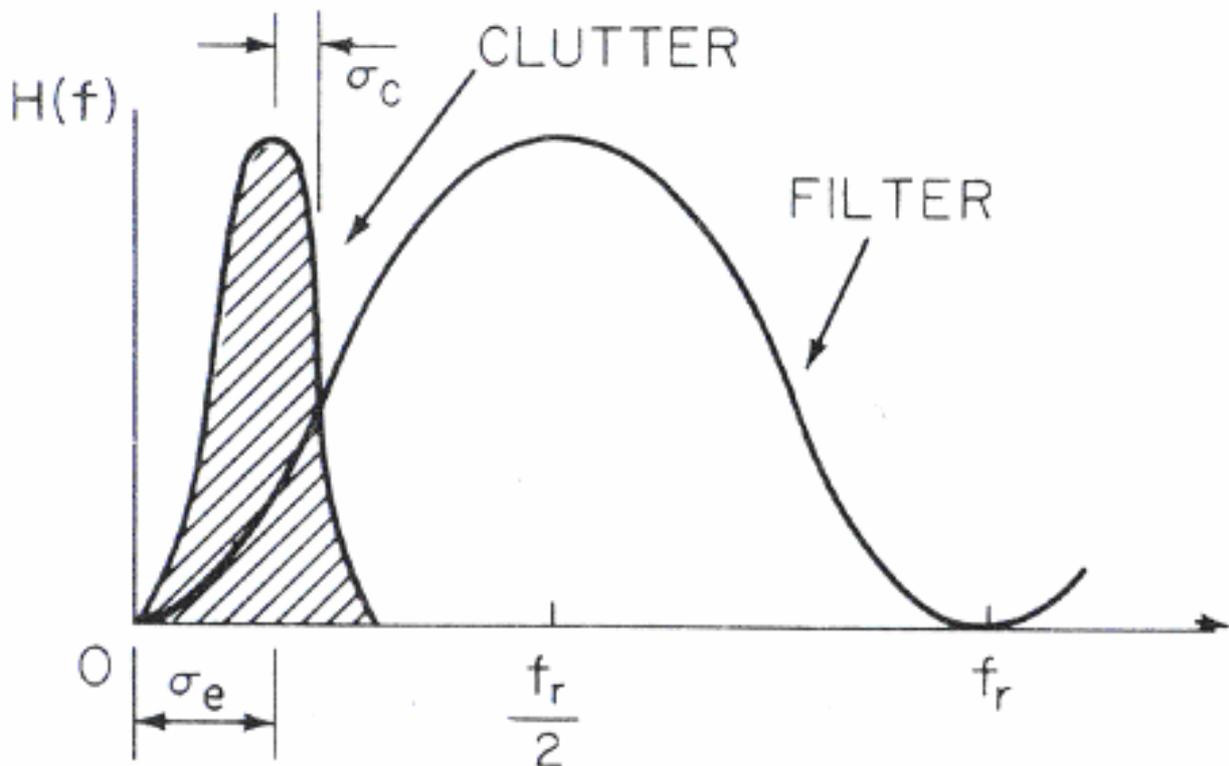
- **bestmögliche Antenneneigenschaften**
- **kleine Auflösungszelle (Impulsvolumen)**
- **Zirkularpolarisation**
- **Impulskompression**
- **grosser Dynamikbereich des Empfängers**
- **distanzabhängige Verstärkungsregelung des Empfängers**
- **konstante Falschalarmrate**
- **kompensierbare Dopplerkomponente**
- **variable Dopplergrenzen für die MIT-Kreise**

**Alle diese Eigenschaften sind in der Lage, die Wetterabhängigkeit von Radarsystemen zu verringern. Es war daher ein vordringliches Ziel bei der Systemsevaluation anzustreben, dass eine umfassende Anzahl dieser Möglichkeiten im ausgewählten System vorhanden war.**

**Auf Grund der vorliegenden Erfahrungen mit dem Florida System konnte abgeschätzt werden, dass „Chaff“ - Zonen bei den zu erwartenden Windgeschwindigkeiten eine weitaus grössere Beeinträchtigung darstellten als Niederschlagszonen. Diese wirken sich in der Regel auch weniger stark aus, da bei extremen Wind- und Niederschlagsbedingungen in der Regel die Flugtätigkeit ohnehin erheblich eingeschränkt werden muss.**

**Starker Wind ergibt zusammen mit Regen und „Chaff“ eine Verbreiterung und/oder Verschiebung des Dopplerspektrums in einen für die Standzeichen - Unterdrückung unwirksamen Bereich. Siehe das Clutter Spektrum in der Figur auf der nächsten Seite welches sich infolge von Windeinfluss aus dem Stop - Band des MTI - Filters bereits teilweise in dessen Pass - Band verschoben hat <sup>2)</sup>.**

Dieser dynamische Clutter kann in der Folge nur noch schwer unterdrückt werden und bewirkt ein übermässiges Ansteigen der Falschalarme im System.



Gemäss einer Studie von Dr. Jürg Joss von der SMA Locarno musste damals angenommen werden, dass Regen- und „Chaff“ - Zonen im Einsatzgebiet der Tiefflieger Radars in vielen Fällen (Säntis und Chasseron) in ca. 30% der Zeit eine Windkomponente von mehr als 30 km/h aufweisen.

Die Niederschlagsdichten variieren stark in Abhängigkeit von Ort und Zeit. Die SMA ging davon aus, dass im Mittelland an ca. 130 Tagen pro Jahr mit folgenden mittleren Daten gerechnet werden muss:

Dichte	1mm/h	4mm/h	16mm/h
Dauer	50 Min	23 Min	4 Min
Reflexionsquerschnitt	$5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{m}^3$	$4.6 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{m}^3$	$4.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{m}^3$

(für das S- Band)

Im Gegensatz zu den seinerzeitigen Vorgaben beim Florida System wo man von der Annahme ausgegangen war, dass die zu erwartenden „Chaff“ - Dichten nicht über  $10^{-9} \text{ m}^2 \text{ pro m}^3$  liegen würden, ging man beim Tiefflieger Radar davon aus, dass inzwischen „Chaff“ - Dichten von  $10^{-8} - 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ pro m}^3$  als absolut realistisch zu betrachten wären.

Die Arbeitsgruppe RAS kam bezüglich den Wettereinflüssen auf das Tiefflieger Radar zum Schluss, dass die Clutter - Verarbeitung in der Lage sein muss, das gesamte durch windgetriebenen „Chaff“ oder Regen verursachte Clutter-spektrum, zu unterdrücken.

Bezüglich der Bedrohung durch aktive elektronische Störungen war man Mitte der sechziger Jahre beim Florida System noch davon ausgegangen, dass die von bordgestützten Störsendern zu erwartende effektiv abgestrahlte spektrale Leistungsdichte (**ERP) 10 Watt/MHz** nicht übersteigen würde.

Auf Grund der inzwischen erfolgten technischen Weiterentwicklung<sup>3)</sup> (im wesentlichen bestimmt durch den Entwicklungsstand der Hochleistungsrohren) musste für die achtziger Jahre mit den nachfolgenden Dauerleistungen (und zwar ohne den Antennengewinn) gerechnet werden:

- **Breitbandige (50 – 400 MHz) sehr rasch gewobbelte Sender**

	<b>Senderausgangsleistung</b>	<b>Mutmassliche ERP als CW Störer</b>
<b>Jagdbomber</b>	ca. 2 kW	200 kW
<b>EKF Flugzeuge</b>	ca. 10 kW	1000 kW
<b>Bodenstörer im mobilen Einsatz</b>	ca. 10 kW	1000 kW

- **Breitbandige Rauschverstärker mit analogen Dauerleistungen wie oben**
- **Störer mit elektronisch durchstimmbaren CW - Leistungssendern mit raschem Frequenznachlauf**
- **Hinzu kommt der Gewinn der Störsender - Antenne der etwa in der Grössenordnung (Hornantennen) von 20 dB liegt. Dieser Antennengewinn bewirkt, dass sich die effektiv abgestrahlte Leistung (ERP) um den Faktor 100 erhöht.**
- **Bei breitbandigen Störemissionen reduziert sich die spektrale Leistungsdichte (Watt/MHz) um den Faktor der gewählten Bandbreite. Bei einem bordgestützten Störer eines Jagdbombers der mit seiner ERP ein Frequenzband von 200 MHz mit Störenergie belegt, müsste daher mit einer spektralen Leistungsdichte von 1 kW gerechnet werden.**

Die mit dem Florida Radar gemachten Erfahrungen hatten klar gezeigt, dass die Hauptstörbedrohung durch Emissionen verursacht wurden, die über die Nebenkeulen der Antennencharakteristik auf das Radar einwirkten.

Die Hauptkeulenstörer hatten wohl einen totalen Informationsverlust in Richtung des Störers zur Folge, doch wird deren Störsektor durch die geringe Ausdehnung der Hauptkeule begrenzt.

Im Hinblick auf die Evaluation des Tiefflieger Radars war es daher von grosser Bedeutung, dass Radarsysteme bevorzugt wurden, bei denen die über die Nebenkeulen eindringende Energie keine grosse Einschränkung für das übrige Ueberwachungsvolumen verursachen konnten.

Die Betrachtungen die von der Arbeitsgruppe RAS im Hinblick auf eine Bedrohung des künftigen Tiefflieger Radars durch aktive Störungen gemacht wurden führten zu nachfolgender Schlussfolgerung:

**Bei einer Störung ist der Gestörte immer im Nachteil, er arbeitet mit dem Echo als Nutzsignal, der Störer bedrängt ihn mit dem direkt eingestrahlten Störsignal. Der Gestörte muss somit immer mit Einschränkungen rechnen !**

Man hatte jedoch Mitte der siebziger Jahre bereits eine Reihe von technischen Mitteln zur Verfügung bei deren geschickter Kombination diese Einschränkungen relativ gering gehalten werden konnten:

Da der Nebenkeulenstörer zweifellos die grösste Bedrohung für ein Rundsuchradar darstellt sollten folgende Eigenschaften vorhanden sein:

- **Der Seitenkeulenabstand im Raum- Zeit- und Frequenzbereich soll möglichst gross sein (Antennen Side Lobes, Time Side Lobes, Spiegel Frequenzen im Frequenz Spektrum)**

Im weiteren sollte bei der Evaluation des Tiefflieger Radars beachtet werden ob das angebotene System den nachfolgenden Kriterien gerecht wird:

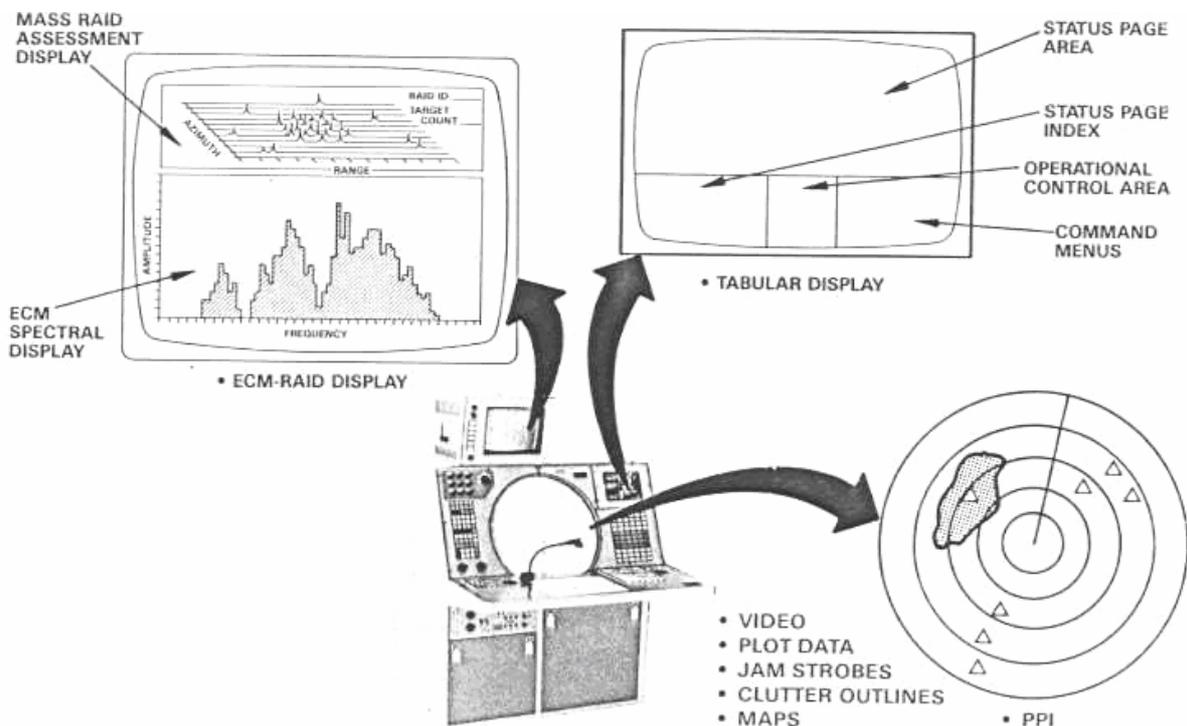
- **Die Impulsenergie soll möglichst gross sein, zur Erhöhung der Energie kann wegen der beschränkten Spitzenleistung des Senders der Impuls verlängert werden. Eine aufgebrachte Modulation erlaubt die Anwendung der Pulscompression, so dass die ursprüngliche Entfernungsauflösung wieder erreicht werden kann.**
- **Um die wirksame Störenergie klein zu halten, muss die summierte spektrale Leistung möglichst klein sein d.h. möglichst kleine Bandbreite und hohe Dynamik. Wichtig ist, dass jene Stufen, die mit grosser Bandbreite arbeiten (Vorverstärker, Mixer) nur soviel Bandbreite aufwenden wie sie zur Erfüllung ihrer Aufgabe benötigen. Sie sollten so ausgelegt sein, um den Sättigungserscheinungen zu trotzen.**
- **Frequenz - Behendigkeit (Agility) über eine grosse Bandbreite verringert die Störwahrscheinlichkeit mit raschen frequenznachlaufenden CW - Störsendern. Frequenzwechsel möglichst von Puls zu Puls über die technisch mögliche Bandbreite von mindestens 10% der Sendefrequenz. Zielsetzung ist die Reduktion der spektralen Störleistung, indem der Gegner zu einer Vergrösserung der Störbandbreite gezwungen wird.**

Auf Grund der mit dem Florida System bei EKF - Einsätzen gemachten Erfahrungen wurde durch die RAS Arbeitsgruppe der nachfolgende Katalog von Anforderungen an die ESM - Kreise zusammengestellt die bei der Evaluation speziell zu überprüfen waren:

- **ob ESM - Kreise, die eine Reduktion der Störung gewährleisten überhaupt vorhanden sind und ob die optimale Empfindlichkeit ausserhalb des gegebenen Störbereiches erhalten bleibt ?**
- **ob die ESM - Kreise ohne Empfangsverlust dauernd eingeschaltet bleiben, damit das System automatisch mit einer minimalen Reaktionszeit auf die einfallende Störung reagieren kann ?**
- **ob eine Ueberwachung des gesamten, zur Verfügung stehenden Frequenzbereiches gewährleistet ist und ob die optimale Arbeitsfrequenz im gestörten Klima auf Grund der elektronischen Aufklärung automatisch gewählt wird ?**

- ob eine PRF - Variation ohne eine betriebliche Reduktion möglich ist ?
- ob Massnahmen zur passiven Lokalisierung bezüglich Azimut und Elevation vorhanden sind ?

Bereits die Erfahrungen beim Florida System hatten gezeigt, dass ohne ein geeigneter ESM Arbeitsplatz eine effiziente Analyse und Bekämpfung von aktiven und passiven Störungen nicht möglich ist. Für das neue Tiefflieger Radar sah man daher eine Lösung in der Art der nachstehenden Figur vor:

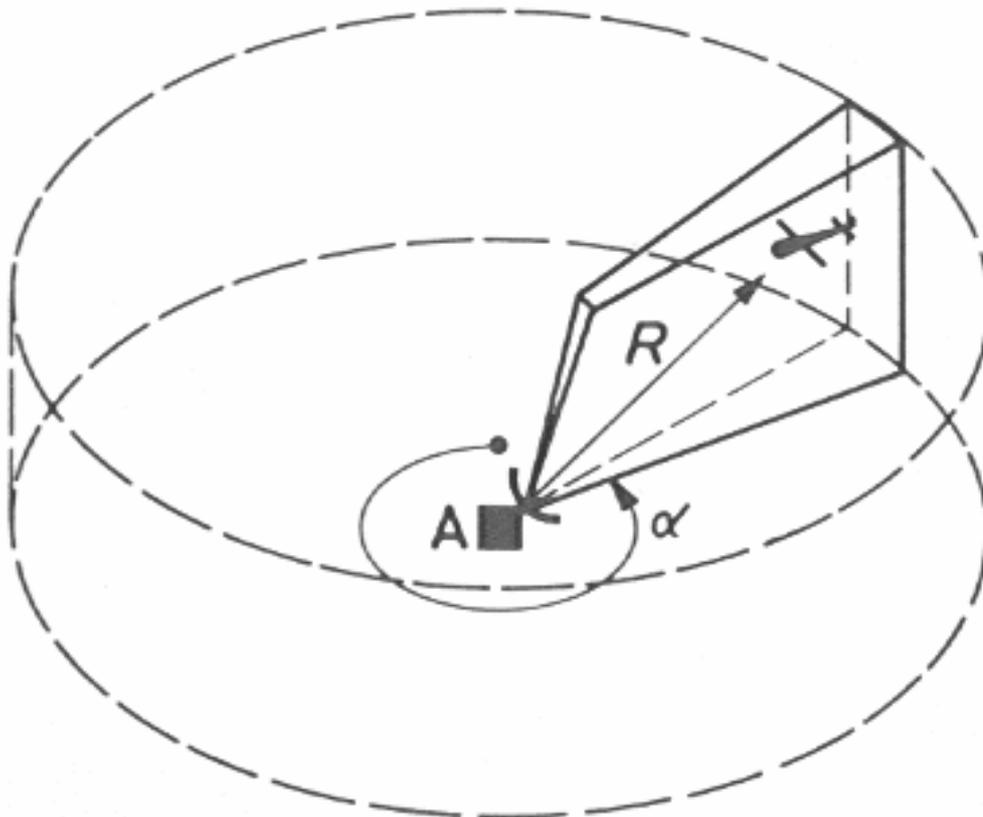


- Der ESM - Arbeitsplatz soll über die erforderlichen Anzeigen verfügen, um
  - eine rasche Erkennung, Lokalisierung und Analyse der Störungen zu gewährleisten ?
  - die ESM - Massnahmen, sofern nicht automatisch gewählt, einleiten zu können ?
  - die Automatik der ESM - Kreise zu überwachen, um gegebenenfalls manuell eingreifen zu können ?
  - die durch die Störung verursachten Einschränkungen dreidimensional darzustellen ?
  - die Erkennung und Bearbeitung von Interferenzen von Nachbarradar zu ermöglichen ?

Bei der Definition der Parameter von Radarsystemen entstehen öfters Unklarheiten welche letztlich zu Missverständnissen führen und in der Folge verheerende Auswirkungen auf die Systemsleistung zur Folge haben können. Im Zusammenhang mit der Erstellung des militärischen Pflichtenheftes für das Tiefflieger Radarsystem wurde daher von der Arbeitsgruppe RAS unter Mithilfe des Entwicklungsleiters der damaligen Siemens - Albis Radarabteilung **Major Frank Farner** versucht, eine möglichst einheitliche Begriffsbestimmung für einige Schlüssel - Radarparameter zu schaffen <sup>8)</sup>. Zum besseren Verständnis der verwendeten Fachausdrücke sind sie nachfolgend wiedergegeben:

### Beambreite

Die Antenne des mobilen Tiefflieger Radars ist in ihrer Abmessung begrenzt. Durch die max. Ausdehnung der Antenne und die gewählte Wellenlänge  $\lambda$  wird die zu erreichende Beambreite  $\Theta_{B(\text{rad})}$  (gemäss  $\Theta_{B(\text{rad})} \sim \lambda / d$ ) bestimmt. Bei einer Antennenbreite von 4 m und einer Wellenlänge von 10 cm resultiert daraus eine Beambreite von ca. 1.5 - 2 Grad.



### Pulsrepetitionsfrequenz (PRF)

Durch die Festlegung des Ueberwachungsvolumens in der Distanz, ist die grösstmögliche PRF gegeben, sofern man im Eindeutigkeitsbereich betreffend der Distanz bleiben will. Bei einer Reichweite von 100 km kann die PRF nicht höher als 1500 Hz sein. Die PRF hat weitere Auswirkungen auf den Eindeutigkeitsbereich der Dopplerauswertung und die mittlere Sendeleistung.

## Umdrehungszeit

Ist die Beambreite im Azimut und die PRF festgelegt, so ist die Umdrehungszeit noch von der Art der Elevationsabtastung und der **Anzahl Hit pro Beambreite** abhängig. Diese werden durch die Anforderungen an die Detektion und die Standzeichenunterdrückung des Radars bestimmt.

## Reichweite

Die instrumentierte oder Eindeutigkeits - Reichweite die durch die Beziehung:

$$R_{\max} = \frac{c}{2 \times \text{PRF}}$$

gegeben ist, sagt noch nichts aus über die Detektionsreichweite, welche proportional zu der  $\sqrt[4]{}$  aus dem Verhältnis Sendeleistung zu Radarempfindlichkeit und der Zielgröße (Reflexionsquerschnitt) ist.

Im weiteren gehen die Antennencharakteristik, die Wellenlänge und die Verluste in die nachstehend aufgeführte Radargleichung ein:

$$R^4 = \frac{P_t G^2 L^2 \sigma}{(4\pi)^3 \text{MDS} L_{\text{total}}} \quad R = \sqrt[4]{R^4}$$

R Detektionsentfernung

P<sub>t</sub> Sendeleistung

G Antennengewinn

L Wellenlänge

σ

Zielquerschnitt

(4π)<sup>3</sup> Kugeloberfläche (zweifach für Sendung und Empfang)

MDS Minimum Discernible Signal (kTs Bn)

kTs eff. Empfänger Rauschtemperatur

Bn Systemsbandbreite

L<sub>total</sub> Verluste (Sende/Empfangssystem, Antenne + Ausbreitung)

Erlaubt die Detektionswahrscheinlichkeit Ziele zu entdecken, die weiter entfernt sind als die Eindeutigkeits - Reichweite, so werden diese auf der effektiven Distanz minus die Eindeutigkeits - Reichweite angezeigt. Diese Gegebenheit führt zum bekannten Problem der „**second time around targets**“ und des „**second time around clutter**“.

Beim Projekt Tiefflieger Radar wird die Detektion eines **Tiger F5E Flugzeuges** auf **100 km** mit einer **Wahrscheinlichkeit von 80%** verlangt. Arbeitet das Radar mit einer PRF von 1200 Hz, so werden Ziele über 125 km, soweit sie ein genügendes Echo ergeben und nicht als Clutter ausgeschieden werden, als „**second time around targets**“ dargestellt.

- Ein 20 m<sup>2</sup> Ziel auf einer Distanz von 210 km würde mit einer Wahrscheinlichkeit von 80% auf einer Distanz von 85 km angezeigt, sofern das Ziel über dem Radarhorizont liegt. Im schweizerischen Gelände und den vorgesehenen Radarstandorten ist allerdings aus Distanzen über 150 km kaum Bodenclutter zu erwarten.

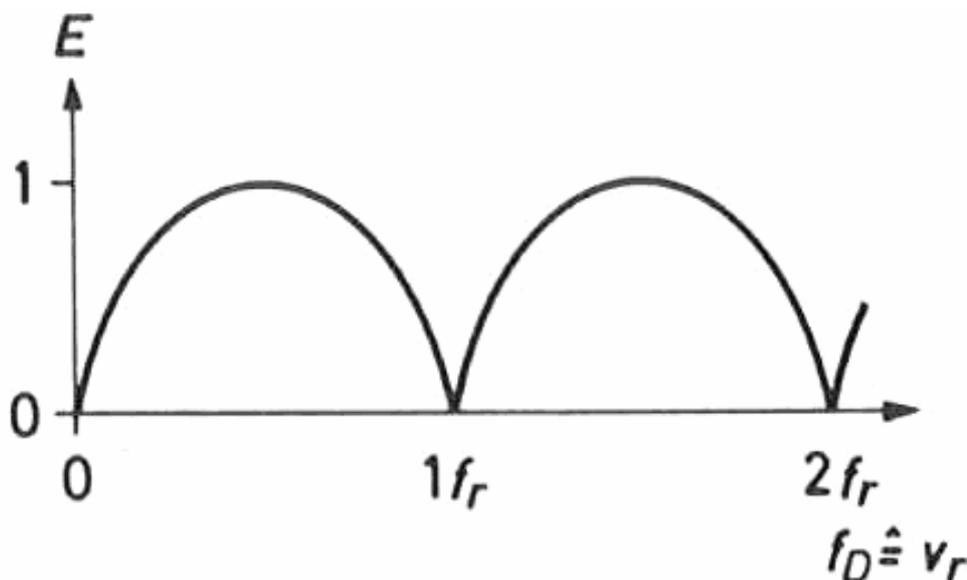
## Geschwindigkeitsbereich

### Trennung bewegter Ziele von Standzeichen

Will man mit einem Pulsradar bewegte Ziele von Standzeichen trennen, so wird ein Vergleich der Radarechos aufeinanderfolgender Impulse gemacht (Moving Target Indikation oder MTI). Im einfachsten Fall entspricht dies einer Subtraktion der Echos zweier aufeinanderfolgender Pulsrepetitions-Intervalle. Durch die Bewegung des Zieles tritt eine Positionsänderung zwischen zwei Pulsen ein. Betrachtet man ein Flugzeug, das mit einer Radialgeschwindigkeit von 900km/h (250m/s) gegen ein mit 1000 Hz PRF arbeitendes Radar fliegt, so bewirkt dies einen Laufzeitunterschied der Pulse von 1.6 Nanosekunden. Dieser sehr kleine Zeitunterschied kann technisch nicht direkt für die Trennung von bewegten und stehenden Zielen ausgewertet werden. Auswertbar ist hingegen die durch den Dopplereffekt verursachte Phasenverschiebung zweier aufeinanderfolgender Echos bewegter Ziele. Die **Dopplerfrequenz ( $f_d$ )** ist eine Funktion der **Radialgeschwindigkeit ( $v_r$ )** des Zieles und der **Wellenlänge ( $\lambda$ )**.

$$f_d = \frac{2 v_r}{\lambda}$$

Die daraus resultierende **Phasenverschiebung ( $\Delta\phi$ )** zwischen zwei Echos ist noch vom zeitlichen Abstand  $T_p = 1/\text{PRF}$  zweier Sendepulse abhängig. In nachstehender Figur ist die Geschwindigkeits - Charakteristik eines MTI ersichtlich. **E** ist das Mass für die Empfindlichkeit in Abhängigkeit der Dopplerfrequenz.



Die daraus resultierende Phasenverschiebung ( $\Delta_\phi$ ) zwischen zwei Echos ist noch vom zeitlichen Abstand  $T_p = 1/PRF$ ) zweier Sendepulse abhängig. In der vorher dargestellten Figur ist die Geschwindigkeits-Charakteristik eines MTI ersichtlich. E ist das Mass für die Empfindlichkeit in Abhängigkeit der Dopplerfrequenz.

$$\Delta_\phi = \frac{4\pi}{\lambda} v_r T_p$$

Ein stehendes Ziel ( $v_r = 0$ ) verursacht keine Phasendrehung und kann somit von einem bewegten unterschieden werden !

Wird der Phasenunterschied gleich  $2\pi$  oder ein mehrfaches davon, so kann man diese bewegten Ziele nicht mehr von stehenden unterscheiden, dh die Echos solcher Ziele werden durch die MIT - Filterung ebenfalls wie Standzeichen unterdrückt.

Die Radialgeschwindigkeiten, bei denen dieser Effekt auftritt, nennt man Blindgeschwindigkeiten ( $v_b$ ). Je nach Wahl der Sendefrequenz und der PRF können mehrere Blindgeschwindigkeiten im gewünschten Geschwindigkeitsbereich auftreten.

$$v_b = n \frac{PRF \lambda}{2} \quad n = \pm 1, 2, 3, \dots$$

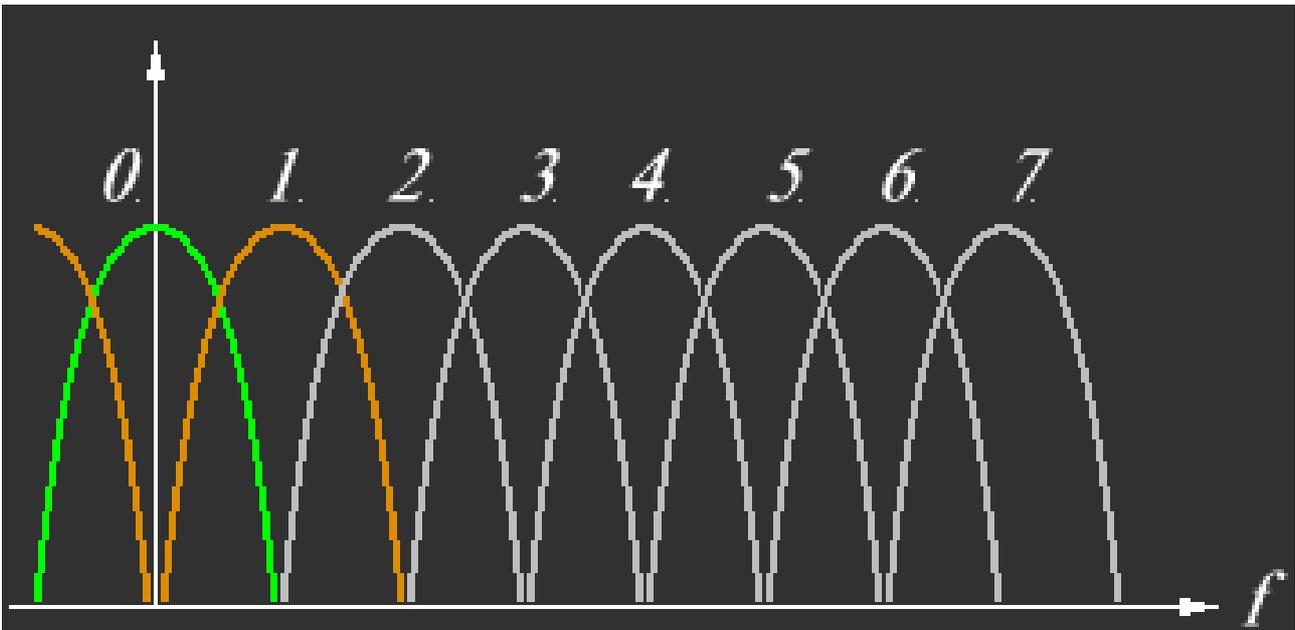
Bei einem Radar mit einer PRF von 1000 Hz und einer Wellenlänge von 10 cm ergeben sich im Geschwindigkeitsbereich von 1400 km/h 7 Blindgeschwindigkeiten. Die erste tritt bei 180 km/h auf.

Die Detektionsverluste durch Blindgeschwindigkeiten können verringert werden, indem man pro Beambreite mehrere Pulse mit unterschiedlichen Pulsabständen (staggered PRF) auf ein Ziel aussendet. Die Blindgeschwindigkeiten werden dadurch von Puls zu Puls verschoben und es entsteht über die Staggering-Sequenz eine, Geschwindigkeits - Durchlasskurve ohne Blindgeschwindigkeiten.

## Pulsdoppler

Mit einem Pulsdoppler Radar kann nicht nur zwischen bewegten und stehenden Zielen unterschieden werden, sondern es kann auch eine Aufteilung der Ziele in bestimmte Radialgeschwindigkeitsbereiche gemacht werden.

In nachstehender Figur sind die einzelnen Dopplerfilter ersichtlich. Rechts der vertikalen Linie des Sendespektrums liegt der Filterbereich für die positive, links derjenige für die negative Dopplerverschiebung.



Pulsdoppler kann auch nur dazu dienen, die Trennung zwischen Standzeichen und bewegten Zielen zu verbessern. Der Filter 0 kann z.B. so dimensioniert werden, dass Standzeichen und **systemsinterne durch Unstabilitäten** hervorgerufene Spektrumsverbreitungen, darin zu liegen kommen. Durch das Ausschalten von Filter 0 und seines Komplementär - Filters können die Standzeichen dann unterdrückt werden.

Je mehr Pulse pro Beambreite ausgesendet werden und damit das Ziel beleuchten, je besser kann eine Dopplerfilterung gemacht werden. Zu beachten ist, dass die Geschwindigkeitsinformation nur bis zur ersten Blindgeschwindigkeit eindeutig ist.

Kombiniert man die Gleichungen betreffend Reichweite und Blindgeschwindigkeiten, so ergeben sich Forderungen betreffend der max. Geschwindigkeit, max. Reichweite, Sendefrequenz und PRF, um im eindeutigen Geschwindigkeits und eindeutigen Distanzbereich zu bleiben:

$$\frac{2 V_{\max}}{c} \leq \text{PRF} \leq \frac{c}{2 R_{\max}}$$

Beim Projekt Tiefflieger Radar wo eine Reichweite von 100 km, ein Geschwindigkeitsbereich bis 1400 km/h und eine Sendefrequenz von 3 GHz gefordert wurde konnte diese Ungleichung nicht erfüllt werden. Das Radar musste daher bei Annahme eines eindeutigen Distanzbereiches, mit „staggered PRF“ arbeiten. Für eine grosse Stoppbandbreite und wenig Mehrdeutigkeiten (Faltungen) im Geschwindigkeitsbereich zu erhalten, muss die PRF hoch liegen.

Eine grosse Stoppbandbreite ermöglicht es auch, Clutter mit einem breiten Spektrum (Bodenclutter von bewegten Bäumen, fahrenden Autos etc.) oder mit einer Geschwindigkeitskomponente (windgetriebener „Chaff“, Regen) zu unterdrücken.

Mehrdeutigkeiten im Geschwindigkeitsbereich können die Wirkung eines Pulsdoppler Systems einschränken. Trotz Anwendung von „staggered PRF“ können Detektionsverluste bei den grundsätzlichen Blindgeschwindigkeiten auftreten.

### **Hits pro Beambreite (Dwell Time on Target)**

Ein einfaches MTI braucht mindestens zwei Treffer auf ein Ziel. **Eine Pulsdoppler Filterung oder FFT (Fast Fourier Transformation) Filterung benötigt meistens mehr als acht Treffer.** Je mehr Treffer für die Pulsdoppler Filterung gebraucht werden, je besser ist die Unterscheidungsmöglichkeit der Ziele betreffend ihre Radialgeschwindigkeiten, wobei Geschwindigkeiten, die grösser als die erste Blindgeschwindigkeit sind, in den Eindeutigkeitsbereich hinuntergefaltet werden. Mit mehr Treffern pro Ziel resultiert zusätzlich ein Integrationsgewinn, Fluktuationen von Puls zu Puls machen sich ebenfalls weniger bemerkbar.

### **Forderungen im Hinblick auf eine gute Standzeichenunterdrückung**

Für die Unterdrückung von starkem Bodenclutter mit einer gewissen Spekturbreite kann, bezogen auf die Anforderungen des Tiefflieger Radars, ein einfacher 2 Puls Cancellor mit nur In - Phase Verarbeitung kaum genügen. Bessere Resultate geben MTI - Systeme, die mehrere Pulse verarbeiten und die auch in Quadrature - Phase arbeiten. Noch bessere Resultate können mit Puls Doppler (PD) oder FFT oder mit einer Kombination von MTI und PD erreicht werden. Bei der PD Filterung besteht die Möglichkeit, die Ausgänge der unteren Filter, die im Bereich des Clutterspektrums liegen, abzuschalten oder abzuschwächen.

Über die Seitenkeulen der Antenne wird Energie aufgefangen, welche die Detektionsfähigkeit verschlechtert. Wie vom Florida System her bekannt war, kann sich Bodenclutter über die Seitenkeulen sehr stark bemerkbar machen. Es sind daher neben den Vorteilen die ein grosser Hauptkeulen zu Nebenkeulen-Abstand für die ESM Festigkeit bringt, auch im Hinblick auf die Standzeichenunterdrückung, Antennen mit möglichst tief liegenden Seitenkeulen zu fordern.

Eine zentrale Voraussetzung für eine gute Subcluttervisibilität der Standzeichenlöschung ist eine hohe Phasenstabilität im gesamten kohärenten Send-/Empfangs- und Timing-System. Für Subcluttervisibilitäten in der Größenordnung von  $> 40$  db wie sie für das Tiefflieger Radar gefordert werden, sind Radarstabilitäten von  $\geq 50$  dB erforderlich. Ein Schwachpunkt stellt dabei die Stabilität der mit Laufzeitröhren bestückten Senderendstufen dar.

Eine Steuerung (Ein- oder Ausschalten) der MTI oder Pulsdopplerverarbeitung durch adaptive Video - Map's mit kleinen Zellen, können die Gesamtleistung eines Radars wesentlich verbessern. Denn MTI, PD oder FFT sind Filterprozesse, die in Gebieten, in denen kein Clutter vorhanden, ist die Detektion verschlechtern. Ebenfalls werden tangentiale Flüge unterdrückt, da sie keine Dopplerverschiebung verursachen.

**Betrachtet man diese Forderungen so sieht man, dass ein Radar erforderlich ist, das nachfolgende Eigenschaften hat:**

- Bei gegebener Sendefrequenz eine möglichst grosse Antenne zur Erzielung kleiner Beambreiten.
- Eine kleine komprimierte Sendeimpulslänge, d.h. eine gute Distanzauflösung und eine beschränkte Reichweite wegen der hohen PRF.
- Für eine grosse Anzahl Hits pro Beambreite ergibt sich für ein solches Radar eine kleine Antennendrehgeschwindigkeit – diese Forderung kann jedoch wegen der geforderten kurzen Reaktionszeit nicht erfüllt werden.

**Ein System das alle Forderungen erfüllt die an das Tiefflieger Radar gestellt werden, ist somit nicht realisierbar – es müssen daher gewisse Kompromisse, ev. durch Verzicht auf eine optimale Standzeichen-Unterdrückung eingegangen werden !**

**Mit verschiedenen Massnahmen wie Anwendung von Pulscodierung (für Pulskompression und eventuell Dopplerfilterung), „staggered PRF“, kann unter Inkaufnahme von Nebenwirkungen die Situation verbessert werden.**

**Die Clutterunterdrückung wird desto wirksamer, je besser die obigen Forderungen erfüllt werden. Die Güte der Clutterunterdrückung hängt nicht allein von der Wahl der Pulsform und der Komplexität der Clutterunterdrückungskreise ab. Für eine Gesamtbeurteilung müssen weitere Faktoren wie Stabilität von Sender und Empfänger sowie STC - Wirkung, Dynamik - Bereich, Art des Empfängers z.B. Matched Filter, CFAR Charakteristik, Implementierung der Clutterunterdrückungskreise, etc berücksichtigt werden.**

**Obschon gewisse Werte wie MTI - Improvement Faktoren von den Systemherstellern angegeben werden, kann nur beschränkt eine quantitative Aussage über die Wirkung dieser Systeme in unserem Gelände gemacht werden !**

**Eine genaue quantitative Analyse ist schwierig und kann nur mit der Kenntnis aller Detailspezifikationen von Sendern und Empfängern von einem Spezialisten gemacht werden !**

**Endgültige Klarheit werden erst die Tests an den verschiedenen Standorten bringen !**

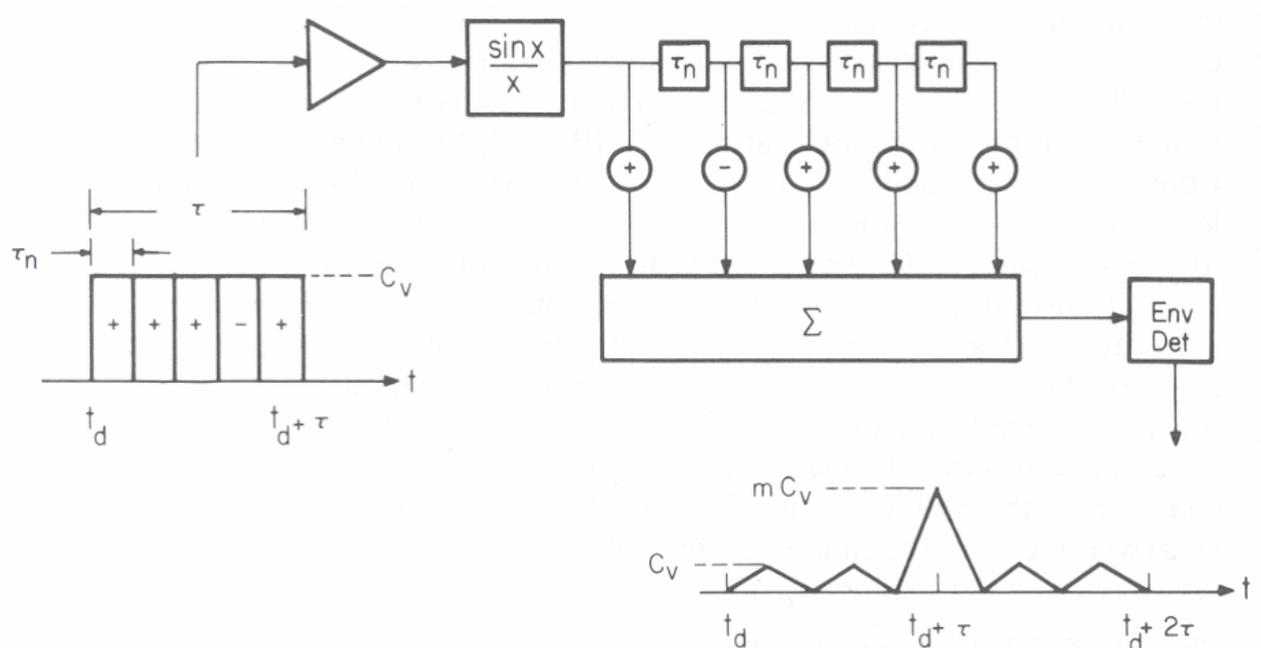
## **Pulskompression**

Um bei beschränkter Spitzenleistung des Senders eine bessere Detektierbarkeit zu erhalten muss der Puls verlängert werden, so dass eine höhere Energie auf das Ziel gestrahlt wird. Um trotzdem eine gute Distanzauflösung von Zielen zu erhalten, wird Pulskompression verwendet.

Für die Pulskompression muss der Puls moduliert werden. Dabei kommt entweder Frequenzmodulation oder Phasencodierung zur Anwendung.

Neben der erwünschten Leistungserhöhung des Nutzsignals auf der Empfangsseite, entstehen durch die Pulskompression unerwünschte, sogenannte **Time Side Lobes**, die beim Detektionsprozess unterdrückt werden müssen.

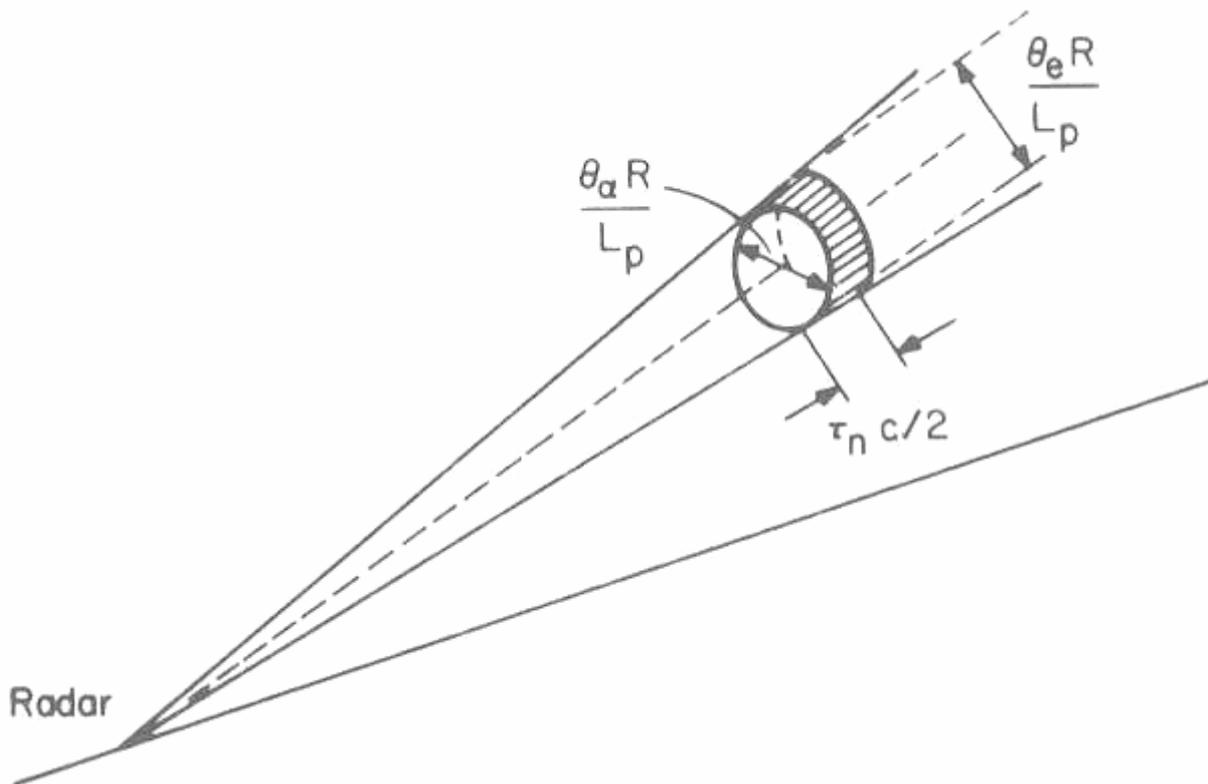
In der nachstehenden Figur ist ein einfaches Pulskompressionssystem mit einer **5 - Chip Phasencodierung** ersichtlich. Der Komprimierungsprozess erfolgt in einem auf die **Chiplänge**  $l_n$  angepassten  $\frac{\sin x}{x}$  **Filter**, gefolgt von einer angezapften Delay Line zur Speicherung, die **4 Verzögerungen**  $l_n$  aufweist. Nach der Summierung erscheint das komprimierte Signal mit der Amplitude  $mC_v$  begleitet von den Time Side Lobes mit den Amplituden  $C_v$  welche alle eine zeitliche Dauer  $l_n$  aufweisen.



## Auflösungszelle

Eine möglichst kleine **Auflösungszelle** (kleine Beambreite  $\theta^R/L_p$  und eine kleine Pulslänge  $l_n c/2$  ev. komprimierter Puls) maximiert das Verhältnis zwischen **Signalenergie** und **Clutterenergie**. Weil sich das Ziel nicht unbedingt im **Beamzentrum** befindet wird bei Reichweiten-Berechnungen öfters mit einem **Beam Shape Loss**  $L_p$  von 2.5 dB gerechnet.

Bei zwei Radars mit verschiedenen **Auflösungszellen** benötigt jenes mit der grösseren Zelle auch eine höhere **Subcluttervisibilität** für die Detektion eines bestimmten Zieles.



## Leistungsfähigkeit der angebotenen Systeme

Die GRD hatte nach einer vorgängig erfolgten Marktforschung in Hinblick auf die geplante Beschaffung von Tiefflieger Radarsystemen für den Raumschutz, in den Jahren 1976 und 1977 Abklärungen bei verschiedenen Firmen durchgeführt. Nachdem anfänglich Verhandlungen mit **den Firmen Westinghouse, ITT Gillfilian, Hughes, Selenia und Telefunken** erfolgten, lagen gegen Ende 1977 nur noch konkrete Angebote **von den Firmen Westinghouse, Selenia und Hughes** vor. Diese Firmen hatten sich bereit erklärt mit ihren Systemen Felderprobungen in der Schweiz durchzuführen.

Im Frühling 1978 wurden die Vorabklärungen und Studien der im Auftrage des Kommandanten der Flieger- und Fliegerabwehrtruppen ins Leben gerufenen Arbeitsgruppe RAS abgeschlossen und in einem Schlussbericht zusammengefasst.

Im Hinblick auf den für September 1978 geplanten Beginn der Felderprobungen der in Evaluation befindlichen Radarsysteme, enthielt der Bericht auch Zielsetzungen für die durchzuführenden Ueberprüfungen.

Bei der Erprobung ging es primär um die Ueberprüfung der Radarparameter und der Flugwegbildung wobei die Anforderungen neben dem militärischen Pflichtenheft durch die Funktionsspezifikationen bestimmt wurden. Diese waren aus einem **iterative Prozess** entstanden, indem die militärischen Anforderungen und die technische Realisierbarkeit aufeinander abgestimmt wurden.

Für die Ueberprüfung einzelner Radarparameter, zB der Genauigkeit, wurde **das in Emmen installierte Vermessungsradar ADOUR** als Referenzsystem vorgesehen. Seine ca. 10 mal höhere Genauigkeit als diejenige der zu überprüfenden Radarsysteme qualifizierte es als ausgezeichnetes Messinstrument. Die Tests sollten für alle drei zu überprüfenden Radarsysteme sowohl auf den Standorten Wangenerberg und Homberg erfolgen.

Der wichtigste Test galt zweifellos der Ueberprüfung der Subcluttervisibilität und den Anforderungen der Reichweite.

- **Die Flugwege der Testflugzeuge wurden dabei so gewählt, dass sie über Standzeichengebiete führten in denen Clutterintensitäten von  $10^5 \text{ m}^2$  herrschten.**
- **Im weiteren wurde bei der Wahl der Flugwege darauf geachtet, dass das Testflugzeug vom Radar möglichst auf der ganzen Strecke mit einem Aspektwinkel von  $35^\circ - 55^\circ$  zur Flugzeug - Längsachse angestrahlt wurde.**

Die Testpisten führten über Distanzen von 30 – 100 km, die Flüge erfolgten jeweils auf drei verschiedenen Flughöhen, welche aufgrund der **Rimini Karte** und der Antennendiagramme festgelegt wurden.

Das Testkriterium war dabei das Blip/Scan Ratio das über ca. 10 Flüge gemittelt wurde. Ergänzungstests wurden zur Bestimmung des Ueberwachungsvolumens und der Minimaldistanz der Radarsysteme durchgeführt.

Eine relativ wichtige Ueberprüfung stellte der **Falschalarm - Test** dar, bei dem in einem überwachten Volumen von  $180^\circ$  im Azimut, 100 km in der Distanz und im gesamten Elevationsbereich **nicht mehr als 5 Falschplots pro Antennenumdrehung** erzeugt werden durften. Dieser Test musste jeweils unter Berücksichtigung des Restluftverkehrs und unter Ausschluss von extremen Witterungseinflüssen während der Nacht durchgeführt werden.

Die Bestimmung der Fehlerverteilung in Distanz/Höhe/Azimut sowie der Distanzauflösung erfolgte über standzeichenfreiem Gebiet in Synchronisation mit dem ADOUR - Vermessungsradar wobei sich zwei Flugzeuge auf der Messflugpiste für die Bestimmung der Distanzauflösung kreuzten.

Zur Ueberprüfung der Flugwegbildung wurde wiederum das ADOUR - Vermessungsradar als Referenz verwendet. Hierbei wurde das Verhalten des Trackers der verschiedenen Radarsysteme, bei Flugmanövern wie Kurvenflügen und Längsbeschleunigungen mit verschiedenen Steig- und Sinkgeschwindigkeiten untersucht.

In einem durch eigene Störmittel produzierten „Chaff“ - Gebiet, indem zB 240 Pakete S-Band „Chaff“ in einem Raum von 20 x 20 km x 1.5 km verstreut wurden, untersuchte man:

- **die Möglichkeiten der Zielerfassung eines F5E Flugzeuges**
- **die Durchverfolgung eines F5E Flugzeuges**
- **die Auflösung von 2 Flugzeugen in der „Chaff“ - Wolke**

Obwohl im militärischen Pflichtenheft die Störfestigkeit gegenüber bodengestützten Sättigungsstörern nicht explizit definiert war, wurden zur Untersuchung der Störfestigkeit Breitband-Rauschstörer und gewobbelte Breitband-FM - Rauschstörer eingesetzt, man wollte damit über nachfolgende Fragen Aufschluss zu erhalten:

- Sind die ESM-Kreise wirksam ?
- Ist eine Zielerfassung und Verfolgung im nicht gestörten Bereich (ausserhalb des Sektors der Hauptstrahlungskeule der Antenne noch möglich ?

### AN/TPS-43E Radarsystem

Als erstes System kam anfangs September 1978 das Radar AN/TPS - 43E, der Firma Westinghouse in Baltimore MD, zur Erprobung in die Schweiz. Das AN/TPS-43 System war als mobiles 3D - Frühwarnradar, siehe die Antenne in nebenstehender Figur, in den späten sechziger Jahren für die USAF entwickelt worden.



Das AN/TPS - 43 wurde in der Folge bei der USAF in den siebziger Jahren in grosser Anzahl eingeführt. Bei dem im Jahre 1978 in der Schweiz erprobten AN/TPS-43E System handelte es sich um eine bereits verbesserte Version.

Das AN/TPS-43 war als erstes taktisches 3D - Radar mit einer Reichweite von 240 Nautical Miles bei der USAF eingeführt worden. Das im Frequenzbereich von 2.9 – 3.1 GHz arbeitende Rundsuchradar verfügte über eine Impulsleistung von 2.8 Megawatt bei einer mittleren Leistung von 4.7 kW und einer PRF von 250 Hz. Sendeseitig strahlte die Antenne über eine cosecant<sup>2</sup> Charakteristik die Energie in den Raum ab. Das Sendesystem arbeitete im Masteroscillator/Poweramplifier Prinzip mit einer TWT/Twystron – Verstärkerkette. Die Pulsbreite betrug 3.25 µs. Empfangsseitig arbeitete die Antenne zur Bildung der 3D-Ueberdeckung mit 6 „stacked“ Beam - Paaren. Die Weiterverarbeitung erfolgte in 6 separaten Empfangskanälen die eine gleichzeitige Such- und Höhendarstellung der Ziele im abgetasteten Ueberdeckungsvolumen ermöglichten. Das Radarsystem der AN/TPS-43E Version verfügte bereits über ein Digital - MTI für die Standzeichenlöschung.

Die parabolische Antenne ergab für den Sendefall eine azimutale Beambreite von 1.1° bei einem Gewinn von 36 dB beziehungsweise von 41 dB für den Empfangsfall und war auf einem 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub> Tonnen M35 Anhänger aufgebaut.

Die mit vertikaler Polarisierung arbeitende Antenne tastete den Raum mit 6 U/min ab. Das Sende/Empfangssystem war in einem separaten Shelter – Anhänger untergebracht. Zusätzlich verfügte das System über eine IFF/SIF Ausrüstung deren Antenne auf dem Foto zu erkennen ist.

Das AN/TPS-43E System wurde in den ersten Septembertagen des Jahres 1978 durch ein Erprobungsteam der Firma Westinghouse, das von Mr. George Bone geleitet wurde, auf dem Versuchsstandort Wangenerberg installiert und anschliessend für die geplante Erprobung in Betrieb genommen und technisch unterhalten.

Die Erprobung des AN/TPS-43E Radarsystems welche sich auf den Teststandorten Wangenerberg und Homberg über die Monate September bis November 1978 erstreckte, liess einige grundlegende Schwachstellen erkennen.

Das vor Ort befindliche Erprobungsteam wurde wegen den festgestellten Problemen zeitweilig durch eine Gruppe von Spezialisten des Werkes Baltimore unterstützt welche versuchte die Systemsleistung an die gestellten Anforderungen besser anzupassen. Desto Trotz konnten die Anforderungen während der Erprobung nicht erfüllt werden.

Die Firmenleitung von Westinghouse kam daher zum Schluss, dass die für den Einsatz in der Schweiz erforderliche Systemsleistung nur mit einem umfassendes Verbesserungsprogramm erreicht werden könne !

## AN/TPQ-37 Radarsystem

Als zweites System kam Ende November 1979 das Radar AN/TPQ-37 der Firma Hughes Aircraft in Fullerton CA, zur Erprobung in die Schweiz.

Das AN/TPQ-37 System wurde als mobiles Radarsystem in den späten sechziger Jahre für das Lokalisieren von Artilleriestellungen entwickelt. In einer ersten Ausführung wurden von Hughes ca. 100 Ausrüstungen für den Einsatz im Vietnam - Krieg geliefert. Bei der im Jahre 1979 in der Schweiz erprobten Ausrüstung handelte es sich um eine sehr moderne schon mehrfach verbesserte Version.



Das AN/TPQ-37 Radar arbeitete im S – Band mit einer instrumentierten Reichweite von 115 km. Die Impulsleistung des Radarsenders betrug ca. 130 kW bei einer mittleren Leistung von 2 kW. Das Sendesystem arbeitete mit einer TWT- Verstärkerkette nach dem Masteroscillator/Poweramplifier Prinzip und konnte innerhalb einer Bandbreite von 10% auf 32 Frequenzen abgestimmt werden.

Die Ausrüstung verwendete eine mechanisch starr montierte Phased Array Antenne. Im sog. „starring mode“ tastete die horizontal polarisierte Strahlungskeule den Azimutbereich in einem  $\pm 45^\circ$  Sektor und den Elevationsbereich in einem  $45^\circ$  Sektor, elektronisch ab.

Die Standzeichenunterdrückung erfolgte wahlweise mit einem 3 - Puls Digital – MTI oder nach dem Puls Doppler Verfahren mit einer Entfernungseindeutigkeit von 115 km.

Die Phased Array Antenne erzeugte bei einem Gewinn von 37 dB eine Strahlungskeule von beinahe kreisförmigem Querschnitt mit einem – 3 dB Ausdehnung von  $2.4^\circ$ .

Im Auswerteteil erfolgte mit einem Digital - Computer die Berechnung der ballistischen Geschosshahn aus den Radarerfassungen. Aus der ballistischen Geschosshahn wurde anschliessend der Geschützstandort errechnet. Mit einer elektromechanischen Plotterausrüstung welche im Operations - Shelter untergebracht war, konnte der Geschützstandort zudem auf einer geographischen Karte markiert und herausgedruckt werden.

Während der Systemserprobung standen zwei der HMD-22 Displaykonsolen des Florida MRS Systems für die Darstellung der Radarvideos zur Verfügung. Die HMD-22 Displaykonsolen waren während der Erprobung auf den Teststandorten in einer Baracke untergebracht.

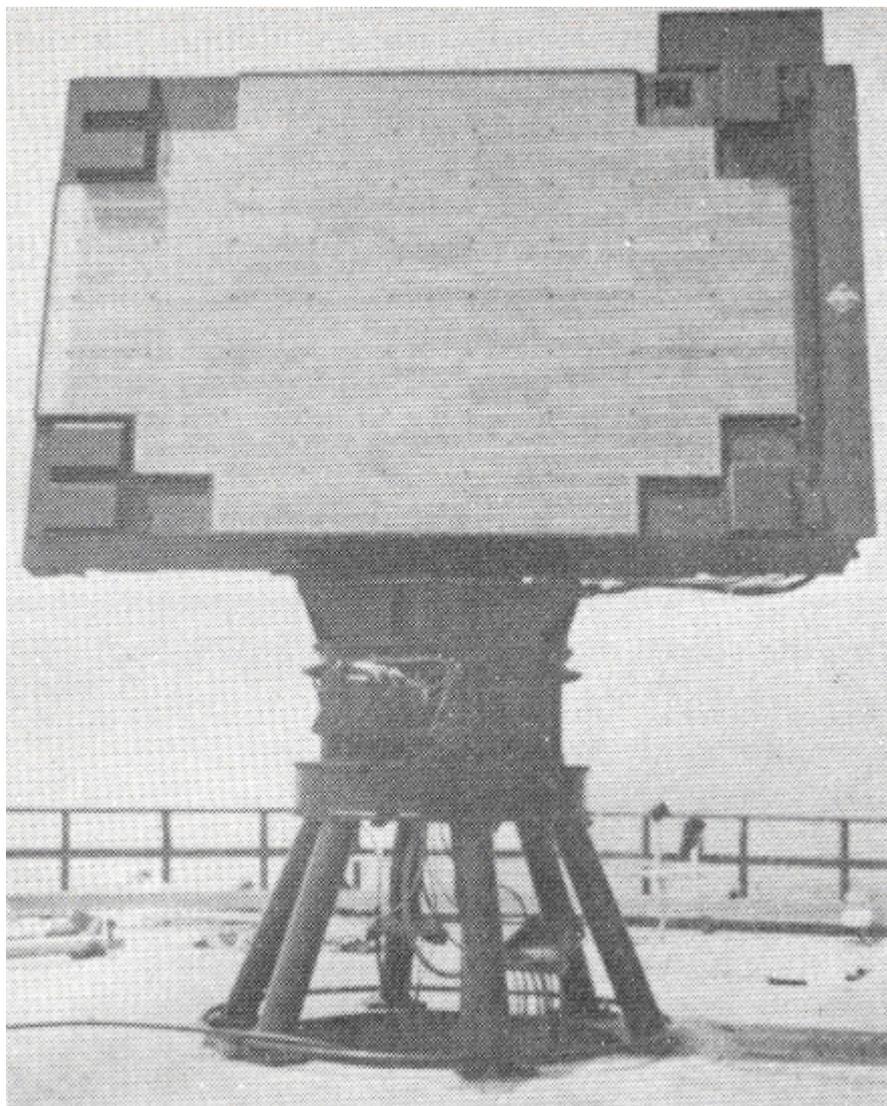
Obwohl das AN/TPQ-37 System bei der Entwicklung primär für das Vermessen ballistischer Flugbahnen von Artillerie - Geschossen auf relativ kurzer Entfernung ausgelegt worden war, verfügte das Radar dank dem sehr hohen Produkt aus Sendeleistung und Antennengewinn über die hervorragenden Detektions - Eigenschaften eines Mittelbereichradars.

Das AN/TPQ-37 System wurde Ende November 1979 durch ein Hughes Erprobungsteam, das unter der Leitung von Mr. Robert Porter arbeitete auf dem Versuchsstandort Wangenerberg installiert und anschliessend während der geplanten Erprobung operationell betrieben und technisch unterhalten. Die Erprobung des AN/TPQ-37 Radarsystems erfolgte auf den Standorten Wangenerberg und Homberg im Zeitraum vom Dezember 1979 bis März 1980.

Obschon das AN/TPQ-37 System mit seinem beschränkten 90° Suchsektor nicht über die Rundsuchmöglichkeit verfügte die an das Tieffliegerradar gestellt waren, liess sich das vorgesehene Erprobungsprogramm ohne wesentliche Einschränkungen durchführen.

Um das für einen 90° Azimutsektor ausgelegte AN/TPQ-37 System an die Anforderungen des Tiefflieger Radars anzupassen, stellte Hughes eine Nachentwicklung in Aussicht, welche neben weiteren sog. „Helvetisierungen“ auch den geforderten 3D Rundsuchmodus beinhalten sollte.

In der nachstehenden Figur ist die aus dem AN/TPQ-37 abgeleitete Rundsuchantenne des Hughes Air Defense Precision Tracking Radars VSTAR - PT ersichtlich. Dieses später von der Firma Hughes Aircraft für die Streitkräfte von Israel und Norwegen gelieferte System verfügte über ein entsprechendes Antennen – Pedestal, das einen Rundsuchbetrieb des Radars ermöglichte <sup>9)</sup>.



## RAT-31S (MRCS-403) Radarsystem

Als drittes System kam Mitte September 1980 das Radar RAT-31S der italienischen Firma Selenia in Fusaro, zur Erprobung in die Schweiz. Beim RAT-31S, siehe nachstehendes Foto, handelte es sich um ein mobiles, technisch sehr modernes 3D Frühwarnradar. Die Entwicklung war während der ersten Hälfte der siebziger Jahre erfolgt, 1980 zum Zeitpunkt der Erprobung waren die ersten fünf hergestellten Systeme an das österreichische Bundesheer geliefert worden.



Das RAT-31S Radar arbeitete im S - Band mit einer instrumentierten Reichweite von 330 km. Das Sendesystem lieferte eine Impulsleistung von 135 kW bei einer PRF von 450 Hz, die mittlere Sendeleistung betrug ca. 4 kW.

Die mit 6 U/min rotierende Phased Array Antenne tastete mit drei übereinander liegenden horizontal polarisierten („stacked“) Strahlungskeulen den Elevationsbereich in einem 30° Sektor sequentiell ab. Die Phased Array Antenne erzeugte bei einem Gewinn von 37 dB eine Strahlungskeule von beinahe kreisförmigem Querschnitt mit einer – 3 dB Beambreite von 1.5°.

Das Sendesystem arbeitete im Frequenzbereich von 3.1 – 3.5 GHz nach dem Masteroscillator/Poweramplifier Verfahren mit 24 abstimmbaren Frequenzen und verwendete eine TWT – Verstärkerkette.

Das Empfangssystem verfügte über 3 Empfangskanäle zur simultanen Verarbeitung der drei „stacked Beams“.

Die Standzeichenunterdrückung des RAT-31S erfolgte in zwei Stufen mit einem nach dem „Fast Fourier Transformation“ (FFT) Prinzip arbeitenden Puls Doppler System wobei in den untersten Beamgruppen noch ein zusätzliche 3 Puls MTI System vorgeschaltet wurde. Das Radar wies einen hohen eindeutigen Radialgeschwindigkeitsbereich von 3000 km/h auf, wobei ein nicht eindeutiger Entfernungsbereich in Kauf genommen wurde.

Zusätzlich zur separat aufgestellten Antenne bestand das System aus je einem Anhänger für die Unterbringung des Senders und der Empfänger/Signalverarbeitung sowie aus einem zusätzlichen Operations – Anhänger in dem die Anzeigeausrüstungen installiert waren.

Die Firma Selenia verfügte zum Zeitpunkt der Erprobung über kein eigenes betriebsbereites RAT-31S System. Deshalb veranlasste Selenia, dass die Erprobung in der Schweiz mit einem vom Bundesministerium für die Landesverteidigung Oesterreichs zur Verfügung gestellten MRCS-403 Radarsystem durchgeführt werden konnte.

Die MRCS-403 Ausrüstung welche von Selenia kurz zuvor für das in Oesterreich im Aufbau befindliche Luftverteidigungssystem „Goldhaube“ geliefert worden war, entsprach bezüglich den Eigenschaften des Radars dem RAT 31S System.

Begleitet von einem aus 20 uniformierten Militärs des Oesterreichischen Bundesheeres bestehendem Installationsteam wurde das MRCS-403 Radarsystem Mitte September 1980 aus dem Raum Salzburg in die Schweiz verlegt. Die Installation erfolgte auf dem Versuchsstandort Wangenerberg unter der Leitung von Major Pröll durch das österreichische Militärpersonal

Für die anschliessende Inbetriebsetzung und die technische Betreuung des Systems während der Versuchsperiode stellte die Firma Selenia das aus den Radarspezialisten Dr. Ingenieur Farina, Ingenieur Colazikgari und Ingenieur Goretti bestehende Firmenteam zur Verfügung.

Die Erprobung erfolgte in der Zeitspanne von September – November 1980 auf dem Teststandort Wangenerberg. Im wesentlichen wurden dabei die gleichen Versuche durchgeführt wie schon bei der Erprobung der Radarsysteme AN/TPS-43 und AN/TPQ-37.

**Ein Vergleich der bei den Erprobungen erzielten Resultate ergab folgendes Bild:**

Das von Westinghouse zur Verfügung gestellte AN/TPS-43E entsprach in seiner Systemkonzeption nicht dem Stand der Technik der frühen achtziger Jahre. Die Detektionsleistung bei der Erfassung von Zielen über den Standzeichengebieten welche von den Erprobungsstandorten eingesehen werden konnten, war unzureichend. Das Radar erfasste wohl in den standzeichenfreien Gebieten Flugzeuge bis in tiefere Räume, über Standzeichen war die Radarerfassung jedoch mangelhaft und die Höhenvermessung funktionierte nicht mehr.

Die Standzeichenunterdrückung genügte in ihrer Wirkung auch nicht, um den vorhandenen Bodenclutter vollständig zu unterdrücken, in der Folge entstanden dadurch viele Falschziele.

Für die Westinghouse Antenne war charakteristisch, dass eine gleichzeitig Beleuchtung des ganzen Elevationsbereiches mit jedem Sendepuls erfolgte. Nur im Empfang wurden „stacked Beams“ verwendet. Dies hatte den Nachteil zur Folge, dass Cluttersignale in den Seitenkeulen nur gemäss dem Einweg- statt dem Zweiweg- Gewinn des Antennendiagramms abgeschwächt wurden.

Obwohl für den Fall einer Beschaffung die Verbesserung des MTI, eine höhere PRF und eine MTI gesteuerte Höhenberechnung in Aussicht gestellt wurden, hätte man bei den in der Schweiz vorliegenden Standzeichenverhältnissen, für Flughöhen bis einige 100 m über Grund, zweifellos mit erheblichen Erfassungslücken und fehlerbehafteten Höhenberechnungen rechnen müssen.

Das von Hughes zur Verfügung gestellte AN/TPQ-37 System war ein modernes und für die damalige Zeit sehr flexibles System. Da für die Clutterfilterung sowohl ein MTI mit Clutter Map sowie eine „Range Gated Puls Doppler“ Verarbeitung angewendet wurden, genügte die Standzeichenunterdrückung den Anforderungen weitgehend, welche durch unser Gelände gestellt wurden.

Ueber Standzeichen und bei Flügen mit kleiner radialer Geschwindigkeit war die Radarerfassung zufriedenstellend, das System lieferte einwandfreie Daten bezüglich Position, Flughöhe und Auflösung. Die Standzeichenunterdrückung reichte auch aus, um den Boden- und Wetter- Clutter zu unterdrücken, so dass die durch den Rest - Clutter verursachte Falschalarmzahl, die spezifizierten Werte nicht überstieg. In der vorliegenden Ausführung erlaubte das AN/TPQ-37 System jedoch keinen Rundsuchbetrieb, obwohl von der Firma eine entsprechende Nachentwicklung in Aussicht gestellt wurde, erforderte deren Realisierung zweifellos einen grösseren materiellen und zeitlichen Aufwand. Zudem beinhaltete diese Nachentwicklung weitere Risiken die zum Zeitpunkt der Erprobung nicht abgeschätzt werden konnten.

Das von Selenia zur Verfügung gestellte RAT-31S System war ein technisch sehr modernes System. Die spezielle Puls Codierung erlaubte die Dopplerfilterung nach dem Fast Fourier Transformation (FFT) Verfahren innerhalb eines Pulszuges, ohne dabei Mehrdeutigkeiten in der Radialgeschwindigkeit zu verursachen.

Mit dieser Verarbeitung wäre daher ein Puls zu Puls Frequenzwechsel möglich gewesen, was als ECCM - Massnahme angewendet, bestehende Vorteile geboten hätte.

Durch die drei vorhandenen parallelen Verarbeitungs Kanäle hätte die Beambreite verkleinert oder die Anzahl Treffer pro Ziel vergrössert werden können, was eine noch bessere Clutterunterdrückung ermöglicht hätte.

Bei der Erprobung ergaben sich jedoch die nachfolgenden eher enttäuschende Resultate.

Das Radar erfasste im standzeichenfreien Gebiet die Flugzeuge bis in die unteren Flugräume und lieferte einwandfreie Daten bezüglich Position, Flughöhe und Auflösung.

Ueber Standzeichen und bei Flügen mit kleiner radialer Geschwindigkeitskomponente war die Radarerfassung aber mangelhaft und führte in vielen Fällen zum Verlust des Flugweges. Ausserdem genügte die vorhandene Standzeichenunterdrückung nicht, um die in unserem Gelände vorkommenden Boden- und Wetter- Clutter genügend zu unterdrücken; die Folge davon waren viele Falschziele, die ein brauchbares automatisches Tracking verunmöglichten.

Bei den während der Nacht durchgeführten Falschalarmtests wurden daher die spezifizierte Falschalarmzahl um ein vielfaches überschritten, die vom System aus Falschzielen aufgebaute Luftkriegssituation blieb später dem beteiligten schweizerischen Testteam noch lange Zeit in abschreckender Erinnerung.

Die implementierte Benützersoftware war zudem noch im Entwicklungsstadium und nicht betriebssicher. Aus diesem Grunde musste die Führung der Testflugzeuge ab den Anzeigekonsolen hauptsächlich anhand der Rohvideoinformation erfolgen.

Obschon das RAT-31S Radarsystem vom Konzept her bestechende Vorteile versprach, wurden diese bei der Erprobung nicht bestätigt. Das System beinhaltete zweifellos noch viele Kinderkrankheiten, deren Behebung einen zum Zeitpunkt der Erprobung nicht abzuschätzenden Aufwand erfordert hätte.

## **Schlussfolgerung im Frühling 1980 aus den Erprobungen.**

Keines der erprobten Systeme erfüllte, in der anlässlich der Tests vorliegenden Ausführung, die Anforderungen des militärischen Pflichtenheftes auch nur annähernd !

Eine Systemwahl als Resultat der Erprobungen konnte deshalb zu diesem Zeitpunkt nicht getroffen werden. Den beteiligten Firmen bot sich anlässlich der unter realistischen Einsatzbedingungen erfolgten Erprobung, Gelegenheit mit ihren Systemen Erfahrungen zu sammeln und sich ein Bild über die noch erforderlichen Verbesserungen und Weiterentwicklungen zu machen.

Die Firmen wurden im Nachgang an die Erprobungen aufgefordert, nach Verbesserungslösungen zu suchen und auszuarbeiten um in der Folge neue Offerten für die an die Anforderungen des militärischen Pflichtenheftes angepassten Systeme einzureichen.

## Quellenverzeichnis

- 1) Der vorliegende Beitrag: „Evaluation der Tiefflieger Radarsysteme“ basiert zT auf Ueberlegungen und Studien die im Rahmen der AG RAS gemacht wurden.
- 2) Merrill I. Skolnik, Introduction to Radarsystems, Vol. III, McGraw-Hill New York, 1990, ISBN 0-07-057913-X
- 3) L.V. Blake, A Guide to Basic Pulse Radar Maximum Range Calculation
- 4) David K. Barton, Modern Radar System Analysis, Artech House Boston, 1988, ISBN 0-89006-170-X
- 5) James E. Scheer, Coherent Radar Performance Estimation, Artech House Boston, 1993, ISBN 0-89006-628-0
- 6) Gary E. Evans, Antenna Measurement Techniques, Artech House Boston, 1990, ISBN 0-89006-375-3
- 7) Bernhard L. Lewis, Aspects of Radars Signal Processing, Artech House Boston, 1986, ISBN 0-89006-191-1
- 8) Major Frank Farner, Das Clutter - Problem bei Suchradars, Stab FF Trp 1F, Oktober 1976
- 9) David A. Ethington, Multifunctional Rotating Electronically Scanned Radar for Air Surveillance, IEEE Proceedings, February 1985
- 10) MIT Lincoln Laboratory, Radar Development, A Fifty Year Review, February 2000