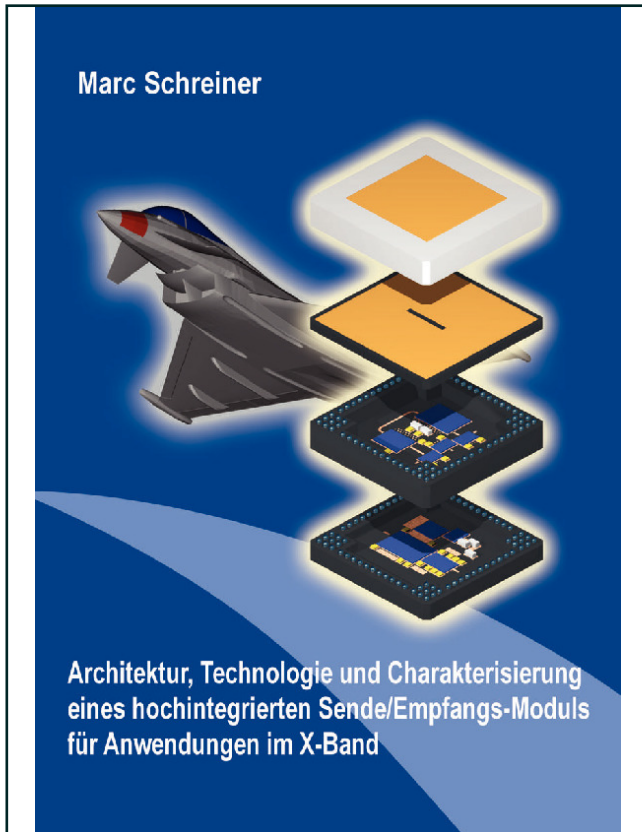




Marc Schreiner (Autor)

Architektur, Technologie und Charakterisierung eines hochintegrierten Sende/Empfangs-Moduls für Anwendungen im X-Band



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/2013>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1 Einleitung

Die meisten heute eingesetzten Radarsysteme an Bord von Flugzeugen sind mechanisch abtastende Radarsysteme. Dabei ist eine hochbündelnde Antenne, z.B. eine Parabolantenne oder eine planare Gruppenantenne, kardanisch in der Spitze des Flugzeugs aufgehängt. Die Strahlungseigenschaften der Antenne selbst sind nicht veränderlich, das räumliche Abtasten (*Scannen*) wird durch mechanisches Drehen der Antenne mit Motoren bewerkstelligt.

Aus der Theorie der Gruppenantennen [1,2] ist schon seit langem eine weitere Möglichkeit bekannt, hochbündelnde Antennen zu entwerfen und deren Strahl zu schwenken: Positioniert man mehrere einzelne wenig bündelnde Strahler zu einer Antennengruppe bzw. zu einem Array und verschaltet diese Strahler auf geeignete Art und Weise, so erhält man eine hochbündelnde Antenne. Die Abstrahlrichtung ist dabei ganz entscheidend abhängig von der Verschaltung – insbesondere der Phase – mit der die einzelnen Strahler angesteuert werden. Durch entsprechende Einstellung der Phase der einzelnen Strahler läßt sich die Strahlungsrichtung der Antenne in einem weiten Bereich schwenken. Mit dieser Technologie ist es möglich, sogenannte phasengesteuerte Radarsysteme herzustellen, die zahlreiche Vorteile gegenüber mechanisch abtastenden haben [3-5]:

- Die elektronische Steuerung der Antenne eliminiert die Trägheit der mechanischen Strahlsteuerung und erhöht die Abtastgeschwindigkeit erheblich.
- Die elektronische Strahlsteuerung erlaubt höchste Flexibilität, da die Strahlungseigenschaften der Antenne an die verschiedenen Betriebsmodi angepaßt werden können. Verschiedene Betriebsmodi können verschachtelt werden; so können beispielsweise mehrere Ziele verfolgt und gleichzeitig neue gesucht werden.
- Störquellen können durch entsprechende Strahlformung ausgeblendet werden.
- Der Radarrückstreuquerschnitt der Antenne läßt sich erheblich reduzieren, was die Tarnbarkeit des Flugzeugs verbessert.
- Der Wegfall mechanischer Teile erhöht die Zuverlässigkeit und senkt die Wartungskosten.

Die phasengesteuerten Antennensysteme werden auch elektronisch scannende Arrays (ESA) genannt, da ihre Antennenkeule durch elektronische Regelung der Phase geschwenkt wird. Grundsätzlich unterscheidet man zwei Arten von elektronisch scannenden Radaren: Passive und aktive ESAs [7-9]. Abbildung 1-1 zeigt prinzipiell den Aufbau dieser beiden Systeme.

Beim *passiven ESA* (Abbildung 1-1a) wird im Vergleich zu konventionellen Radarsystemen nur die mechanisch geschwenkte Antenne gegen ein Array aus kleinen Strahlerelementen, Phasenschiebern (φ) und einem entsprechenden Speisetzwerk ausgetauscht. Die Sendetechnik und die Empfangstechnik bleiben weitgehend gleich. Zur Steuerung der Phase werden meistens Ferritphasenschieber eingesetzt, die von einem Rechner gesteuert werden; eine Regelung der Amplitude ist in der Regel nicht vorgesehen oder ist fest im Speisetzwerk realisiert. Die größte Herausforderung bei der Konstruktion besteht darin, die Verluste

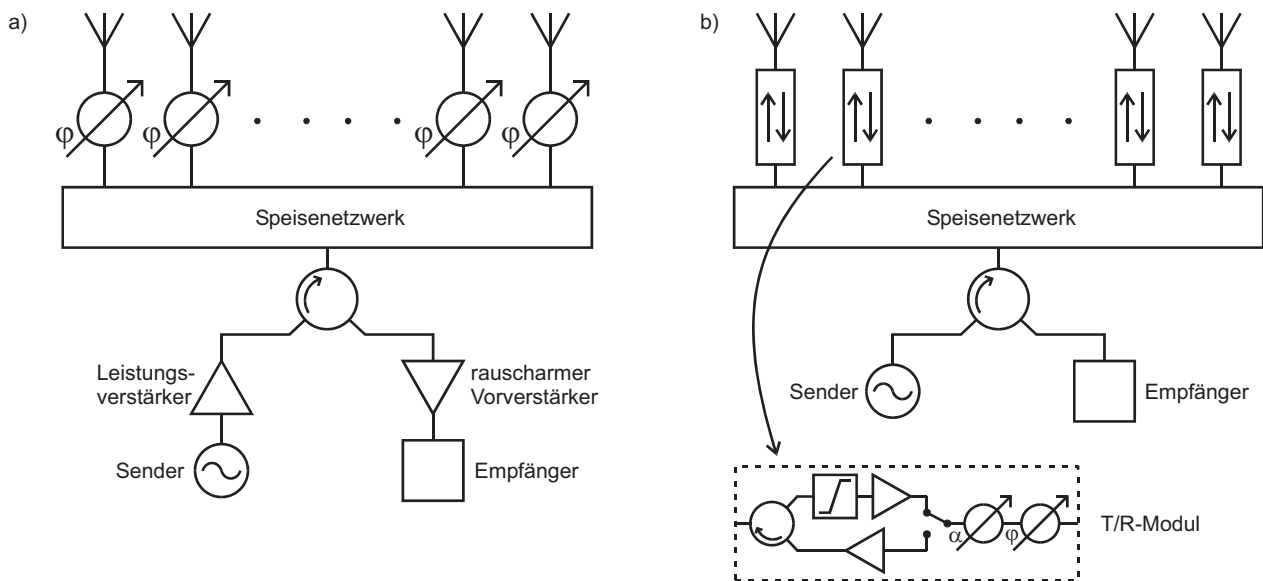


Abbildung 1-1: Blockschaltbild eines passiven a) und eines aktiven b) ESAs.

der Antenne gering zu halten. Dazu ist meistens der Einsatz von Hohlleitertechnik für das Speisernetzwerk nötig, was sich negativ auf das Volumen und das Gewicht der Systeme auswirkt. Die Verluste im Speisernetzwerk und in den Phasenschiebern begrenzen die Empfindlichkeit und Reichweite des Systems und führen zu einer schlechten Leistungsbilanz. Weiterhin haben passive ESAs einen zentralen Leistungsverstärker, der meistens als Wanderfeldröhrenverstärker ausgeführt ist. Diese Komponente und das dazu gehörende Hochspannungsnetzteil ist nach wie vor relativ stör anfällig und häufig die Ursache für den Ausfall des Radarsystems, auch bei konventionellen Radaren.

Passive ESAs sind heutzutage jedoch die preiswertesten phasengesteuerten Radarsysteme, da sie nur aus relativ wenigen Bauteilen bestehen. Diese Systeme werden teilweise in Flugzeugen, in denen ein geringer Rückstreuquerschnitt erforderlich ist, eingesetzt, [3], [10].

Wesentlich aufwendiger dagegen ist das *aktive ESA* (Abbildung 1-1b) aufgebaut. Anstelle der Ferritphasenschieber befinden sich hier sogenannte Sende- / Empfangsmodule (auch als *S/E-Module* bezeichnet) unmittelbar hinter den Strahlerelementen des Arrays. Jedes Sende- / Empfangsmodul enthält eine elektronische Regelung von Phase und Amplitude sowie Verstärker für den Sende- und Empfangsmodus. Es gibt keine zentrale Sendeendstufe mehr. Das aktive ESA ist dem passiven ESA in vielerlei Hinsicht überlegen [3-8]:

- Das aktive System weist eine höhere Empfindlichkeit im Empfangsmodus auf, da die Rauschzahl im wesentlichen durch den Vorverstärker bestimmt wird, der sich unmittelbar hinter dem Strahlerelement befindet; dadurch verbessert sich die Reichweite.
- Die Leistungseffizienz wird gesteigert, da die Sendeleistung unmittelbar an der Apertur erzeugt und somit wenig gedämpft wird. Neue Verstärkertechnologien wie der HBT- oder GaN-Verstärker könnten dies sogar noch erheblich verbessern [11].

- Der fehleranfällige zentrale mit Wanderfeldröhren aufgebaute Leistungsverstärker entfällt. Die Signalverstärkung ist auf viele einzelne Module verteilt. Der Ausfall einzelner Module führt nicht zum Ausfall des Gesamtsystems, sondern nur zu einer geringeren Systemleistungsfähigkeit; dies steigert die Zuverlässigkeit des gesamten Radarsystems erheblich und senkt die Wartungskosten (engl. *graceful degradation* [8]).
- Da sowohl die Phase (φ) als auch die Amplitude (α) im Sende- und Empfangsmodus geregelt werden können, weist das aktive System hohe Flexibilität bei der Strahlsteuerung auf.
- Da die Leistungsverstärkung für den Sende- und Empfangsmodus unmittelbar an der Apertur erfolgt, kann das Speisernetzwerk für geringe Leistungen ausgelegt und muß nicht auf geringste Verluste hin optimiert werden. Somit kann das Speisernetzwerk kleiner, leichter und preiswerter ausgeführt werden.
- Das aktive System wiegt weniger und ist kompakter als das passive.

An aktiven ESAs im X-Band wird im Rahmen des MERA-Programms (*Molecular Electronics for Radar Applications* [3]) seit ca. 1964 gearbeitet. Aufgrund der großen Komplexität und der enormen Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik, die Halbleitertechnologie im Mikrowellenbereich sowie die digitale Signalverarbeitung hat es lange gedauert, bis aktive ESAs hergestellt werden konnten. Die ersten Systeme MERA (1968) und RASSR (1974) basierten auf Siliziumtechnologie und waren nur wenig leistungsfähig [3]. Der Durchbruch gelang mit dem SSPA-System 1988, als GaAs-Halbleiter für alle Mikrowellenkomponenten zur Verfügung standen. Fortschritte in der Aufbau- und Verbindungstechnik und die Automatisierung der Fertigung von Mikrowellenkomponenten haben in den letzten 10 Jahren die Kosten für die Fertigung von ESAs um eine Größenordnung gesenkt [7]. Seit 1999 werden aktive ESAs im X-Band serienmäßig hergestellt und im amerikanischen Flugzeugtyp F-22 eingesetzt [4]. Außerdem gibt es Nachrüstprogramme für ältere Maschinen (F-15c, F-16, F-18). In Europa wird seit 1993 das AMSAR-System [28-30] (Airborne Multirole Solid-state Active array Radar) für den Eurofighter 2000 entwickelt [5],[6]. Experten gehen davon aus, daß Flugzeuge ab dem Jahr 2010 ohne aktives ESAs nicht mehr konkurrenzfähig sein werden [5].

Die zentrale Schlüsselkomponente eines jeden aktiven ESAs sind die S/E-Module [3], [14]. Die Leistungsfähigkeit des gesamten Systems wird im wesentlichen durch die Leistungsdaten dieser Baugruppen bestimmt (Sendeleistung, Rauschzahl, Zuverlässigkeit etc.). Da in einem Bordradarsystem im X-Band insgesamt ca. 2000 Module zum Einsatz kommen, wird die Größe und das Gewicht maßgeblich durch die Module beeinflusst. Vor allem die Kosten des Gesamtsystems sind stark von den Kosten der S/E-Module abhängig [12,13].

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine neuartige hochintegrierte Architektur für ein X-Band-S/E-Modul und eine dafür geeignete Aufbau- und Verbindungstechnologie zu entwickeln und diese anhand eines Demonstrators darzustellen und zu charakterisieren. Herkömmliche Module besitzen den Nachteil, daß ihre Anwendungsmöglichkeiten aufgrund ihrer großen Bautiefe eingeschränkt sind. Durch den Einsatz von dreidimensionaler Integrationstechnik und Mehrschichtkeramiktechnologie werden Größe, Bautiefe und Gewicht des S/E-Moduls redu-

ziert. Ein neuartiges Modulkonzept mit integriertem Strahler verbessert dessen Leistungsfähigkeit und eröffnet neue Anwendungsmöglichkeiten. Wegen seiner geringen Bautiefe eignet sich das neu entwickelte Modul zum Beispiel zur Integration von zusätzlichen Aperturen, die den überwachbaren Raumbereich eines Flugzeugs erheblich vergrößern, oder Radare, deren Apertur an gekrümmte Oberflächen angepaßt werden kann.

Kapitel 2 verdeutlicht zunächst den Aufbau und die Funktionsweise von S/E-Modulen. Es werden zukünftige Anwendungsszenarien von aktiven ESAs vorgestellt und die daraus resultierenden Auswirkungen und Anforderungen an die S/E-Module erörtert. In einer Konzeptstudie werden insgesamt vier verschiedene Modularchitekturen gegeneinander abgewogen. Das Kapitel endet mit der Vorstellung einer neuartigen Modularchitektur.

Kapitel 3 beschreibt dann ausführlich die Aufbau- und Verbindungstechnik, die die Voraussetzung zur Realisierung hochintegrierter S/E-Module ist. Zunächst wird die Mehrschichtsubstrattechnologie auf Basis von Aluminiumnitrid-Keramik vorgestellt. Im Anschluß werden verschiedene dreidimensionale Verbindungstechnologien für Mikrowellen entwickelt und untersucht.

Kapitel 4 ist dann schließlich der Integration und Funktionsprüfung eines Moduldemonstrators gewidmet. Neben der Schaltungstechnik des Demonstrators wird auch der Aufbau und die Entwicklung eines Mikrokühlers und Speisernetzwerks auf Basis der *Direct Copper Bonding Technologie* [15], [16] vorgestellt. Das Kapitel schließt mit der vollständigen Charakterisierung und Vermessung des Moduldemonstrators im Sende- und Empfangsfall.

Kapitel 5 faßt die Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Weiterentwicklungen des S/E-Moduls.

2 Vergleich unterschiedlicher Aufbaukonzepte von S/E-Modulen

2.1 Aufbau und Funktion von S/E-Modulen

Das Sende- / Empfangsmodul (S/E-Modul) dient der Verstärkung und Steuerung der gesendeten und empfangenen Radarsignale. Insgesamt sind in einem S/E-Modul fünf Mikrowellenfunktionen zusammengefaßt [3],[14]. Es beinhaltet die letzte Verstärkerstufe im Sendezweig und die erste Verstärkerstufe im Empfangszweig des Radarsystems. Ein weiterer wichtiger Bestandteil des S/E-Moduls sind Elemente zur Steuerung von Phase und Amplitude der Sende- und Empfangssignale, was die Schwenkung der Antennenkeule in einer Gruppenantenne ermöglicht. Ein Zirkulator sorgt schließlich für die Trennung von Sende- und Empfangssignal.

Abbildung 2-1 zeigt das Blockschaltbild eines S/E-Moduls mit sogenannter *common leg*-Struktur [17]. Vorteil dieser Schaltungstechnik ist, daß das Speisernetzwerk, welches die Module eines Arrays zusammenschaltet, für Sende- und Empfangssignale genutzt werden kann, und daß die Schaltung zur Steuerung von Amplitude und Phase nur in eine Richtung durchlaufen wird. Diese kann deshalb auch Verstärkerstufen zur Optimierung der Rauschzahl beinhalten. Das in dieser Arbeit aufgebaute S/E-Modul basiert auf dem in Abbildung 2-1 dargestellten Blockschaltbild. In [17] werden noch weitere mögliche Schaltungen vorgestellt.

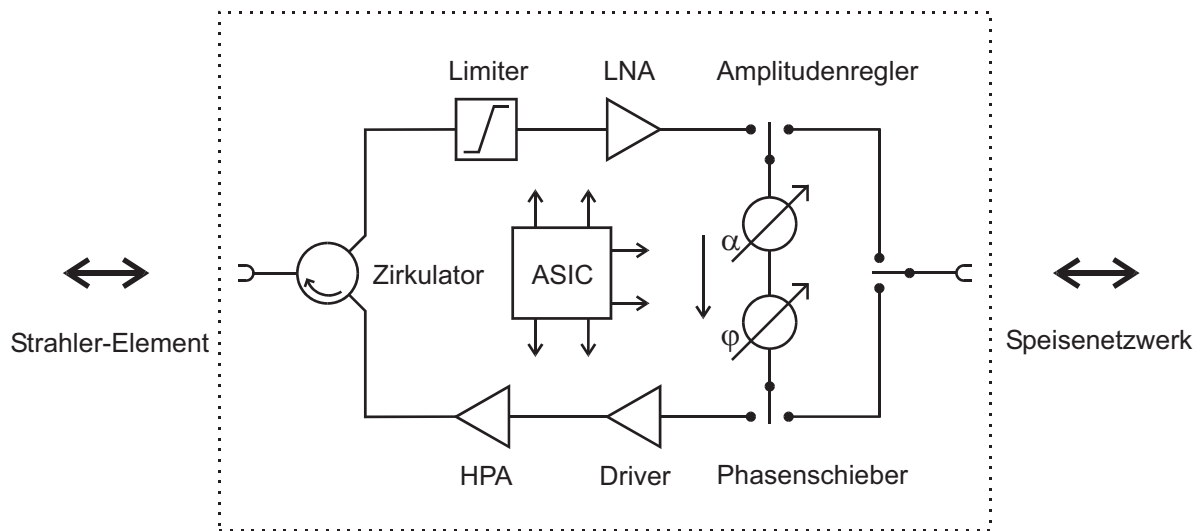


Abbildung 2-1: Blockschaltbild eines S/E-Moduls mit *common leg* [17] Struktur.

Im Empfangsmodus sind die drei HF-Schalter wie in Abbildung 2-2a gestellt. Das vom Strahlerelement empfangene Signal wird über den Zirkulator und den Begrenzer auf einen rauscharmen Vorverstärker geleitet, durchläuft dann den Amplitudenregler und den Phasenschieber und wird schließlich an das Speisernetzwerk weitergeleitet. Die Sendeendstufe und der dazugehörige Treiberverstärker sind im Empfangsmodus ausgeschaltet. Auch der Begrenzer ist in diesem Fall deaktiviert.

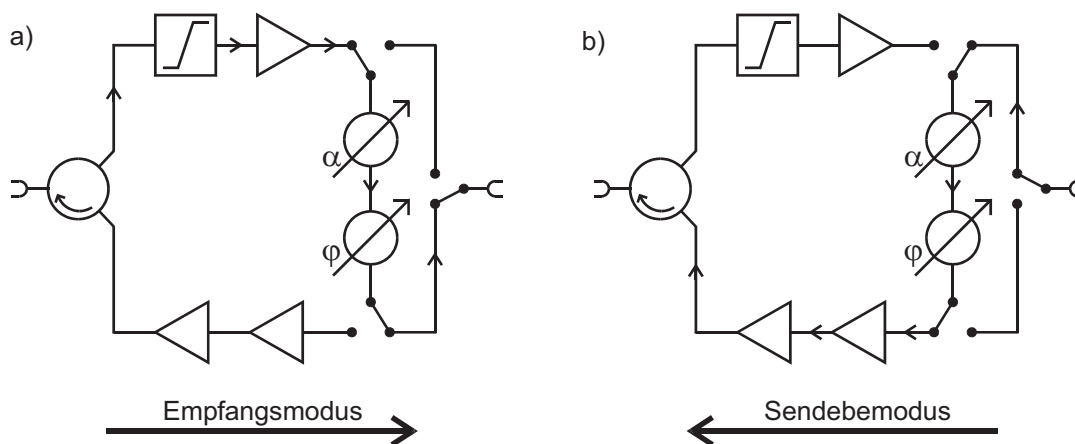


Abbildung 2-2: Stellung der HF-Schalter der S/E-Modulschaltung im Sende- und Empfangsmodus.

Im Sendemodus sind die drei HF-Schalter in die Stellung, wie in Abbildung 2-2b dargestellt, gebracht. Das vom Speisernetzwerk kommende Signal durchläuft wieder den Amplitudenregler und den Phasenschieber, wird dann durch den Treiberverstärker und die Sendeendstufe verstärkt und über den Zirkulator an das Strahlerelement weitergeleitet. Der Begrenzer ist in diesem Modus eingeschaltet und absorbiert zum Schutz des empfindlichen Vorverstärkers die HF-Energie, die aufgrund von Fehlanpassung, Reflexionen oder externer HF-Quellen in den Empfangszweig gelangen.

Der hier als Sende- / Empfangsweiche eingesetzte Zirkulator dient in erster Linie dem Schutz der Sendeendstufe [18]. Sollte durch eine externe Signalquelle, beispielsweise ein anderes Radarsystem, HF-Energie eingestrahlt werden, so wird diese durch den Zirkulator in den Begrenzer geleitet und dort absorbiert. Würde anstatt des Zirkulators ein HF-Schalter verwendet werden (z.B. ein SPDT-Schalter), könnten durch konstruktive Überlagerung der von außen eingestrahlt HF-Energie und der im Verstärker erzeugten HF-Energie hohe Feldstärken auftreten. Die Folge wäre die Zerstörung des Sendeendstufen-MMICs durch Überspannung. Aus diesem Grund kann bis heute in S/E-Modulen für Bordradaranwendungen nicht auf einen Zirkulator verzichtet werden, obwohl dieses Bauteil vergleichsweise groß und teuer ist. Die absorbierende Wirkung dieser Schaltungstechnik verhindert außerdem die Reflexion von Radarsignalen anderer Systeme, die im selben Frequenzband arbeiten und verbessert somit die Tarnbarkeit des Flugzeugs.

Die gesamte Ansteuerung des S/E-Moduls wird durch einen ASIC (application specific integrated circuit) vorgenommen, der im wesentlichen digitale Schieberegister enthält, die die seriell übertragenen Steuersignale in parallele Signale für die einzelnen Chips umwandeln. Auf diese Weise kann die Anzahl von Steuerleitungen für das S/E-Modul auf ein Minimum beschränkt werden. Zusätzlich kann der ASIC Analog- / Digitalwandler enthalten, und durch entsprechende Sensoren eine Rückmeldung über den Betriebszustand des S/E-Moduls (z.B. Sendeleistung, Betriebstemperatur) an das System weiterleiten. Dadurch besteht beispielsweise die Möglichkeit, Fehler in einzelnen Modulen zu erkennen oder eine Temperaturkompensation durchzuführen.

2.2 Technische Anforderungen an S/E-Module im X-Band

Aufgrund ihrer herausragenden Stellung in einem aktiven ESA bestimmen die S/E-Module maßgeblich die Leistungsfähigkeit des Radarsystems und dessen Kosten. Die Herausforderung bei der Konstruktion eines S/E-Moduls besteht darin, gleichzeitig eine möglichst geringe Rauschzahl und eine möglichst hohe Ausgangsleistung bei maximalem Wirkungsgrad bei möglichst geringen Stückkosten zu erzielen [14].

An das S/E-Modul werden in elektrischer, mechanischer und thermischer Hinsicht hohe Anforderungen gestellt. In Tabelle 2-1 sind die wichtigsten technischen Daten, die ein S/E-Modul für Bordradaranwendungen im X-Band aufweisen muß, zusammengefaßt: [19]

Frequenzbereich	X-Band, 10GHz
Bandbreite	20%
Ausgangsleistung	5W...10W
Arbeitszyklus	max. 35%
Pulsbreite	1 μ s...100 μ s
gesamter Wirkungsgrad	>25%
Steuerung Amplitude	20dB, 6 bit- 8bit
Steuerung Phase	0°-360°, 6 bit- 8bit
gesamte Rauschzahl	<5dB
Betriebstemperaturbereich	-40°C...+95°C

Tabelle 2-1: Typische Anforderungen an ein X-Band-S/E-Modul.

A. Elektrische Anforderungen

Zur Steuerung der Phase kommen in der Regel digitale Phasenschieber zum Einsatz, da die Genauigkeit analoger Phasenschieber geringer ist und durch Rauschen auf den Steuerleitungen beeinträchtigt werden kann [14]; gleiches gilt für die Amplitudenregelung. Phasenschieber und Amplitudenregler werden ausschließlich als MMICs auf GaAs-Basis eingesetzt, eine hybride Aufbauweise wäre aus Gründen der Komplexität, Ausbeute, Größe und Kosten nicht möglich. Die Phase muß in einem Bereich von 0°...360° mit mindestens 6bit-Auflösung variiert werden können, was einer Schrittweite von 5,6° entspricht. Für die Amplitude wird ebenfalls eine Auflösung von 6bit und ein Dynamikbereich von 20dB gefordert. Fertigungstoleranzen und Schwankungen in der Produktion können zu Ungenauigkeiten von Phase und Amplitude führen. Dies wirkt sich negativ auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems aus und erhöht die Nebenzipfel im Strahlungsdiagramm des Arrays. Aus diesem Grund werden zwei bis drei zusätzliche Korrekturbits für Phase und Amplitude vorgesehen, um eine Kalibration des Systems vornehmen zu können und Schwankungen in Phase und Amplitude auszugleichen.

Die *Ausgangsleistung* des S/E-Moduls sollte zwischen 5W und 10W betragen. Auch hier kommen momentan MMIC-GaAs-Leistungsverstärker zum Einsatz. Es können auch mehrere Verstärker-MMICs parallel geschaltet werden; aufgrund der Verluste im Kombiniernetzwerk verringert sich hier jedoch der Wirkungsgrad. Deshalb werden üblicherweise nicht mehr als zwei Leistungsverstärker parallel geschaltet [14]. Da es sich bei den ESAs um Pulsradarsysteme handelt, sind die Verstärker im Mittel maximal zu 35% der Zeit aktiv, so daß die Energieversorgung und die Kühlung entsprechend kleiner als im Dauerstrichmodus ausgelegt werden können.

Eine große Bedeutung kommt dem *Gesamtwirkungsgrad* des S/E-Moduls zu [19]. Dieser ist definiert als das Verhältnis zwischen abgegebener HF-Sendeleistung und zugeführter Versorgungsleistung. Dabei wird die Leistung von zugeführten Steuersignalen (Gleichspannung und HF) vernachlässigt. Der Gesamtwirkungsgrad ist größtenteils vom Wirkungsgrad der eingesetzten Leistungsendstufe und den Verlusten der nachgeschalteten Leitungen und Verbindungen sowie dem Zirkulator abhängig. Aber auch die Verlustleistung aller anderer Komponenten, wie z.B. des Digitalteils oder der Phasensteuerung, gehen in den Gesamtwirkungsgrad ein. Ein hoher Gesamtwirkungsgrad reduziert bei gleichbleibender HF-Sendeleistung die abgegebene Verlustleistung. Dies erhöht die Lebensdauer kritischer Bauteile und reduziert Größe, Gewicht und Kosten des Systems, da die Stromversorgung, Leiterquerschnitte und Kühlung kleiner ausgeführt werden können. Hält man dagegen die zulässige Verlustleistung konstant, wird die Leistungsfähigkeit des Systems durch die erhöhte HF-Sendeleistung gesteigert.

Die *Rauschzahl* des S/E-Moduls sollte möglichst klein sein, da sie maßgeblich die gesamte Systemrauschzahl bestimmt. Neben dem verwendeten Empfangsverstärker selbst beeinflussen alle dem Empfangsverstärker vorgeschalteten Komponenten die Rauschzahl stark, insbesondere die Verluste des Begrenzers und des Zirkulators, aber auch die durch Leitungen und Verbindungen verursachten Verluste.

B. Mechanische Anforderungen

In der Regel werden in S/E-Modulen ungehäuste MMICs verbaut, um Platz zu sparen und um bestmögliche elektrische Daten zu erzielen. Folglich muß das Gehäuse aller im S/E-Modul befindlichen Bauteile hermetisch dicht einschließen, um die Bauteile vor Zerstörung durch Korrosion, kondensiertes Wasser oder andere äußere Einflüsse zu schützen.

Im Flugbetrieb treten hohe Beschleunigungen, Vibrationen und Erschütterungen auf. Für Bordradaranwendungen wird eine Stoßfestigkeit von 60g, für Raumfahrtanwendungen von 1500g gefordert. Die Vibrationsfestigkeit muß größer als $0,06g^2 / \text{Hz}$ (10Hz...50Hz) bzw. $0,006g^2 / \text{Hz}$ (50Hz...2000Hz) sein. Alle im S/E-Modul integrierten Bauteile sowie die eingesetzte Aufbau- und Verbindungstechnik müssen diesen Belastungen standhalten können.

Den Abmessungen eines S/E-Moduls werden durch die Theorie der Gruppenantennen eine obere Grenze gesetzt [2,26]. Dazu muß das Abstrahlverhalten des Arrays als Funktion der Anordnung der Elemente betrachtet werden. Das Strahlungsdiagramm einer Antennen-Gruppe ergibt sich aus dem Produkt von Gruppenfaktor und Strahlungsdiagramm der einzel-

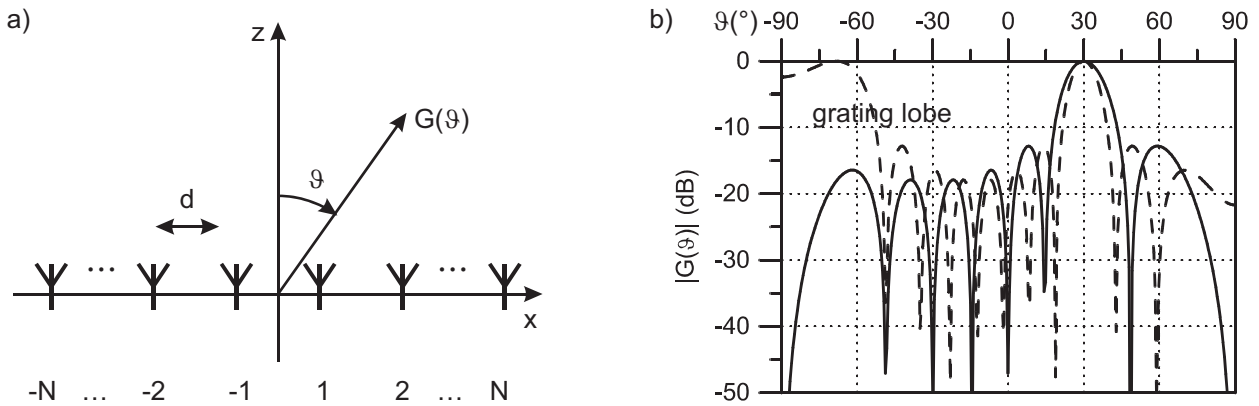


Abbildung 2-3 : a) Anordnung einer Gruppenantenne,
 b) Gruppendiagramm einer Gruppenantenne mit 8 Elementen für $kd = 0.7$ (---) und $kd = 0.5$ (—) bei einem Schwenkwinkel von 30° .

nen Strahlerelemente. Der Gruppenfaktor wird durch die Geometrie der Anordnung und die Ansteuerung der einzelnen Strahlerelemente bestimmt. Der Betrag des Gruppenfaktors G einer symmetrischen Gruppenantenne gemäß Abbildung 2-3a mit $2N$ Strahlern ergibt sich zu:

$$|G(\vartheta)| = \sum_{n=1}^{n=N} I_n \cos \left\{ \frac{2n-1}{2} (kd \sin \vartheta - \alpha) \right\}. \quad (1)$$

Dabei ist I_n die Amplitude, mit der die einzelnen Elemente angesteuert werden (wobei wegen der Symmetrie $I_n = I_{-n}$ gilt), k die Wellenzahl, d der Abstand zwischen zwei Elementen und α eine lineare Phasenprogression zwischen den Elementen, die die Schwenkung der Hauptkeule bewirkt. Die Hauptkeule des Gruppenfaktors liegt dabei beim Winkel ϑ_0 :

$$kd \sin \vartheta_0 = \alpha \quad \text{bzw.} \quad \vartheta_0 = \arcsin \left(\frac{\alpha}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{d} \right). \quad (2)$$

Ist der Abstand der Strahler d im Verhältnis zur Wellenlänge zu groß, so entstehen im Strahlungsdiagramm sogenannte sekundäre Hauptkeulen, die auch als *grating lobes* bezeichnet werden. Dieser Fall tritt ein, wenn:

$$kd \sin(\vartheta' - \alpha) = \pm 2\pi \quad \text{oder} \quad \sin(\vartheta') = \sin(\vartheta_0) \pm \frac{\lambda}{d}. \quad (3)$$

Abbildung 2-3b zeigt beispielhaft die Entstehung von sekundären Hauptkeulen in einem linearen Array mit 8 Elementen für Elementabstände $d = 0,7\lambda$ und $d = 0,5\lambda$. Die Phasenprogression α ist dabei jeweils so gewählt, daß die Hauptkeule auf 30° geschwenkt ist; alle Elemente werden mit gleicher Amplitude angesteuert. Das Auftreten von sekundären Hauptkeulen in einem ESA ist unbedingt zu vermeiden, da sonst die Empfangssignale nicht mehr eindeutig einem Raumbereich zugeordnet werden können bzw. Energie in verschiedene Raumbereiche gesendet wird [8]. Folglich gilt für den Elementabstand in einer linearen Gruppenantenne mit maximalem Schwenkwinkel ϑ_0 die Bedingung [7]: