

# Fortschritte auf dem Millimeterwellengebiet im Bereich 35...90 GHz

Autor(en): **Troost, Albert**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri**

Band (Jahr): **55 (1977)**

Heft 3

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-874122>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Fortschritte auf dem Millimeterwellengebiet im Bereich 35...90 GHz<sup>1</sup>

Albert TROOST, Ulm/Donau (BRD)

538.56.029.65:621.396.029.65:621.396.969.181.4

Zusammenfassung. Nachdem es möglich wurde, in der Halbleitertechnik den Gunn-Effekt zu reproduzieren, konnten bestimmte Wechselbeziehungen zwischen Feldstärke und Elektronenbeweglichkeit zur Schwingungserzeugung im Zentimeter- und Millimeterwellenbereich ausgenutzt werden. Die dadurch bei den Herstellern ausgelöste Aktivität bewog die AEG-Telefunken schon vor Jahren, die Millimeterwellentechnik und ihren Anwendungsbe- reich eingehend zu studieren. Der Artikel erläutert gewisse Forschungsaspekte sowie einige Anwendungsmöglichkeiten. Am Beispiel eines Abstandswarnradars werden die Fragen der Verwirklichung näher untersucht.

## Progrès dans le domaine des ondes millimétriques de la gamme de 35...90 GHz

Résumé. Le fait d'avoir réussi à reproduire l'effet de Gunn dans la technique des semi-conducteurs a permis de mettre à profit certaines relations réciproques entre l'intensité du champ et la mobilité des électrons pour la production d'oscillations dans la gamme des ondes centimétriques et millimétriques. Il y a quelques années déjà, AEG-Telefunken se pencha sur ce problème, dans le dessein d'explorer à fond les possibilités d'application de la technique des ondes millimétriques. L'auteur évoque quelques aspects des recherches et des domaines d'application. A l'aide de l'exemple d'un radar anticollision, les questions que soulève la réalisation sont examinées plus en détail.

## Progressi nel campo delle onde millimetriche nella gamma 35...90 GHz

Riassunto. Dopo esser riusciti a riprodurre l'effetto Gunn nella tecnica dei semiconduttori, è stato possibile sfruttare certe relazioni tra l'intensità di campo e la mobilità degli elettroni per la generazione di oscillazioni nel campo delle onde centimetriche e millimetriche. L'attività provocata da questo fatto ha incitato, già diversi anni or sono, la ditta AEG-Telefunken a studiare in modo approfondito la tecnica delle onde millimetriche e il loro campo d'applicazione. L'autore spiega certi aspetti della ricerca e alcune possibilità d'applicazione. Sull'esempio di un radar d'allerta della distanza, si esaminano dettagliatamente le questioni concernenti la realizzazione.

## 1 Einleitung

Das Millimeterwellengebiet – hier ist der Frequenzbereich von 35...90 GHz gemeint, entsprechend Wellen von 8,5...3,3 mm Länge – hat schon von jeher den Nachrichteningenieur fasziniert. Es waren dies aber mehr die Aspekte, zum Beispiel einer extrem scharfen Wellenbündelung mit nur kleinen Spiegeln oder aber die Praktizierung einer Wellenphysik, die einerseits noch an die ältere, schon klassische Mikrowellentechnik anknüpft, aber doch teilweise schon Betrachtungsweisen aus der Optik zulässt, wie Reflexionen oder Wellenführungen in den Dielektrika.

Über die erste Anwendung von 8-mm-Radargeräten bei der Flugplatzüberwachung wurde schon in den frühen 50er Jahren berichtet. Diese «Radar-Fotos» wirkten aufsehenerregend durch ihre hohe Zielauflösung und Konturenschärfe und täuschten so darüber hinweg, dass einer weiteren Anwendung dieser Millimetertechnik damals noch erhebliche Schwierigkeiten entgegenstanden, wenn man den apparativen Aufwand betrachtete und dabei militärische Anwendungen ausschloss.

Nachdem die Halbleitertechnik jenes 1963 von J.B. Gunn entdeckte Phänomen technisch reproduzieren konnte, in einem winzigen Gallium-Arsenid-Einkristallplättchen bestimmte Wechselbeziehungen zwischen Feldstärke und Elektronenbeweglichkeit zur Schwingungserzeugung im Zentimeter- und Millimeterwellenbereich auszunutzen, setzte eine breite Tätigkeit bei all denen ein, die glaubten, mit diesem neuen Halbleitereffekt alte Wunschträume verwirklichen und damit neue Märkte für Anwendungen im höheren GHz-Bereich finden zu können. Die Idee, Kleinradargeräte in der Verkehrssicherung, zum Beispiel durch Weg- oder Geschwindigkeitsmessungen, einzusetzen, war dabei ebenso beliebt wie die Vorstellung breitbandiger Richtfunkstrecken mit hoher Bündelungsschärfe. Gerade wegen dieser guten Bündelungsfähigkeit der Wellen mit kleinen Antennenspiegeln ist neuerdings auch eine Art passive Radartechnik interessant geworden, die durch das Messen der Rauschtemperaturunterschiede von Gelände-

partien Gegenstände, zum Beispiel Fahrzeuge, aufzeigt. Diese wenigen Anwendungsbeispiele mögen das weite Anwendungsfeld andeuten.

Vor fünf Jahren begann AEG-Telefunken die Millimeterwellentechnik und ihren Anwendungsbereich eingehend zu studieren, nachdem von der Tradition her sowohl auf der Radarseite als auch von der Funksprechtechnik her alle Voraussetzungen gegeben waren. Bemerkenswert war, dass oberhalb etwa 18 GHz nur wenig an Bauelementen auf dem Markt war, und dass die meisten Anbieter von Funktionskomponenten offenbar in erster Linie an den Bedarf von Experimentatoren, das heisst an wissenschaftliche Institute, dachten. So war es wenig aussichtsreich, eine eigene Geräteentwicklung mit einem gezielten Seitenblick auf spätere Marktmöglichkeiten durch ein anfängliches Nachempfinden von Vorhandenem zu beginnen. Der Entwicklungsstart stand daher von vornherein unter dem Gesichtspunkt, technisch praktikable Konstruktionen zu finden, die soweit als möglich jene Vorstellungen in diesen neuen Wellenbändern fortsetzten, die man in bezug auf mechanische Stabilität, Temperaturverhalten und Betriebssicherheit aus den schon klassischen Dezimeter- und Zentimeterwellenbändern kannte. Dabei beschränkte man sich vorerst auf den Frequenzbereich 35 ...90 GHz.

## 2 Von der Theorie in die Praxis

Im folgenden wird auszugsweise darüber berichtet, was neu erarbeitet werden musste, um von bekannten physikalischen Grundlagen zu technisch relevanten und betrieblich brauchbaren Konstruktionen zu kommen. Zunächst einige Betrachtungen über die Ausbreitungsdämpfung der Millimeterwellen in der Atmosphäre. Noch im Zentimeterwellenband wird dabei vorzugsweise an den Regen gedacht, der den Wellendurchlass behindert. In Figur 1 ist über dem Frequenzbereich 30...100 GHz das Dämpfungsmass in dB je km ohne Regendämpfung aufgetragen. Bei 35 GHz (Ka-Band) und bei 90 GHz (E-Band) sind – wenn auch insgesamt ansteigend – Dämpfungsminima, die sogenannten Durchlassfenster, erkennbar. Bei 60 GHz liegt ein markantes Dämpfungsmaximum – die O<sub>2</sub>-Absorption,

<sup>1</sup> Referat, gehalten am 12. Technischen Presse-Colloquium der AEG-Telefunken

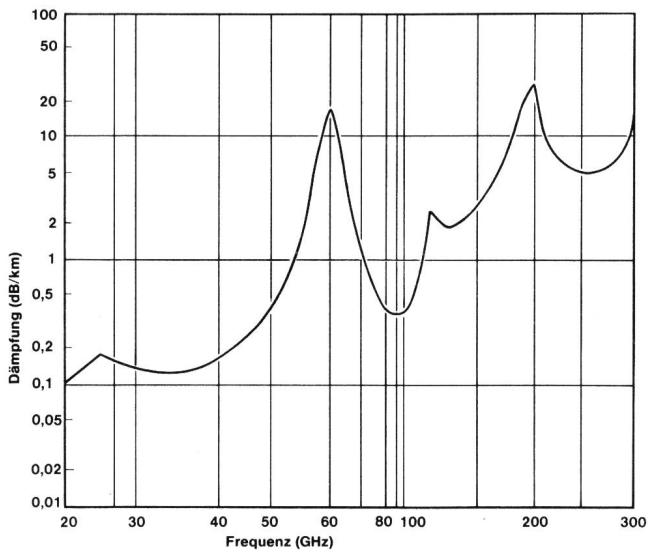


Fig. 1  
Absorptionsdämpfung der Atmosphäre (bei NN)

Die Fensterfrequenzen werden also normalerweise bevorzugt verwendet werden. Die dämpfungsintensiven Bänder könnten dagegen für Aufgaben interessant sein, bei denen verhindert werden soll, dass Streustrahlung oder Antennenebenzipfel bei Punkt-Punkt-Verbindungen seitlich liegende Nachbarn unerwünscht erreicht. Ausserhalb der Erdatmosphäre gibt es keine Absorptionsdämpfung. In der in Entwicklung befindlichen Intersatelliten-Kommunikationstechnik soll daher bei 60 GHz gearbeitet werden, so dass eine terrestrische Störung dieser Nachrichtenverbindung unmöglich wird.

### 3 Neuartige Wellenführung

Eine wichtige Grundsatzfrage ist, wie HF-Wellen bei diesen extremen Frequenzen geführt werden können, zum Beispiel von der Antenne zum Empfänger oder bei Zwischenverbindungen von Komponenten. Auch hier ist die Millimeterwellentechnik mehr als eine miniaturisierte Form der Zentimeterwellen, das heisst bisherige Erkenntnisse können nicht ohne weiteres übertragen werden.

Ein Rechteck-Hohlleiter für den vorwiegend verwendeten  $H_{10}$ -Wellentyp mit 85 GHz, entsprechend 3,5 mm Wellenlänge, misst  $1,5 \times 3$  mm im Querschnitt. Da Hohlleiter und die zugehörige Komponentenfamilie wegen der erforderlichen Oberflächenpräzision teuer sind, scheidet sie für den zivilen Markt aus. Hier ging AEG-Telefunken neue Wege: die Verwendung von Wellenleitern aus der Streifenleiterfamilie – also planare Leiterstrukturen – sowie von dielektrischen Wellenleitern, wie sie für die Lichtleitung durch eine Glasfaser bereits bekannt sind. Solche Wellenleiter in verschiedenster Form zeigt Fig. 2; oben Ausführungen in planarer Technik, unten die dielektrischen Wellenleiter. Die planaren Strukturen führen die Welle vorwiegend zwischen zwei metallischen Leitern. Das können zum Beispiel bei der Streifenleitung (Microstrip) der Bandleiter und das Substrat oder bei der Schlitzleitung die gegenüberliegenden Kanten des Schlitzes sein. Diese Leitungen würden vom Prinzip her auch ohne Dielektrikum funktionieren. Dagegen trägt dieses bei den dielektrischen Leitern wesentlich zur Feldbindung bei. Bei der gezeigten Bildleitung (Image-line) – eine der technisch interessantesten dielektrischen

Wellenführungen – verläuft das elektromagnetische Wellenfeld vorzugsweise im Innern des dielektrischen Materials. Die Metallfläche, auf welcher der dielektrische Streifen aufgeklebt ist, spiegelt das Feldbild. Das Metallsubstrat – die metallische Spiegelfläche – kann sinngemäss als eine Art Kabelmantel betrachtet werden und für Komponentenintegrationen als Montagechassis und damit auch zur Wärmeabfuhr dienen. Während dielektrische Leiter aus verlustarmen Kunststoffen geprägt oder stranggepresst werden können, lassen sich planare Leiterstrukturen fotolithografisch genau reproduzieren und ätzen; beide Verfahren sind sehr fertigungsgerecht.

### 4 Hochempfindlicher Gegentaktmischer

Die Physik und Technologie der Wellenleiter ist heute ein Hauptarbeitsgebiet der Millimeterwellentechnik. Wellenleitertypen können ineinander übergeführt oder miteinander kombiniert werden, das heisst hybrid integriert werden. Die Analyse der Leitungsübertragungseigenschaften und die Synthese von reflexionsarmen breitbandigen Übergängen zwischen verschiedenen Wellenleitertypen erfordern erhebliche theoretische Kenntnisse sowie beachtlichen Programmierstellungsaufwand und Rechnerzeit mit einem Grossrechner. Bei AEG-Telefunken wird auf diesem Gebiet umfassend gearbeitet, zum Teil mit Förderung durch die Bundesministerien für Forschung und Technologie und für Verteidigung. Im übrigen handelt es sich hier um ein Know-how, das nicht von aussen erwartet werden kann.

Am Beispiel eines hochempfindlichen Gegentaktmischers (Fig. 3) wird gezeigt, wie die verschiedenartigsten Wellenleitertechniken und ihre Ausbreitungsmoden verknüpft sind. Der Aufbau ist T-förmig. Von links kommt aus einer Rechteck-Hohlleiterzuführung die Oszillatorleistung (30 GHz). Vom Hohlleitermodus ausgehend, wird die Welle in einen Schlitzleiterzug überführt und verläuft damit zunächst bei A in der Mitte des Rechteckquerschnittes. Dabei hat sich die Richtung des E-Vektors um  $90^\circ$  gedreht. Die Querschnittsdarstellung bei A verdeutlicht dies. Die anschliessende Symmetriezone leitet die Welle in eine Streifenleitung über. Bei C verlässt das Wellenfeld

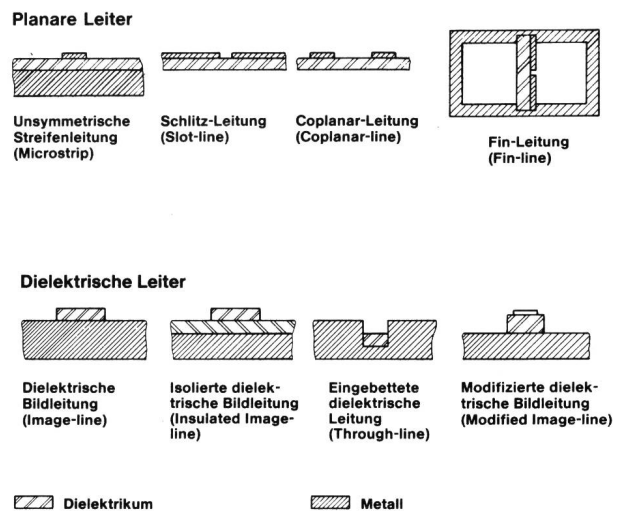
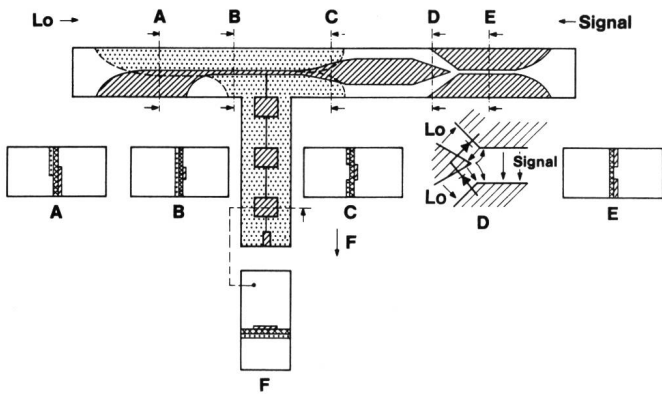


Fig. 2  
Querschnitte verschiedener Wellenleiter für die Millimeter-Wellentechnik



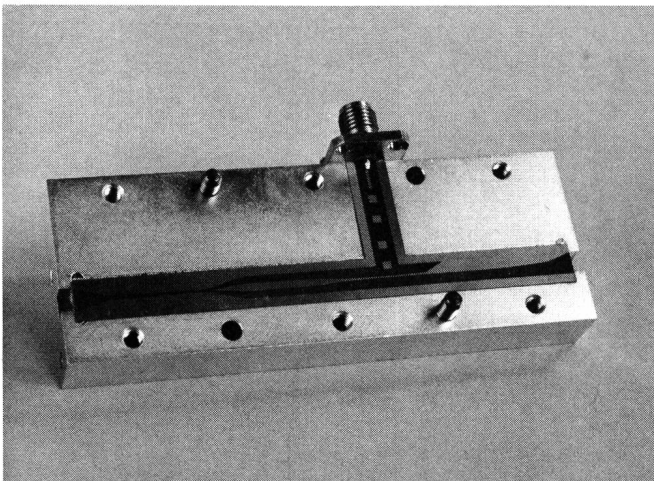
**Fig. 3**  
35-GHz-Gegentaktmischer, Layout der planaren Struktur

schliesslich die Mitte des Rechteckquerschnittes und spaltet sich in zwei Komponenten auf, deren Querschnittsdarstellung in dem Schnitt unter D gezeigt ist.

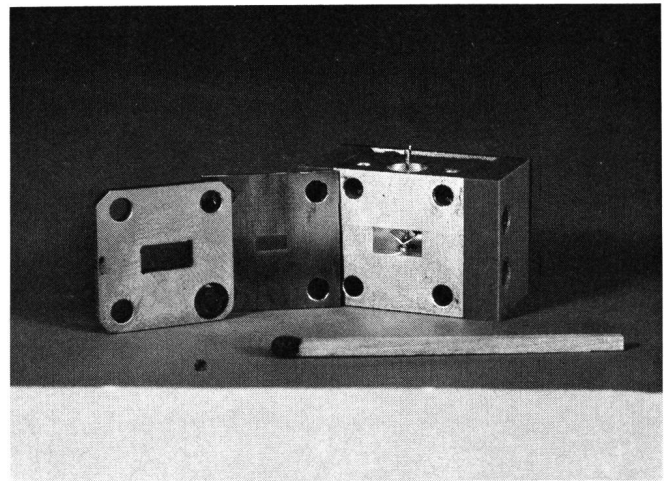
Die Signalquelle auf der rechten Seite des Hohlleiters bei E (vergleiche Querschnitt) wird zunächst auf eine sogenannte fin-line-Struktur überführt, unter Beibehaltung der Richtung des E-Vektors, und schliesslich bei D ebenfalls – aber gleichtaktig – in zwei Feldkomponenten aufgespalten. An dieser Stelle sitzen auch die beiden Dioden. Am Punkt F schliesslich wird die Zwischenfrequenz (hier 2..7 GHz) ausgekoppelt und über eine Filteranordnung – ein typisches Streifenleitungsfilter ohne Oszillatoranteile – entnommen. *Figur 4* zeigt in einem Aufblick die planare Leiterstruktur des nach obiger Beschreibung ausgeführten Mischers und vermittelt so eine Vorstellung von seiner Form und Grösse. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass die bisherigen Kenntnisse über Koaxial- oder Hohlleiternetzwerke für die Anwendung im Millimeterwellenbereich nicht ausreichen und besonders die Beherrschung von Feldmodenwechseln ganz wesentlich ist.

## 5 Abstandswarnradar

Ein weiteres Beispiel ist ein 35-GHz-Gunn-Oszillator für ein Impulsradargerät zur Abstandsmessung und Hinderniswarnung für Last- und Personenwagen im Strassenverkehr. Mikrowellentechnisch gibt es hier ein Problem: Die



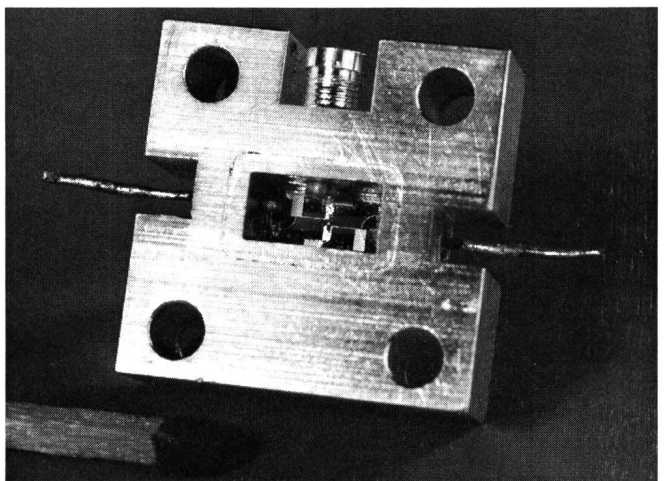
**Fig. 4**  
35-GHz-Gegentaktmischer. Der geöffnete Bauteil zeigt die planare Struktur des im Abstandswarnradar verwendeten Bauteils



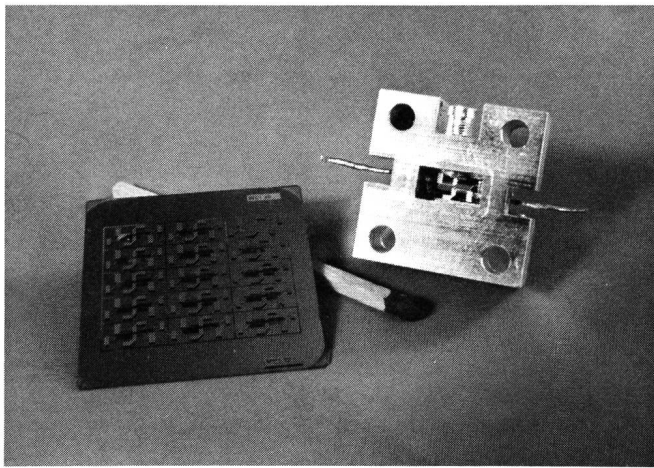
**Fig. 5**  
35-GHz-Oszillator des von AEG-Telefunken zusammen mit der Robert Bosch GmbH entwickelten Abstandswarnradars (0,25 W Dauerstrich, 1 W Pulsbetrieb)

Quelle des Senders – die Gunn-Diode – stellt einen 2-Pol mit sehr niedrigem Quellenwiderstand dar (2...5 Ohm). Dieser muss an den Feldwellenwiderstand des Hohlraumresonators angepasst werden, um maximale Schwingleistung auskoppeln zu können. Gleichzeitig ist die Wärmeabfuhr der Verlustleistung der Diode sicherzustellen. In dem zur Anschauung geöffneten Resonator (*Fig. 5*) hat die Dioden-Kathode direkten mechanischen und thermischen Kontakt mit dem Resonatorblock, während die Anode über einen kleinen abgewinkelten Strahler in den Hohlraum hineinragt. Seine Länge, Winkelstellung und der Ort seiner Einkopplung sind kritische Dimensionierungsgrössen. Es ist darauf zu achten, dass nur ein eindeutig definierter und kein parasitärer Wellenmode erregt wird, was ganz wesentlich zur Frequenzstabilität des Oszillators beiträgt. Die hier vorliegende, recht einfach erscheinende Konstruktion trägt diesem Rechnung. Die Leistungsauskopplung an die Antenne geschieht wie üblich über Fensterblenden.

Im Mischteil dieses Autoradarempfängers braucht keine Wärme abgeführt zu werden. Daher wurden andere Lösungen erarbeitet, um die Mischdiode an den Empfangsresonator anzupassen. Eine davon zeigt *Figur 6*. Streifenleitungstechnik und Hohlleitertechnik werden hier kombiniert. Auf einer dünnen Quarzscheibe ist die aufgedampfte Lei-



**Fig. 6**  
35-GHz-Empfänger/Mischer für Dauerstrich- und Pulssysteme, für das Abstandswarnradar entwickelt

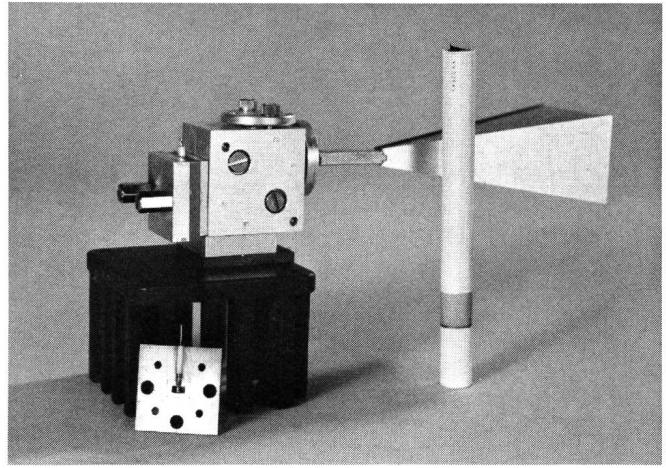


**Fig. 7**  
**35-GHz-Empfänger/Mischer. Vorne links: Quarzsubstrat mit 15 Mischereinsätzen für Serienherstellung**

tungsstruktur zu sehen. In der Mitte der S-förmigen symmetrischen Leitungsgeometrie ist die beam-lead-Mischdiode eingebondet. Das Quarzscheibchen wird dann in den Hohlraumresonator eingesetzt und passt über die Streifenleitungsstruktur die Diode an die Empfangsantenne an. Die dünnen horizontalen Leiterstreifen führen der Diode den Gleichstrom zu und nehmen gleichzeitig die Zwischenfrequenz ab, wobei sie im Zusammenwirken mit den kleinen Metallflächen ein Spulen-Kondensator-ZF-Filter bilden. Die planare Leiterstruktur erlaubt eine Herstellung als Mehrfach-Layout, was die Herstellungskosten senkt (Fig. 7).

## 6 Temperaturstabilisierung

Frequenzbestimmende Komponenten, wie Oszillatoren im Sende- und Empfangsteil, werden temperaturstabilisiert. Das geschieht durch Zwischenschalten von Wärmebarrieren zwischen dem Oszillatorblock und den übrigen Apparateteilen, wie etwa Antenne. Solche thermischen Isolatoren sind zum Beispiel schmale, scheibenförmige Hohlleiterprofile aus metallbedampftem Isoliermaterial (Fig. 8). So lassen sich mit Bruchteilen von Watt über eine Regelschaltung die Oszillator- und Mischblöcke stets auf gleicher Temperatur halten. Die erzielbaren Frequenzstabilitäten sind erstaunlich gut und erreichen Werte von  $10^{-5}$ ... $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ . Ge-

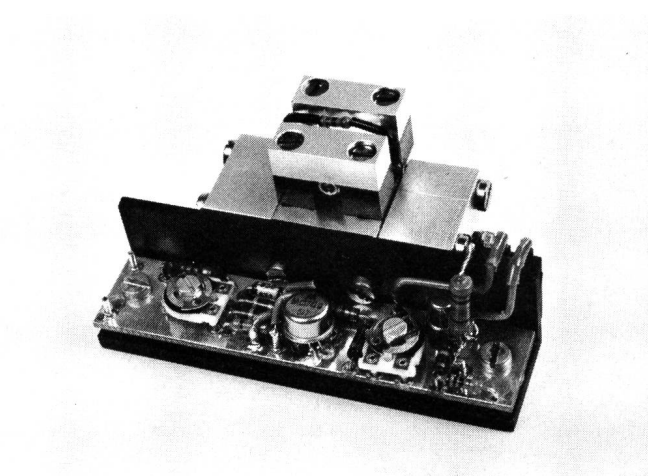


**Fig. 9**  
**86-GHz-Radarmodul**

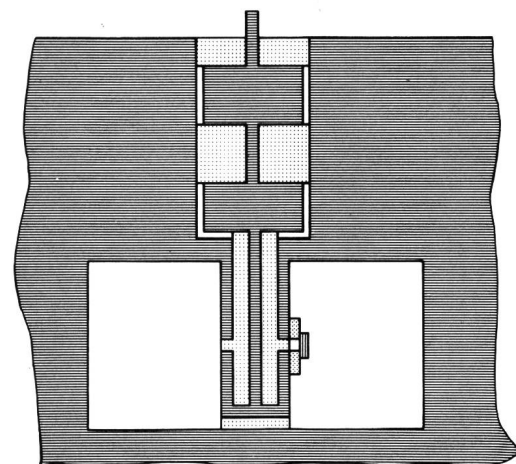
rade beim Auto-Abstandsradar müssen besondere elektronische und mechanische Stabilitätsforderungen erfüllt werden, da hier Umweltbedingungen vorliegen, für die im vergleichbaren militärischen Bereich höchste Spezifikationen vorgeschrieben sind.

## 7 Empfangsmischer für 80-GHz-Bereich

Bei einem Empfangsmischer für den 80-GHz-Bereich (Fig. 9) ist der Resonator – wieder ein Hohlraum – auf die Abmessungen  $1,5 \times 3 \times 3$  mm zusammengeschrumpft. Das Empfangssignal und die Leistung des Oszillators werden in der hier gezeigten Darstellung senkrecht zur Bildschnittebene eingekoppelt. Die Aufgabe besteht wieder darin, an die nur 0,1 mm grosse Mischdiode sowohl die volle Empfangsleistung der Antenne als auch die Oszillatorspannung anzukoppeln, ohne dass jedoch Anteile davon in den ZF-Leiterzug überkoppeln. Das erscheint zunächst trivial, ist es aber nicht, weil bei diesen sehr kleinen Geometrien und den extrem hohen Frequenzen ein definiertes Verhalten von Sperrfiltern schwierig zu verwirklichen ist. Aus diesem Grunde wurde hier zusätzlich die Koaxialtechnik herangezogen, weil sich Leitungsfiter damit noch am übersichtlichsten dimensionieren lassen. Die Schnittdarstellung des Mixers (Fig. 10) zeigt, dass die Mischdiode an den in Querrichtung halbierten Aussenleitern eines



**Fig. 8**  
**35-GHz-Empfangsmodul mit Temperatur-Regelschaltung**



**Fig. 10**  
**Empfangsmischer für den 80-GHz-Bereich**

Koaxialleiterstückchens liegt, während der Innenleiter wie ein koaxiales Sperrfilter die Empfangsfrequenz in Richtung ZF-Auskopplung sperrt.

Der hier skizzierte verlustbehaftete Mischer arbeitet als Abwärtsmischer, das heisst er transponiert die Empfangsspannung auf niedrige Frequenzen und ist damit das Kernstück eines Empfängers im 80-GHz-Bereich. Eine Variante des koaxialen Teiles dieses Mixers für das 60-GHz-Gebiet wurde als parametrischer Aufwärtsmischer weiterentwickelt. Die Stelle der Mischdiode nimmt eine Varaktordiode ein, wobei die von der Pumpquelle zugeführte Leistung überwiegend als Verlustleistung wieder abgeführt werden muss. Dieser Aufwärtsmischer ist das Entwicklungsergebnis eines Studienauftrages aus der deutschen Raumfahrtforschung und ist als 4/64-GHz-Transponder für eine kommende Intersatellitenkommunikation gedacht.

## 8 Neuartige Technologie entwickeln

Nicht nur Kenntnisse der verschiedensten Wellenleitungsführungen oder das «Gewusst wie» in der Nutzung der recht eigenwilligen Halbleiter machen einen fortschrittlichen Entwicklungsstatus auf dem Millimeterwellengebiet aus – auch viel Technologie gehört dazu. Das betrifft unter anderem das Metallbeschichten dielektrischer Materialien mit präzisen Leiterstrukturen – nicht nur auf Flächen, sondern auch auf Körpern –, das Beherrschen der verschiedenartigsten Ätztechniken und schliesslich das definierte Abtragen von Material mit Hilfe des Lasers für den Betriebsabgleich von Oszillatoren und Filtern. Gerade in die Entwicklung der zum Teil neuartigen Technologien wurde in letzter Zeit stark investiert.

## 9 Anwendungen in der Praxis

Das Abstands-Warnradar ist das Ergebnis einer mehrjährigen Studie, die gemeinsam mit dem Hause *Bosch* durchgeführt wurde. AEG-Telefunken übernahm die Radarentwicklung, also den eigentlichen Sensor, *Bosch* die Auswertung der Radar-Rohsignale und die Darstellung der Information für den Fahrer. Dieses «Autoradar» ist vor allem im Schnellverkehr nützlich, wenn voranfahrende Fahrzeuge durch plötzliches Vermindern ihrer Geschwindigkeit die Gefahr eines Auffahrens heraufbeschwören. Gleichermassen warnt das Gerät auch vor stehenden Fahrzeugen oder Hindernissen. In diesen Fällen wird ein Warnton ausgelöst. Das geschieht durch einen kleinen Prozessrechner, der aus der Kenntnis der gemessenen Geschwindigkeit des voranfahrenden und des eigenen Fahrzeugs sowie unter Berücksichtigung des ebenfalls gemessenen jeweiligen Abstandes einen «kritischen Gefahrenabstand» errechnet. Dies ist eine Weggrösse, bei der bei einer betriebsüblichen Bremsverzögerung des eigenen Fahrzeuges die Gefahr eines Auffahrunfalls bestehen könnte. In der Auswerteeinrichtung wurden Vorkehrungen getroffen, nicht relevante Hindernisse – etwa Blendschutzeinrichtungen in Kurven usw. – zu eliminieren. Die Strahlbündelung der Radarantenne mit rund 2° bedeutet im Ortungsfeld ein Ausblen-

den von Brücken, Baken usw., so dass nur äusserst selten Fehlalarm gegeben werden wird.

Es wurden auch bereits Versuche gemacht, dieses «Autoradar» im Rangierdienst der Deutschen Bundesbahn einzusetzen. Um den Rangierdienst auf den Verschiebebahnhöfen automatisieren zu können, werden für die nach einem vorgesehenen Betriebsprogramm ferngesteuerte Rangierlokomotive genaue Daten über ihre Geschwindigkeit und ihren Abstand zu dem zu verschiebenden Güterwagen benötigt. Bei den Versuchen erwies es sich als vorteilhaft, dass zur Installation der kleinen, batteriebetriebenen Radargeräte nichts ausser einem Anhängen oder Anklemmen an einer geeigneten Stelle der Lokomotive nötig ist.

Ein weiteres Radargerät dient dazu, auf Bundesbahnlokomotiven genaue Informationen über die Fahrgeschwindigkeit zu gewinnen, um daraus durch Integration beziehungsweise Differentiation den zurückgelegten Weg oder die Beschleunigung des Zuges zu errechnen. Die Deutsche Bundesbahn strebt für die Zukunft einen Ausbau des Fahrbetriebs auf Teilautomatisierung an. Um eine vorgegebene Fahrstrategie einhalten zu können, ist aber die genaue Kenntnis dieser Betriebsdaten notwendig. Wegen des erheblichen Schlupfes war es bisher nicht möglich, sie tachometrisch über die Laufräder zu erhalten. Bisherige Messergebnisse mit dem neuen, nach dem Dopplerprinzip arbeitenden Radargerät waren sehr zufriedenstellend. Selbst bei bis zu 100 km gefahrenem Weg wurden Messgenauigkeiten von etwa 0,2 Promille erreicht.

Mit einem weiteren recht handlichen Radargerät – fast ein Taschengerät – können Geschwindigkeiten bewegter Gegenstände, beispielsweise von Autos, gemessen werden. Dabei ist nicht nur an die Radarkontrolle gedacht. Es lassen sich mit diesem Gerät auch Verkehrsflussanalysen, Ampelsteuerungen usw. durchführen. Zudem kann die Geschwindigkeit eines Fördergutes gemessen werden, das sich nur sehr langsam bewegt.

Ein Modellaufbau einer 80-GHz-Richtfunkstrecke besteht aus einem Sender mit Impatt-Oszillator und Modulationszusatz, der über eine Parabolantenne abstrahlt. Das Signal erreicht über eine kurze Freiraumübertragung eine dielektrische Kugel, die den Strahl gebündelt auf einen Empfangsparabolspiegel umleitet. Von diesem verläuft die HF-Energie über eine dielektrische Leitung – Image-line – auf einen Empfangsdetektor, über den das modulierte Signal dann abgehört werden kann.

Die Anwendungsbeispiele dürften dargestellt haben, dass die Millimeterwellentechnik einen technischen Stand erreicht hat, der mit Zuversicht vielseitige Anwendungen im künftigen technischen Alltag verspricht – zum Nutzen der öffentlichen Gesellschaft.

*Adresse des Autors:* Dir. Dipl.-Ing. Albert Troost, Leiter der Vorentwicklung im Fachbereich Hochfrequenztechnik, AEG-Telefunken, D-7900 Ulm/Donau (BRD)