

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 78 (1987)

**Heft:** 3

**Artikel:** Anwendung und Entwicklung von Millimeterwellenempfängern

**Autor:** Gyger, R. / Künzi, K. F.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-903812>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 03.02.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Anwendung und Entwicklung von Millimeterwellenempfängern

R. Gyger, K.F. Künzi

*Die Millimeterwellen gewinnen heute zusehends an Bedeutung. Aus diesem Grunde sollen in diesem Aufsatz der heutige Entwicklungsstand von Millimeterwellenempfängern und einige ihrer Anwendungen dargestellt werden. Etwas näher wird dabei auf den subharmonisch gepumpten Mischer eingegangen, so wie er an der Universität Bern in verschiedenen Forschungsgebieten (Radioastronomie, Atmosphärenphysik und Fernerkundung) im Einsatz steht.*

*Les ondes millimétriques jouent, de nos jours, un rôle de plus en plus important. Pour cette raison, les derniers développements concernant les récepteurs hyperfréquences et quelques-unes de leurs applications sont présentées dans ce papier. On s'intéressera plus précisément aux mélangeurs sous-harmoniques et la manière dont ils sont employées à l'université de Berne dans différents projets de recherches tels que la radioastronomie, la physique atmosphérique et la télédétection.*

Der Aufsatz entspricht dem Fachreferat von Dr. K.F. Künzi am Fall Meeting MTT+AP Chapter vom 19. November 1986.

## Adresse der Autoren

Dipl. Phys. R. Gyger und Dr. K.F. Künzi, Institut für angewandte Physik, Universität, 3012 Bern.

## 1. Einleitung

Die Millimeterwellen liegen im elektromagnetischen Spektrum zwischen den Mikrowellen und dem Gebiet des fernen Infrarots. In Frequenzen ausgedrückt bedeutet dies 30...300 GHz, entsprechend dem Wellenlängenbereich 10...1 mm. Analog dazu spricht man im Bereich über 300 GHz von Submillimeterwellen. Eine wichtige Eigenschaft der Millimeterwellen ist ihre, durch Nebel oder Wolken nur wenig gehinderte Ausbreitung in der Atmosphäre. Dies wird denn auch in nachrichtentechnischen und militärischen Anwendungen ausgenützt. Die Figur 1 zeigt die Absorption auf Meereshöhe in Abhängigkeit von der Frequenz. Die deutlich erhöhte Absorption bei 60, 120 und 180 GHz ist auf die Wechselwirkung mit atmosphärischen Molekülen zurückzuführen, auf welche im Abschnitt über wissenschaftliche Anwendungen noch näher eingegangen werden soll.

Was den technischen Aufbau von Millimeterwellen-Empfängern betrifft, muss beachtet werden, dass Millimeterwellen wegen der zu hohen Dämpfung nicht mehr in Kabeln geführt werden können, sondern Hohlleiter benötigen, deren mechanische Abmessungen in der Grössenordnung der halben Wellenlänge liegen.

## 2. Anwendungen

Es können drei Hauptanwendungsgebiete für Millimeterwellen unterschieden werden:

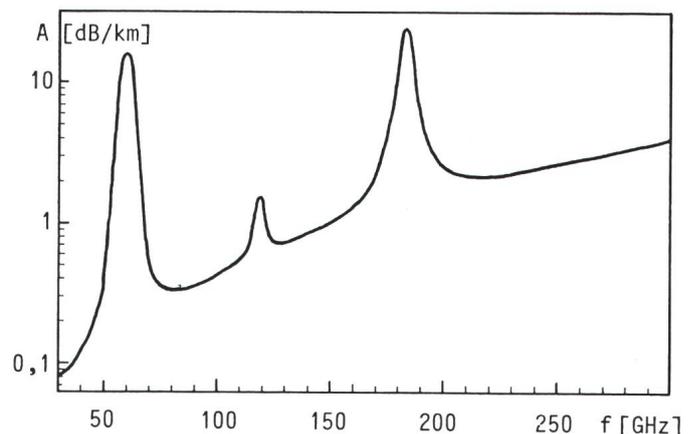
### 2.1 Einsatz in der Telekommunikation

Durch die starke Belegung der Frequenzbänder im Bereich bis 10 GHz ist es sehr wünschenswert, höhere Frequenzgebiete zu erschliessen. Heute wird bereits bei der Daten- und Nachrichtenübertragung von und zu Satelliten von den Millimeterwellen Gebrauch gemacht (30-GHz-Band), wobei der Vorteil genutzt wird, dass die Antennen im Vergleich zu Systemen grösserer Wellenlängen bei gleichem Gewinn verkleinert werden können. Dies ist für Anwendungen in der Raumfahrt und bei der Realisierung von Richtfunknetzen von grosser Bedeutung. So beträgt zum Beispiel der Antennenöffnungswinkel bei einer Antenne von 12 cm Durchmesser und einer Frequenz von 94 GHz nur ungefähr 1,8 Grad. Für bestimmte Anwendungen, wie zum Beispiel Übertragungen im PCM-Verfahren (Pulse Code Modulation), ist es auch nötig, grosse Bandbreiten zur Verfügung zu haben. Durch die erwähnte starke Ausnutzung der niederen Frequenzbänder können diese Bandbreiten wohl nur im Millimeterwellenbereich beansprucht werden.

### 2.2 Wissenschaftliche Anwendungen

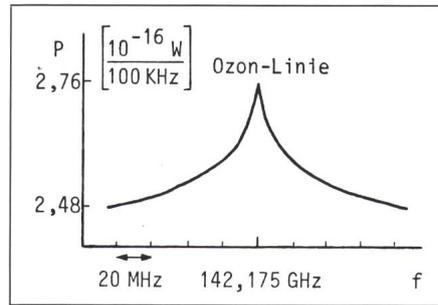
Wie in Figur 1 bereits gezeigt, weist die atmosphärische Dämpfung ungefähr bei 50 GHz, 118 GHz und 183 GHz Maximalwerte auf, die durch Ro-

Figur 1  
Atmosphärische Absorption A auf Meereshöhe für den Millimeterwellenbereich  
A Absorption  
f Frequenz



tationsübergänge<sup>1</sup> atmosphärischer Moleküle verursacht werden. Die Stärke und die Form der Absorptionslinien hängt dabei von der Menge des betroffenen Moleküls, der Temperatur und dem Druck ab; so ist für die Absorption bei 53 GHz und 118 GHz vor allem der Sauerstoff (O<sub>2</sub>) verantwortlich, während die Absorption bei 183 GHz dem Wasserdampf (H<sub>2</sub>O) zuzuschreiben ist. Jedoch nicht nur diese häufigen Moleküle weisen solche Übergänge auf, sondern noch eine sehr grosse Anzahl anderer atmosphärischer Bestandteile, wie z.B. Ozon und Kohlenmonoxyd. Durch ihre niedere Dichte sind aber diese Absorptionslinien sehr schwach und können in der Darstellung der Figur 1 graphisch nicht aufgelöst werden. Nach dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz muss ein absorbierendes Medium (in diesem Fall die Lufthülle) auch eine der Absorption entsprechende Emission aufweisen. Diese Emission ist im Millimeterwellenbereich proportional zur Temperatur des Mediums. Mit sehr empfindlichen Millimeterwellenempfängern (Spektrometer) gelingt es, diese schwache thermische Strahlung zu messen. Aus der spektralen Verteilung dieser Strahlung können nun wichtige Parameter, wie z.B. die Zusammensetzung der Atmosphäre und das Höhenprofil der Temperatur bestimmt werden. Diese Messgeräte werden bereits operationell auf den Tiros-Wettersatelliten zur Bestimmung der Temperatur in der Tropo- und Stratosphäre und des Wassergehalts der Troposphäre verwendet. Ähnliche Sensoren sollen auch auf der nächsten Generation europäischer Wettersatelliten (Meteosat) eingesetzt werden.

Eine weitere wissenschaftliche Anwendung, die vor allem in letzter Zeit im Zusammenhang mit dem Umweltschutz enorm an Bedeutung gewonnen hat, ist die Messung der Höhenverteilung atmosphärischer Bestandteile in der Strato- und Mesosphäre (20...80 km), hier gezeigt am Beispiel Ozon (O<sub>3</sub>). Bei 142 GHz weist das Ozon-Molekül einen der erwähnten Rotationsübergänge auf, dessen Strahlung mittels eines Spektrometers gemessen werden kann. Die Figur 2 zeigt das Leistungsspektrum einer Ozon-Linie. Durch eine komplexe mathematische Rechnung (Inversion einer Fredholm'schen Integralgleichung) ist es nun möglich, ein Höhenprofil der Ozonverteilung zu errechnen. Das der Figur 2 entsprechende Profil mit einem Maximum in der Höhe von 32 km ist in Figur 3 dargestellt. Die Einheit ppm (parts per million) bedeutet in diesem

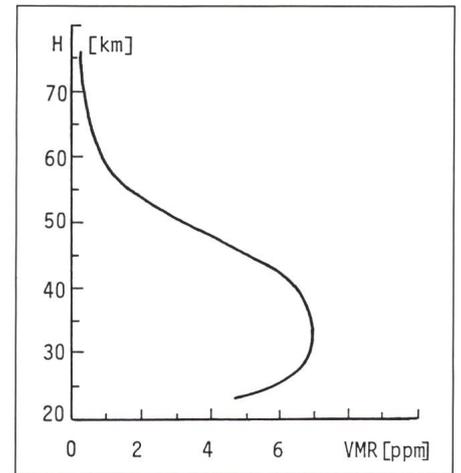


Figur 2 Leistungsspektrum einer Ozon-Emissionslinie

Zusammenhang: 1 Ozonteilchen auf eine Million Luftteilchen.

Ein weiteres wichtiges wissenschaftliches Gebiet, in dem mit Millimeterwellen gearbeitet wird, ist die Fernerkundung (Remote Sensing) der Erdoberfläche. Dabei können durch spektrometrische Messungen vom Flugzeug oder Satelliten aus diverse Aussagen über Vegetation und sonstige Beschaffenheit des Erdbodens (wie z.B. Feuchtigkeit oder Schneebedeckung) gemacht werden. Die Figur 4 zeigt eine Darstellung der Schneebedeckung in der nördlichen Hemisphäre. Dieses Bild wurde durch die Auswertung der Mikrowellenradiometerdaten des Nimbus-7-Satelliten auf einem interaktiven Bildanalyseprogramm gewonnen.

Eine sehr wichtige Anwendung der Millimeterwellen ist auch in der Radioastronomie zu finden, wo diese Geräte die Messung der chemischen Zusammensetzung des interstellaren Raumes erlauben, oder wie in unserem Institut, der Untersuchung der Sonnenatmosphäre dienen.



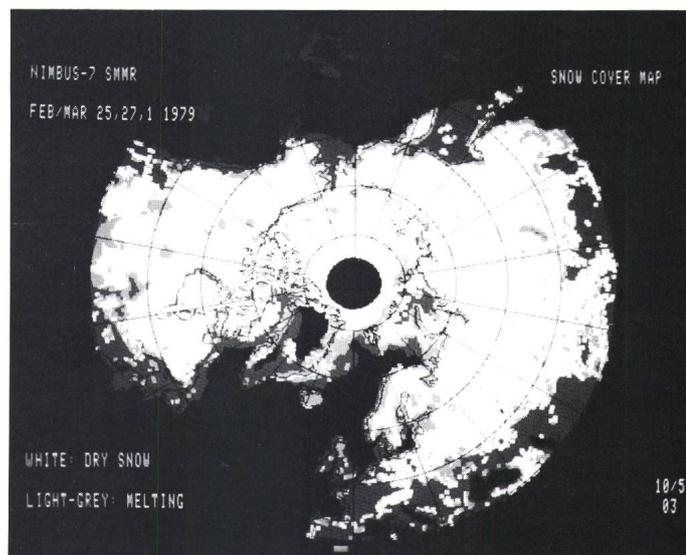
Figur 3 Ozon-Höhenprofil

bestimmt aus der in Figur 2 dargestellten Ozonlinie

H Höhe  
VMR Volumenmischungsverhältnis  
(Volume Mixing Ratio)

### 2.3 Militärische Anwendungen

Obwohl dies sicherlich das grösste (vom finanziellen Aufwand her) Anwendungsgebiet darstellt, können nur ungenaue Angaben über den Stand der Forschung und Entwicklung gemacht werden, da naturgemäss nur sehr wenig Information an die Öffentlichkeit dringt. Von grossem Interesse sind Millimeterwellen für den militärischen Funkverkehr, da sie praktisch stör- und abhörsichere Verbindungen erlauben. Durch die reduzierten Antennenabmessungen bei kleinem Antennenöffnungswinkel und grossem Gewinn wird der operationelle Einsatz solcher



Figur 4 Schneebedeckung in der nördlichen Hemisphäre

Erkennbar sind als feine schwarze Linien die Kontinente sowie die Längen- und Breitengrade. Schwarze Flächen sind offene Ozeane (kein Eis) oder fehlende Daten (kreisrunder Bereich in der Region des Nordpols). Weiss dargestellt ist die schneebedeckte Fläche über Land oder mehrjähriges Eis über dem Ozean. Hellgrau sind Gebiete mit schmelzendem Schnee oder Eis, und in Dunkelgrau sind Flächen ohne Schnee (Land) oder neues Eis (Ozean) erkennbar. Für dieses Bild wurden die Daten des Scanning Multichannel Microwave Sensor (SMMR) auf dem Forschungssatelliten Nimbus-7 der NASA verwendet.

<sup>1</sup> Übergänge zwischen Zuständen unterschiedlicher Rotationsenergie bei einfachen oder komplexen Molekülen.

Systeme auch unter sehr beschränkten Platzverhältnissen möglich. Ein Beispiel, das auch zivile Anwendungen finden könnte, wurde kürzlich in Deutschland vorgestellt, ein kleines Radar für die Hinderniserkennung bei Helikopterflügen, wobei das Hauptaugenmerk auf der Warnung vor Seilbahnanlagen und Hochspannungsleitungen liegt [1].

## 3. Empfänger

### 3.1 Physikalische Grundlagen

Die Stärke der Signale, mit denen in den eben erwähnten Anwendungsgebieten gearbeitet wird, ist ausgesprochen gering. So entspricht die Amplitude der gezeigten Ozon-Linie bei 142 GHz einer Leistung von etwa  $3 \cdot 10^{-17}$  W bei einer Frequenzauflösung von 100 kHz. Um solche schwachen Signale überhaupt weiter verarbeiten zu können, benötigt man sehr rauscharme Verstärker. Mit der heutigen Technologie können jedoch rauscharme Verstärker nur bis ungefähr 30 GHz realisiert werden; somit ist man gezwungen, Frequenzkonversionsmethoden mit Abwärtsmischern (Heterodyne Receiver) anzuwenden. Dabei wird das Millimetersignal in einem Mischer (nichtlineares Element) mit einem Lokaloszillatorsignal überlagert und so eine niederfrequente Zwischenfrequenz (ZF) erzeugt. Diese ZF ist ein vollständiges Abbild des Eingangssignals in einem tieferen Frequenzbereich und kann jetzt wesentlich einfacher weiter verarbeitet werden.

Eine Grenze bei der Detektion schwacher Signale ist das Eigenrauschen des Empfängers. Die für dieses Rauschen verantwortlichen Komponenten sind dabei in erster Linie der Mischer und der erste Zwischenfrequenzverstärker. Alle weiteren Verstärker und eventuell vorhandenen Mischer sind für das Systemrauschen vernachlässigbar.

### 3.2 Mischer

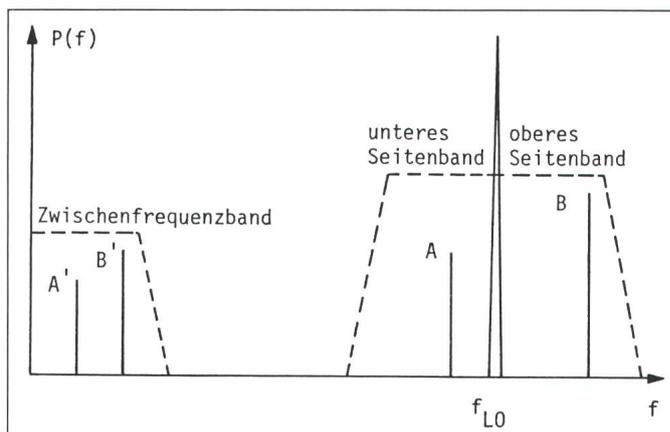
Das wichtigste Element eines Millimeterwellenempfängers ist, wie bereits erwähnt, der Mischer. Eine ausführliche, grundlegende Behandlung dieser Komponenten findet sich in der Arbeit von Schneider [2]. Die Mischer können in zwei Gruppen unterteilt werden: In die Fundamentalmischer und in die harmonischen Mischer.

Bei den *Fundamentalmischern* gilt der folgende Frequenzzusammenhang

$$f_{ZF} = f_{SIG} - f_{LO} \quad (1)$$

**Figur 5**  
Lage der bei einem Mischer auftretenden Frequenzen

$f_{LO}$  Lokaloszillatordfrequenz



Das heisst die Zwischenfrequenz ist die Differenz zwischen Signalfrequenz und Lokaloszillatordfrequenz. Aus dem Spektraldiagramm der Figur 5 geht hervor, dass zwischen einem unteren und einem oberen Seitenband unterschieden werden muss. Befinden sich nämlich in beiden Seitenbändern Signale (z.B. A und B), so kann später im Zwischenfrequenzband nicht festgestellt werden, welches von den beiden Signalen A' und B' aus dem oberen und welches aus dem unteren Seitenband des Mischers stammt. Daraus ist ersichtlich, dass es zwei Signalfrequenzen gibt, welche die gleiche Zwischenfrequenz erzeugen. Will man diesen Effekt ausschalten, so muss man den HF-Eingang des Mischers auf das richtige Seitenband abstimmen können (Selektive Abstimmung auf eine Frequenz), d.h. einen sogenannten Einseitenbandbetrieb des Mischers erreichen. Das Hauptproblem bei den Fundamentalmischern ist die nahe bei der Signalfrequenz liegende Lokaloszillatordfrequenz; diese verlangt einen sehr hochfrequenten Lokaloszillator. Nun ist es aber sehr schwierig für Frequenzen höher als 100 GHz Halbleiteroszillatoren mit genügender Leistung zu bauen, weshalb man auf teure Röhren (Klystrons) mit kurzer Lebensdauer angewiesen ist.

Im Gegensatz dazu wird bei *harmonischen Mischern* die Signalfrequenz mit der  $n$ -ten harmonischen einer Lokaloszillatordfrequenz gemischt.

Ein spezieller Typ dieses Mischers, der sogenannte subharmonisch gepumpte Mischer ist in der Arbeit von Carlson und Schneider [3] diskutiert worden. Für die Zwischenfrequenzen gilt

$$f_{ZF} = f_{SIG} - n f_{LO} \quad (n = \text{gerade}) \quad (2)$$

Die vorhin gemachten Aussagen über die Seitenbänder behalten ihre volle Gültigkeit.

Der subharmonisch gepumpte Mischer soll an dieser Stelle etwas näher

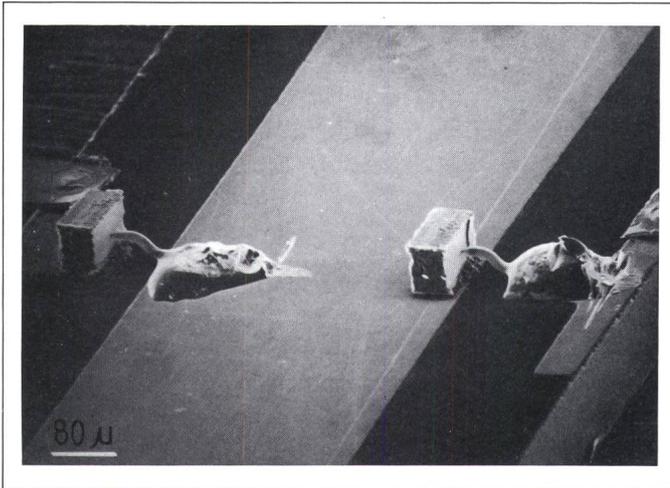
erörtert werden. Während im Fundamentalmischer eine einzelne Diode als nicht lineares Element für den Mischprozess verantwortlich ist, tritt an deren Stelle im subharmonischen Mischer ein antiparallel geschaltetes Diodenpaar. Diese Dioden werden auf eine sogenannte «Suspended Stripline» montiert, welche auch die Filter zur Trennung der Signal-, Lokaloszillator- und ZF-Frequenz enthält. Die Montage der Mischerdioden und das Kontaktieren durch einen Whisker (dünner Kontaktierdraht), stellt wohl die schwierigste Arbeit bei der Mischerherstellung dar. Die Figur 6 zeigt eine elektronenmikroskopische Aufnahme der Stripline mit zwei kontaktierten Dioden. Dadurch, dass die mechanischen Dimensionen mit zunehmender Frequenz abnehmen, ist dieser Mischertechnologie gegenwärtig bei etwa 270 GHz eine Grenze gesetzt. Ein fertiger Mischer für 180 GHz wird in der Figur 7 dargestellt: Dabei sind der ZF-Ausgang und die direkt am Mischerblock montierte Hornantenne zu erkennen. Mittels dreier Mikrometerschrauben kann zudem der Mischer auf das eine oder andere Seitenband abgestimmt werden und eine optimale Anpassung für den Lokaloszillator erreicht werden. Der Hohlleiter oberhalb der Antenne dient der Zuführung des Lokaloszillatorsignals.

### 3.3 Verstärker

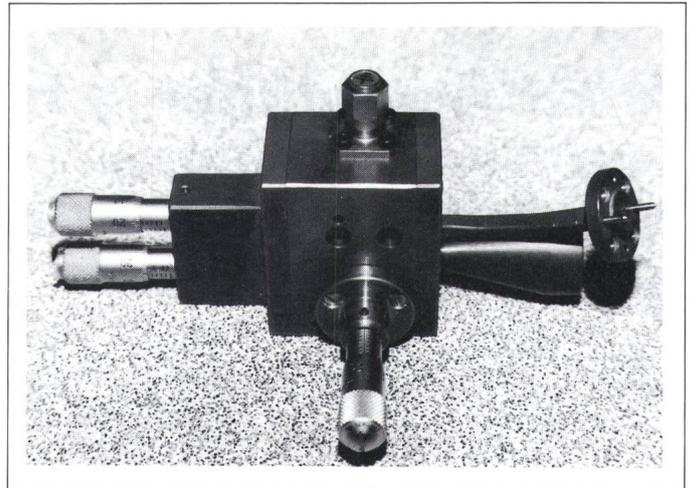
Die Qualität eines Millimeterwellenempfängers hängt einerseits vom Rauschen und dem Konversionsverlust des Mischers ab und andererseits in starkem Masse auch vom Rauschen des ersten Vorverstärkers. Dies zeigt sich an dem Zusammenhang

$$T_{SYS} = T_{MIX} + L \cdot T_{ZF}$$

Dabei steht  $L$  für den Konversionsverlust des Mischers, während  $T_{SYS}$ ,



Figur 6 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines kontaktierten Diodenpaares

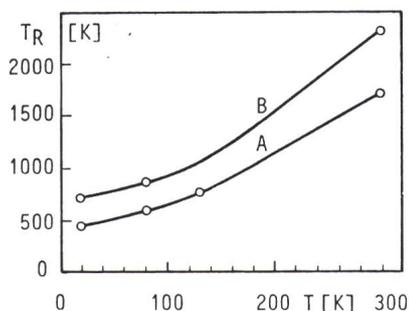


Figur 7 Fertig montierter 180-GHz-Mischer mit Hornantenne

$T_{MIX}$  und  $T_{IF}$  die Rauschtemperaturen des Systems, des Mixers und der Zwischenfrequenzverstärker bedeuten. Für die üblicherweise verwendeten ZF-Frequenzen im Bereich 1...10 GHz dienen heute fast ausschliesslich rauscharme Feldeffekttransistoren (FET) mit Bandbreiten bis zu 1 GHz als Verstärkerelemente.

### 3.4 Kühlung von Mischer und Verstärker

Der nächste Schritt zur Verbesserung der Empfindlichkeit von Millimeterwellenempfängern ist die Abkühlung des Mixers und des ersten Vorverstärkers auf sehr tiefen Temperaturen. Aus der Theorie ist bekannt, dass das Rauschen einer Komponente proportional zu ihrer physikalischen Temperatur abnimmt. Für Anwendungen, bei denen ein besonders rauscharmer Empfänger benötigt wird, werden die

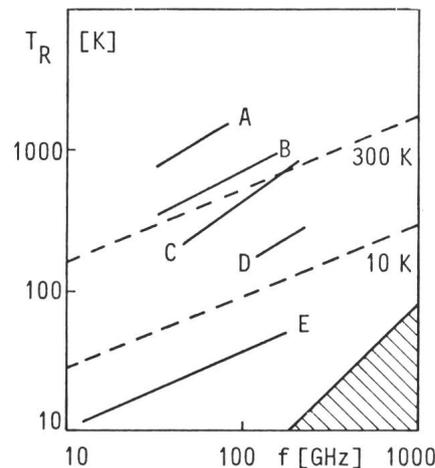


Figur 8 Rauschtemperatur eines Radiometersystems bei verschiedenen physikalischen Temperaturen

Kurve A zeigt den Mischer allein, während in Kurve B das Rauschen des gesamten Systems einschliesslich des Beitrags des ersten ZF-Verstärkers dargestellt ist.

$T_R$  Rauschtemperatur  
 $T$  Physikalische Temperatur

Mischer und Vorverstärker auf Temperaturen von 80 oder 20 K abgekühlt (etwa  $-190\text{ °C}$  bzw.  $-250\text{ °C}$ ). Ein Beispiel zeigt die Figur 8 für ein Radiometersystems bei 204 GHz im gekühlten und ungekühlten Zustand [4]. Man erkennt, dass für physikalische Temperaturen, die mehr als 100 K betragen, die Rauschtemperatur proportional zur physikalischen Temperatur abnimmt. Für noch tiefere Temperaturen werden nicht thermische Rauschmechanismen wesentlich, und das Rauschen wird nur noch wenig verkleinert.



Figur 9 Einseitenband-Systemrauschteperaturen von Millimeterwellenempfängern

A, B Kommerziell erhältliche Systeme von Hughes und Millitech (USA-Firmen).  
 C, D Die im Institut für angewandte Physik, Bern, erreichten Daten für Raumtemperatur und gekühlte Empfänger.

Die mit 300 K bzw. 10 K bezeichneten Graden sind typische Werte für Raumtemperatur-Empfänger bzw. die besten Daten für im Labor gebauten gekühlten Systeme. Mit E bezeichnet sind Daten von supraleitenden Empfängern mit Josephson- oder SIS-Detektoren. Das schraffierte Gebiet zeigt die durch die Quantisierung gegebene theoretische Grenze an.

## 4. Zusammenfassung und Ausblick

Den gegenwärtigen Stand der Millimeterwellen-Empfängertechnologie zeigt die Figur 9. Kommerziell erhältliche Empfänger und die besten heute in Laboratorien gebauten Empfänger sind dargestellt, ebenfalls eingetragen sind die von uns gebauten subharmonischen Mischer.

Verlässliche Aussagen über die Weiterverbreitung der Millimeterwellenanwendungen sind äusserst schwierig zu machen. Es darf jedoch angenommen werden, dass die Entwicklung auch auf diesem Gebiet nicht haltmacht. Wichtige Einsatzgebiete sind:

- in der Nachrichtentechnik die Ausnutzung höherer Frequenzen (Satellitenfernsehen, Funktelefonie)
- für die wissenschaftlichen Messungen die Auswertung sehr schwacher atmosphärischer Linien,
- in der Radartechnik der Bau kleinerer Geräte mit guter Winkelauflösung.

Längerfristig gesehen wird die Entwicklung wohl in das Gebiet der Submillimeterwellen vorstossen; dort sind allerdings ganz neue Technologien zu erarbeiten.

### Literatur

- [1] Redaktion «Mikrowellen-Magazin»: «Mikrowellen-Sensoren in der Wehrtechnik der Zukunft», Mikrowellen-Magazin Vol. 10, 1/1984.
- [2] M.V. Schneider: «Metal-Semiconductor Junction as Frequency Converters», Infrared and millimeter waves, K.J. Button Editor, Vol. 6 Academic Press, 1982.
- [3] E.R. Carlson, M.V. Schneider and T.F. McMaster: «Subharmonically pumped millimeter-wave Mixers», IEEE, Trans. MTT-26, 10, Oct. 78.
- [4] B. Schären: «Gekühlte Mischer im mm-Wellen-Bereich», Diplomarbeit, Institut für angewandte Physik, Universität Bern, 83.