

# Kleinheubacher Berichte

Band 37

Vorträge und Berichte der gemeinsamen Tagung des  
U.R.S.I.-Landesausschusses in der Bundesrepublik  
Deutschland und der ITG-Fachausschüsse

1.1 Informations- und Systemtheorie,  
2.5 Wellenausbreitung,  
5.4 System- und Schaltungstechnik und  
5.5 Integrierte Elektronik

Kleinheubach 1993

1994

Deutsche Bundespost Telekom · Forschungs- und Technologiezentrum  
Postfach 10 00 03 · 64276 Darmstadt

ISSN 0343-5725

 Tele·k·o·m

# Dünnschicht-Bolometer für die Millimeterwellen-Leistungsmessung

von

Dieter Janik, Dieter May und Thomas Weimann  
 Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
 Postfach 33 45  
 38023 Braunschweig

## Zusammenfassung

Zur genauen Leistungsmessung durch Rückführung der Meßgröße HF-Leistung auf Gleichstrom-Meßgrößen werden Bolometer als thermische Detektoren im gesamten Hochfrequenzbereich bis in den Millimeterwellenbereich eingesetzt. Im Millimeterwellenbereich können mit Dünnschicht-Bolometern aus dünnen Metallfilmen Bolometermeßköpfe realisiert werden, die geringere Hochfrequenzverluste haben und besser angepaßt sind als kommerziell erhältliche Bolometer-Meßköpfe mit Thermistoren. In der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt wurde mit der Entwicklung dieser Dünnschicht-Bolometer aus Nickel- und Bismutfilmen auf dünnen Kaptonfolien begonnen. Erste Meßergebnisse von Versuchsmustern in speziellen Meßköpfen bestätigen bei 35 GHz und 94 GHz die erwarteten geringen Verluste von wenigen Prozent. An Hand von Meßergebnissen, die mit Dünnschicht-Bolometern verschiedener Form gewonnen wurden, werden Wege zur Optimierung der Empfindlichkeit und der Anpassung diskutiert.

## Abstract

For precise power measurements tracing back the measuring quantity RF power to DC quantities bolometers are used as thermal detectors in the whole RF frequency range up to millimeter wavelengths. At millimeter wavelengths bolometer mounts can be realised with thin-film bolometers which have smaller losses and which are better matched than commercial bolometer mounts containing thermistors. The development of thin-film bolometers made of nickel and bismuth on Kapton foil has been started at PTB. Preliminary measurement results obtained with special mounts for frequencies at 35 GHz and 94 GHz have confirmed the expected small losses of a few percent. On the basis of measurement results obtained with thin-film bolometers of different shapes, ways of optimizing the responsivity and the match of the thin-film bolometer mounts are discussed.

## 1. Einleitung

Bolometer sind temperaturabhängige Widerstände, die gleichzeitig als Leistungsabsorber und Widerstandsthermometer dienen. Meßköpfe mit diesen thermischen Detektoren sind nach Kalibrierung in einem Mikrokalorimeter die Hochfrequenz-(HF)-Leistungsnormale mit den kleinstmöglichen Meßunsicherheiten im gesamten HF-Frequenzbereich bis zum Millimeterwellenbereich.

Mittels eines Gleichspannungs-Vorstromes wird ein definierter Bolometerwiderstand eingestellt und bei Leistungsabsorption die Widerstandsänderung in eine Spannungsänderung umgewandelt. Als Zweig einer geeigneten Gleichstrom-Brückenschaltung kann der Bolometerwiderstand durch Ändern des Brückenstromes konstant gehalten werden. Die Differenz der Gleichstromleistungen im Bolometer vor und nach Leistungseinstrahlung, die Substitutions-Gleichstromleistung, entspricht der im Bolometerelement absorbierten HF-Leistung.

Für Bolometer-Meßköpfe ist das Verhältnis aus der Substitutions-Gleichstromleistung  $P_0$  und der im Meßkopf absorbierten HF-Leistung  $P_{HF}$  die

charakteristische Kenngröße, die als effektiver Wirkungsgrad  $e_{eff} = P_o/P_{HF}$  bezeichnet wird und durch eine kalorimetrische Messung bestimmt wird. Aus der während der Gleichstromsubstitution in einem Mikrokalorimeter gemessenen Erwärmung des Meßkopfes und  $P_o$  läßt sich mit geringen Meßunsicherheiten der effektive Wirkungsgrad berechnen [1]. In der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) stehen für diese Messungen Mikrokalorimeter für verschiedene Koaxialleitersysteme bis 18 GHz und Hohlleiterbänder bis 40 GHz sowie für Frequenzen um 94 GHz zur Verfügung.

## 2. Bolometer-Meßköpfe im Millimeterwellenbereich

Für die Kalibrierung als HF-Leistungsnormale in Mikrokalorimetern können kommerziell erhältliche Bolometer-Meßköpfe mit Thermistoren bis in den Millimeterwellenbereich verwendet werden. Diese Thermistor-Meßköpfe zeichnen sich durch eine hohe Empfindlichkeit von etwa 200 V/W aus. Mit steigender Frequenz allerdings nimmt bei Millimeterwellen der effektive Wirkungsgrad ab und die Leistungsreflexionen am Eingang der Meßköpfe werden größer. Z.B. werden mit Hohlleitermeßköpfen im Band R 320 (26,5 GHz bis 40 GHz) Wirkungsgrade von etwa 94 % und im Band R 900 (75 GHz bis 110 GHz) Werte von etwa 83 % erreicht. Entsprechend steigen die Beträge der Reflexionsfaktoren von etwa 0,2 im Band R 320 auf 0,2 bis 0,3 im Band R 900. Die Verschlechterung der Eigenschaften führt bei der HF-Leistungsmessung im Millimeterwellenbereich zu höheren Meßunsicherheiten.

In zwei Staatsinstituten wurde begonnen, unter Anwendung der Dünnschichttechnik verbesserte Hohlleiter-Bolometermeßköpfe mit einem Metallfilm als Bolometer-element (Barretter) zu entwickeln [2,3,4]. Dünnschicht-Bolometer bestehen aus sehr dünnen Nickelstreifen, die auf dünne Kunststoffolien aufgedampft oder gesputtert werden. Sie werden in einem Meßkopf im Abstand von einem Viertel der Hohlleiter-Wellenlänge vor einer Kurzschlußplatte in der Hohlleitermitte parallel zur Richtung der elektrischen Feldstärke angeordnet. Die erreichten Wirkungsgrade in den Hohlleiterbändern R 320 und R 900 lagen um 99 %, und die Beträge der Reflexionsfaktoren konnten in einem Teilbereich des Hohlleiterbandes auf Werte  $< 0,2$  verringert werden. Allerdings ist die Empfindlichkeit dieser Barretter mit etwa 10 V/W wesentlich geringer als die der Thermistoren.

## 3. Dünnschicht-Bolometer-Entwicklung in der PTB

Um im Millimeterwellenbereich Bolometermeßköpfe mit kleinstmöglichen Meßunsicherheiten zur Verfügung zu haben, wurde in der PTB mit der Entwicklung von Dünnschicht-Bolometern und Meßköpfen begonnen. Die besondere Zielsetzung bestand dabei in der Verbesserung der Empfindlichkeit sowie in der Vergrößerung des Frequenzbereichs guter Anpassung der bisher bekannten Dünnschicht-Bolometer.

Es kann gezeigt werden [5], daß für die Empfindlichkeit  $S$  eines Dünnschicht-Bolometers nach Erreichen des thermischen Gleichgewichts folgende Beziehung gilt:

$$S = dU/P_{HF} = I_b \cdot R_b \cdot \alpha \cdot R_w \quad (1)$$

darin sind  $dU$  die Gleichspannungs-Änderung am Bolometer,  $P_{HF}$  die absorbierte Leistung,  $I_b$  der Bolometer-Vorstrom,  $R_b$  der Bolometerwiderstand,  $\alpha$  der relative Temperaturkoeffizient des Bolometermaterials und  $R_w$  der Wärmeableitwiderstand des Bolometers. Nimmt man an, daß die Gleichleistung  $P_b = I_b^2 \cdot R_b$  über einen Maximalwert  $P_{b,max}$  nicht gesteigert werden kann, da das Bolometer sonst überhitzt wird, wird aus (1):

$$S = \sqrt{P_{b,max}} \cdot \sqrt{R_b} \cdot \alpha \cdot R_w \quad (2)$$

Der Wärmeableitwiderstand  $R_w$  ist durch die Wahl einer dünnen Folie als Substrat für das Bolometer schon weitgehend optimiert. Als Bolometermaterial sind Metalle für die Herstellung zeitlich stabiler Widerstände sehr geeignet, dabei wird Nickel wegen der guten Haftung auf Kunststoff bevorzugt. Da für die meisten Metalle  $\alpha$  etwa gleich groß (etwa 0,003) ist, soll im folgenden versucht werden, durch eine Vergrößerung des Bolometerwiderstandes sowie des Wärmeableitwiderstandes (durch Verändern der Struktur) die Empfindlichkeit von Dünnschicht-Bolometern für Hohlleiter zu steigern. Die HF-Impedanzmeßmöglichkeiten sind in der PTB zur Zeit noch auf Frequenzen bis 40 GHz beschränkt, deshalb wurden Dünnschicht-Bolometer vor allem für das Hohlleiterband R 320 entwickelt und untersucht.

#### 4. Verbesserung der Empfindlichkeit und der Anpassung von Dünnschicht-Bolometern

Bolometer für Hohlleitersysteme einschließlich der Dünnschicht-Bolometer wurden bisher bei einem Bolometer-Gleichstromwiderstand  $R_b=200 \Omega$  betrieben. Bei einer Änderung von  $R_b$  zur Empfindlichkeitssteigerung muß beachtet werden, daß die Reflexionsfaktoren der Bolometer-Meßköpfe möglichst klein bleiben. D.h., daß gute Anpassung des Bolometerelements an den Wellenwiderstand des Hohlleiters erhalten bleibt. Das elektrische Ersatzschaltbild des Dünnschicht-Bolometers ist eine Reihenschaltung aus dem Wirkwiderstand  $R_b$ , der gleich dem Gleichstromwiderstand ist, und der Induktivität  $L_b$  des Streifens [6]. Die Anordnung des Bolometers - als Ersatzschaltbild - im Meßkopf ist in Bild 1 im Prinzip dargestellt. Zur Kompensation der Streifeninduktivität  $L_b$  wurde in [3] eine Hohlleiterblende (Bild 5.6) mit der Kapazität  $C_c$  vorgeschlagen.

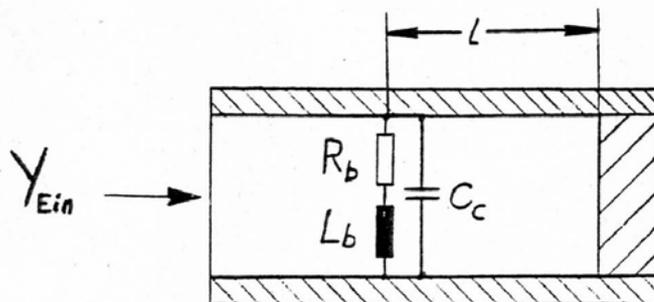


Bild 1: Prinzip des Bolometermeßkopfes mit Dünnschicht-Bolometer und Kompensationskapazität ( $C_c$ ) als Ersatzschaltbild

$R_b$ : Bolometerwiderstand,  $L_b$ : Bolometerinduktivität,  $Y_{Ein}$ :Eingangsadmittanz,  $l$ : Abstand zwischen Bolometer und Hohlleiterkurzschluß

Für die Eingangs-Admittanz  $Y_{Ein}$  des Bolometer-Meßkopfes ergibt sich unter Berücksichtigung des Hohlleiter-Kurzschlusses im Abstand  $l$  zu:

$$Y_{Ein} = \frac{R_b}{R_b^2 + (\omega L_b)^2} - j \frac{\omega L_b}{R_b^2 + (\omega L_b)^2} + j\omega C_c - jY_{H1} \cdot \cot(\beta l) \quad (3)$$

Diese Eingangs-Admittanz  $Y_{Ein}$  muß an den Hohlleiter-Wellenleitwert  $Y_{H1} = Y_0 \cdot (\lambda_0 / \lambda_{H1}) \cdot a/2b$  angepaßt werden. Dabei ist  $Y_0$  ist der Freifeldleitwert ( $1/Y_0 = 377 \Omega$ ),  $\lambda_0$  die Freifeldwellenlänge,  $\lambda_{H1}$  die Hohlleiter-Wellenlänge und  $a$  und  $b$  die Hohlleiter-Innenquerabmessungen. Der Hohlleiter-Wellenwiderstand  $Z_{H1} = 1/Y_{H1}$  sinkt mit wachsender Frequenz und liegt für genormte Hohlleiter

zwischen etwa  $600 \Omega$  und  $450 \Omega$ . Die Anpassbedingung ist erfüllt, wenn:

1.  $C_c$  und die Kurzschlußlänge  $l$  so gewählt werden, daß sich die Blindanteile in Gl. 3 aufheben, und
2.  $R_b$  so gewählt wird, daß bei gegebenem  $L_b$  der Wirkanteil von  $Y_{Ein}$

$$G_{Ein} = R_b / (R_b^2 + (\omega L_b)^2) = Y_{H1} \quad (4)$$

wird. Der Blindwiderstand  $\omega L_b$  der Dünnschicht-Bolometer beträgt für alle Hohlleiterbänder in Bandmitte etwa  $250 \Omega$  - dem entspricht im untersuchten Frequenzbereich eine Induktivität von etwa  $1 \text{ nH}$  -, daher kann mit einem Bolometerwiderstand  $R_b = 200 \Omega$  hier Anpassung erzielt werden. Größere Bolometerwiderstände  $R_b$  können gemäß Gl. 4 nur angepaßt werden, wenn die Bolometerinduktivität kleiner ist. Wird sie gegenüber  $R_b$  vernachlässigbar, ist der größtmögliche Wert für den Bolometerwiderstand  $R_b = Z_{H1}$  erreicht. Eine Auswertung der Gl. 3 für verschiedene Widerstände  $R_b$  und Induktivitäten  $L_b$  eines für die Mittenfrequenz  $35 \text{ GHz}$  angepaßten Bolometers ist in Bild 2 dargestellt. Aufgetragen wurde der berechnete Betrag des Reflexionsfaktors  $|\Gamma|$

$$|\Gamma| = \left| \frac{Y_{H1} - Y_{Ein}}{Y_{H1} + Y_{Ein}} \right| \quad (5)$$

als Funktion der Frequenz zwischen  $26,5 \text{ GHz}$  und  $40 \text{ GHz}$ . Die Kurzschlußlänge  $l$  entspricht einem Viertel der Hohlleiter-Wellenlänge bei  $35 \text{ GHz}$ , und die Werte für  $R_b$ ,  $L_b$ ,  $C_c$  wurden für Anpassung bei  $35 \text{ GHz}$  gewählt.

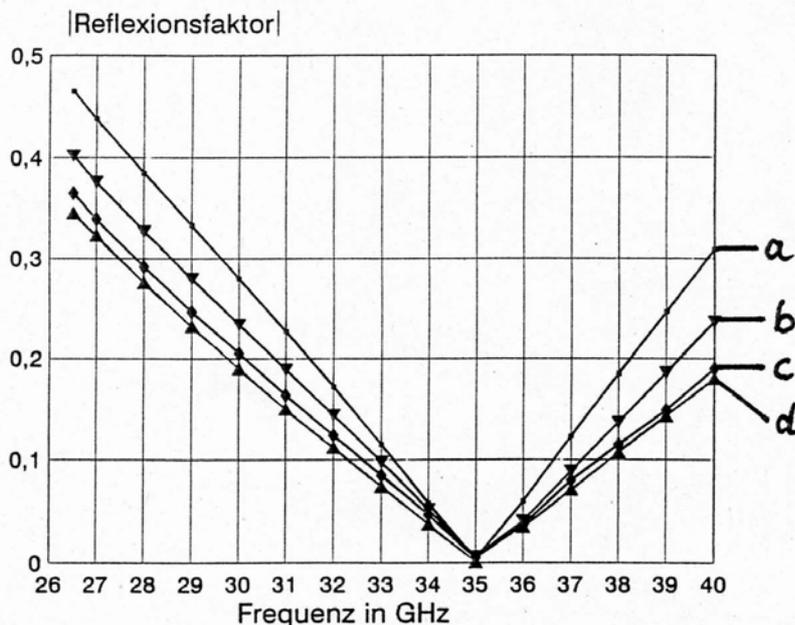


Bild 2: Berechneter Betrag des Reflexionsfaktors eines Streifenbolometers für verschiedene Werte seiner Impedanz

a:  $R_b = 200 \Omega$  und  $L_b = 1,1 \text{ nH}$ , b:  $R_b = 300 \Omega$  und  $L_b = 1,0 \text{ nH}$   
 c:  $R_b = 400 \Omega$  und  $L_b = 0,7 \text{ nH}$ , d:  $R_b = 470 \Omega$  und  $L_b = 0$

Die Kurve a mit  $R_b = 200 \Omega$  und  $L_b = 1,1 \text{ nH}$  gilt für die bekannten Streifen-Bolometer. Mit kleineren Bolometer-Induktivitäten ( Kurven b,c,d) lassen sich auch größere Bolometerwiderstände anpassen. Die Bandbreite der Anpassung steigt sogar mit wachsendem  $R_b$  bzw. sinkendem  $L_b$  und erreicht ihr Optimum für  $L_b = 0$  bzw.  $R_b = Z_{H1} = 470 \Omega$ . Z. B. wächst die Bandbreite für  $|\Gamma| \leq 0,2$  von etwa  $6 \text{ GHz}$  bei  $R_b = 200 \Omega$  (Kurve a) auf über  $10 \text{ GHz}$  bei  $R_b = Z_{H1} = 470 \Omega$  (Kurve d).

Eine Vergrößerung von  $R_b$  über  $200 \Omega$  hinaus, die für angepaßte Bolometer nur mit gleichzeitiger Verringerung der Bolometerinduktivität  $L_b$  möglich ist, führt also neben einer Vergrößerung der Empfindlichkeit außerdem zu einer wesentlichen Verbesserung der Bandbreite guter vorgegebener Anpassung. Daß auch für das ideale Bolometer ( $R_b = Z_{H1}$ ) ohne Induktivität der Reflexionsfaktor frequenzabhängig bleibt (Kurve d), ist auf den Kurzschluß zurückzuführen, da  $l$  nur für eine Frequenz optimal eingestellt werden kann.

## 5. Ergebnisse

### 5.1. Meßköpfe

Es wurden zunächst Dünnschicht-Bolometer der bekannten Bauart bestehend aus einem einfachen Streifen mit einem Bolometerwiderstand von  $R_b = 200 \Omega$  für die Hohlleiterbänder R 320 und R 900 hergestellt. Zur Messung des effektiven Wirkungsgrades in den Mikrokalorimetern der PTB wurde je ein Bolometer-Meßkopf als Prototyp für die Mittenfrequenzen 35 GHz und 94 GHz des jeweiligen Bandes entwickelt, sie sind in den Bildern 3 und 4 mit eingebauten Streifenbolometern abgebildet. Die Bolometerstreifen sind etwa 0,6 mm bzw. 0,2 mm breit, ihre Längen sind den jeweiligen inneren Hohlleiterhöhen von 3,5 mm bzw. 1,3 mm angepaßt. Die großen Kontaktflächen sind vergoldet und dienen zum Anschluß des Vorstromes.

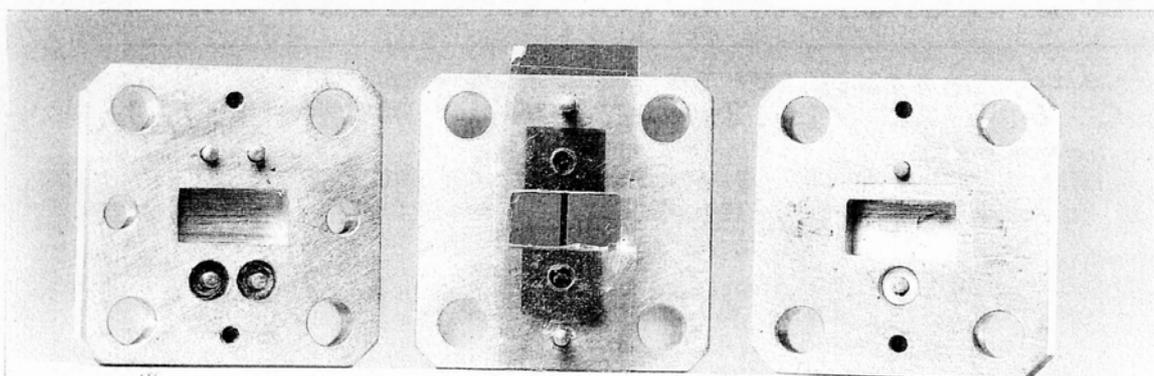


Bild 3: Geöffneter Bolometermeßkopf für Hohlleiter R 320 mit Dünnschicht-Bolometer (Streifenbreite 0,6 mm)

Links: Abschluß mit DC-Doppelkontakten, Mitte: Sicht auf Bolometer, rechts: Abschluß mit einfachen DC-Kontakten

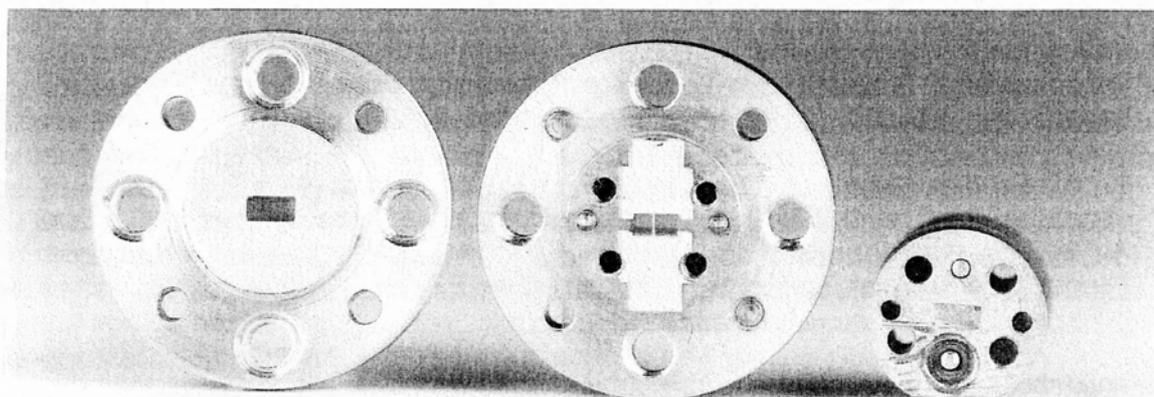


Bild 4: Geöffneter Bolometermeßkopf für Hohlleiter R 900 mit Dünnschicht-Bolometer (Streifenbreite 0,2 mm)

Links: Vorderansicht, Mitte: Sicht auf Bolometer, rechts: Abschluß mit einfachen DC-Kontakten

Die Messung des effektiven Wirkungsgrades ergab für den R 320-Hohlleitermeßkopf bei 35 GHz einen Wert von 99,0 % und für den R 900-Meßkopf bei 94 GHz einen Wert von 97,6 %. Damit wird in beiden Frequenzbereichen bestätigt, daß mit Dünnschicht-Bolometermeßköpfen im Millimeterwellenbereich wesentlich bessere effektive Wirkungsgrade als mit kommerziellen Thermistor-Meßköpfen realisiert werden können.

## 5.2 Modifizierte Dünnschicht-Bolometer

Ausgehend vom einfachen Streifenbolometer (Bild 3 und 4) wurde das Bolometer als Mäander und als eingeschnürter Streifen modifiziert, um die Bolometerwiderstände und Wärmeableitwiderständen zu vergrößern und die Induktivitäten des Bolometer-elementes zu verkleinern.

Die Dünnschichten des Bolometers wurden durch Sputtern und Verdampfen der Widerstandsmetalle auf etwa 25 µm Kaptonfolie hergestellt. Neben Nickel wurde auch Bismut untersucht, da es häufig für Bolometer im Infrarotbereich benutzt wird. Die Strukturierung erfolgte mit Hilfe der Mikrostrukturtechnik der Halbleitertechnologie d.h. durch konventionelle Fotolithografie mit anschließendem Ätzen. Die erreichten Werte für den Betrag des Temperaturkoeffizienten der Nickel- und Bismut-Schichten waren mit  $|\alpha| = 0,002$  etwa gleich groß, dabei ist für Nickel  $\alpha$  positiv und für Bismut negativ. Gegenüber den Bismutschichten erwiesen sich die Widerstände der Nickelschichten als wesentlich stabiler.

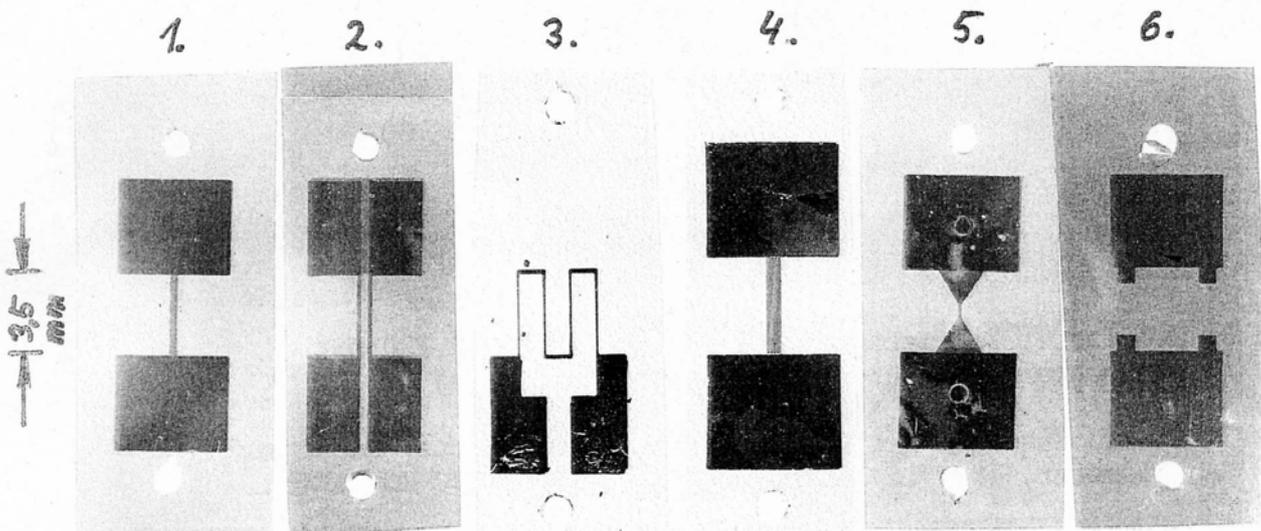


Bild 5: Verschiedene Dünnschicht-Bolometertypen mit Kontaktflächen sowie kapazitive Blende für das Hohlleiterband R 320

1. einfacher Streifen (Breite 0,6 mm), 2. 2-fach-Mäander (Einstreifen-Breite 0,2 mm), 3. 4-fach-Mäander (Streifenbreite 0,06mm), 4. 9-fach-Mäander (Streifenbreite 0,03 mm), 5. eingeschnürter Streifen (Engstelle 0,1 mm breit), 6. kapazitive Blende

### 5.2.1 Mäanderbolometer

Teilt man den Bolometerstreifen in mehrere schmale parallele Streifen in Mäanderform auf (Bild 5.2 bis 5.4) und schaltet sie für den Vorstrom in Reihe, läßt sich bei vergrößertem Bolometer-Gleichstromwiderstand  $R_{b,dc}$  trotzdem die Anpaßbedingung erfüllen. Für den HF-Bolometer-Wirkwiderstand wird nämlich die Parallelschaltung der Streifen wirksam, da diese im Hohlleiter parallel zum

elektrischen Feld liegen. Der in Gl. 4 einzusetzende HF-Bolometer-Wirkwiderstand  $R_{b, HF}$  (in Reihe zur Bolometerinduktivität  $L_b$ ) ist für ein Mäanderbolometer nicht mehr gleich dem Gleichstromwiderstand  $R_{b, DC}$ . Für ein Mäander mit  $n$  parallelen Streifen gilt:  $R_{b, HF} = R_{b, DC}/n^2$ .

Es wurden verschiedene Mäanderbolometer mit 2, 4 und 9 Streifen hergestellt (Bild 5) und die Empfindlichkeit  $S$  sowie die Induktivität  $L_b$  gemessen. Zum Vergleich der Meßergebnisse in Bild 6 wurden die Werte der Widerstände  $R_{b, DC}$  so gewählt, daß alle HF-Widerstände  $R_{b, HF}$  etwa 200  $\Omega$  betragen. Die Vorstromleistung  $P_{b, max}$  wurde auf 30 mW begrenzt, entsprechend der typischen Vorstromleistung der Thermistoren, und die Vorströme  $I_b$  wurden dieser Bedingung gemäß gewählt.

| Bolometertyp         | $R_{b, DC}$<br>$\Omega$ | $R_{b, HF}$<br>$\Omega$ | $L_b$<br>nH | $I_b$<br>mA | $S$<br>V/W |
|----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------|-------------|------------|
| einfacher Streifen   | 200                     | 200                     | 1,1         | 12          | 8,5        |
| 2-fach-Mäander       | 800                     | 200                     | 1,1         | 6           | 15,5       |
| 4-fach-Mäander       | 3 000                   | 200                     | 0,2         | 3           | 21         |
| 9-fach-Mäander       | 16 000                  | 200                     | 1,0         | 1,4         | 30         |
| Engstellen-Bolometer | 200                     | 250                     | 1,2         | 12          | 18         |
| Engstellen-Bolometer | 380                     | 440                     | 0,3         | 12          | 25         |

Bild 6: Tabelle der Meßergebnisse für verschiedene Hohlleiter-R 320 Dünnschicht-Bolometertypen

$R_{b, DC}$ : Bolometer Gleichstromwiderstand,  $R_{b, HF}$ : Bolometer HF-Widerstand in Reihe mit der Induktivität  $L_b$ ,  
 $I_b$ : Bolometer-Vorstrom,  $S$ : Empfindlichkeit

Die Ergebnisse in Bild 6 zeigen den erwarteten Anstieg der Empfindlichkeit  $S$  mit wachsendem Bolometer-Gleichstromwiderstand. Die Induktivitäten des enggefalteten 2-fach- und 9-fach-Mäanderbolometers sind gleich oder unterscheiden sich nur wenig von der Induktivität des einfachen Streifens. Der weitgefaltete 4-fach-Mäander weist eine wesentlich kleinere Induktivität von nur 0,2 nH auf. Die Induktivität der Bolometerstreifen steigt nur wenig mit abnehmender Breite [3]. Teilt man einen Streifen in mehrere schmale Streifen auf, kann sich daher die Gesamtinduktivität verringern, wenn die Gegeninduktivitäten zwischen den Streifen hinreichend klein sind. Wie die Meßwerte zeigen, ist diese Bedingung offenbar für den weitgefalteten 4-fach-Mäander erfüllt.

Mit einem Mäanderbolometer läßt sich die Empfindlichkeit im Vergleich zum einfachen Streifen um das 2- bis 3-fache vergrößern, und bei hinreichend weitem Abstand zwischen den Mäanderstreifen gleichzeitig die Induktivität verringern. Die kleinere Induktivität ermöglicht Bolometerwirkwiderstandswerte von über 200  $\Omega$  und damit eine weitere Empfindlichkeitssteigerung. Die Mäanderstruktur führt aber zu hohen Bolometer-Gleichstromwiderständen, die beim Betrieb der Bolometer an automatischen d.h. selbstabgleichenden Bolometer-Brückenschaltungen möglicherweise Schwierigkeiten bereiten können.

### 5.2.2 Engstellenbolometer

Bei einem eingeschnürten Bolometerstreifen, wie in Bild 5.5 dargestellt, wird der Widerstand auf die Mitte des Streifen konzentriert. Damit wird auch die Leistung im wesentlichen dort absorbiert, wo der Wärmeableitwiderstand wegen des größten Abstandes zu den Kontaktflächen am größten ist. Die Einschnürung des  $200 \Omega$  Streifens auf eine Breite von etwa  $0,1 \text{ mm}$  erhöht so den Gesamt-Wärmeableitwiderstand und damit die Empfindlichkeit etwa um den Faktor 2 (Bild 6) gegenüber dem einfachen  $0,6 \text{ mm}$  breiten Streifen.

Die Einschnürung des Bolometers stellt für die Hochfrequenz eine Kapazität  $C_b$  dar, die parallel zur Reihenschaltung von Widerstand und Induktivität der Engstelle im Bolometer liegt. Das einfache Ersatzschaltbild (Bild 1) des geraden Streifenbolometers ohne Kapazität gilt für das Engstellenbolometer nicht mehr, wie die Meßwerte für  $L_b$  und die Abweichungen zwischen  $R_{b,DC}$  und  $R_{b,HF}$  des Engstellenbolometers in der Tabelle (Bild 6) zeigen. Erweitert man das Ersatzschaltbild des Streifenbolometers um die Kapazität  $C_b$  der Engstelle, läßt sich zeigen, daß die Induktivität des Engstellenbolometers mit steigendem Bolometerwiderstand sinkt.

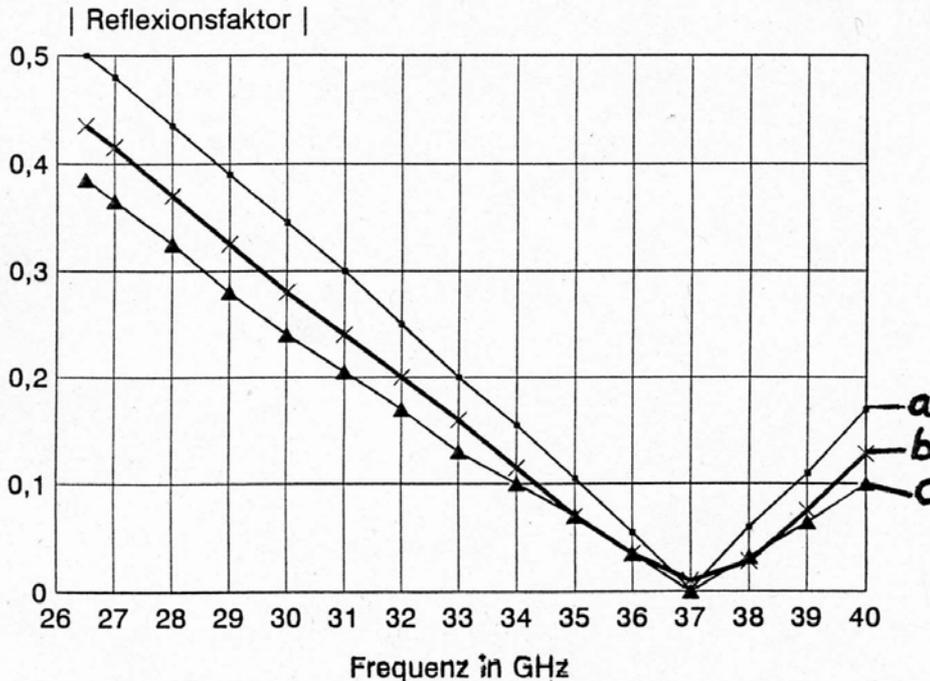


Bild 7: Gemessener Betrag des Reflexionsfaktors eines Engstellenbolometers mit der Impedanz  $Z_b = 440 \Omega + j60 \Omega$  ( $0,3 \text{ nH}$ ) (Kurve b)

Zum Vergleich: Berechneter Reflexionsfaktor für Streifenbolometer mit:  
 a:  $R_b = 200 \Omega$  und  $L_b = 1,1 \text{ nH}$ , c:  $R_b = 470 \Omega$  und  $L_b = 0$

Die Anpassung des Hohlleiter-Meßkopfes mit dem Engstellenbolometer, dessen Bolometerwiderstand von  $R_{b,HF} = 440 \Omega$  etwa dem Wellenwiderstand des Hohlleiters entspricht und dessen Blindwiderstand mit  $60 \Omega$  ( $0,3 \text{ nH}$ ) klein gegenüber dem HF-Wirkwiderstand ist, wurde gemessen. Die Beträge der Reflexionsfaktoren sind in Bild 7 als Funktion der Frequenz in Kurve b dargestellt. Zum Vergleich sind die berechneten Werte für das bekannte Bolometer mit einfachem Streifen ( $R_b = 200 \Omega$  und  $L_b = 1,1 \text{ nH}$ ) (Kurve a) und für ein ideales Bolometer ohne Induktivität und  $R_b = Z_{H1}$  (Kurve c) mit eingezeichnet. Für das Engstellenbolometer zeigt sich eine Verbesserung der Anpassung in Richtung des idealen Bolometers.

Wie beim Mäander kann mit dem Engstellenbolometer sowohl die Empfindlichkeit um das 2-fache erhöht als auch die Induktivität verkleinert und damit die Anpassung verbessert werden. Die Empfindlichkeitssteigerung ist hier mit der Erhöhung des Wärmeableitwiderstandes und nicht - wie beim Mäander - mit einem größeren Bolometerwiderstand verbunden.

Durch die Vereinigung beider Prinzipien, z.B. mit einem 2-fach-Mäander mit eingeschnürten Streifen, sollte eine weitere Empfindlichkeitserhöhung möglich sein.

## 6. Schlußbetrachtung

Mit zwei Meßkopf-Prototypen wurde bei den Frequenzen 35 GHz und 94 GHz bestätigt, daß mit der beschriebenen Dünnschichttechnologie im Millimeterwellenbereich effektive Wirkungsgrade realisiert werden können, die mit 99 % und 97,5 % wesentlich höher liegen als die der kommerziellen Thermistor-Meßköpfe. Es wurde an Hand von Messungen gezeigt, daß durch Ausbilden des Bolometers als Mäander oder als eingeschnürter Streifen 2- bis 3-fach größere Empfindlichkeiten als mit einfachen Streifenbolometern erhalten werden können. Außerdem können dabei die Induktivitäten vermindert und so Dünnschichtbolometer mit größeren Widerstandswerten gebaut werden, die besser angepaßt sind.

## Schrifttum

- [1] Honigbaum, R., und U. Stumper: Hochfrequenzleistungs-Normalmeßeinrichtung bis 40 GHz.  
In.: Melchert, F., und U. Stumper (Hrsg.): Fortschritte in der Hochfrequenzmeßtechnik. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 1990, (PTB-Bericht PTB-E-38), S.113-126
- [2] Sakurai, K., und T. Nemoto: A thin-film bolometer unit.  
Bul. Electrotech. Lab., Vol. 31, No.8 (1967) S.947-956
- [3] Inoue, T., I. Yokoshima und M. Sasaki: High-performance thin-film barretter mount for power measurements in W-band.  
Electron. Lett., Vol. 21, No.5 (1985), S.170-172
- [4] Brunetti, L., und E. Monticone: Thin-film bolometers for HF-power standards,  
In: Digest Conf. Prec. Electrom. Meas., CPEM'92, Paris, 1992, S.385-386
- [5] Wentworth, S.T., J.M. Lewis und D.P. Neikrik: Antenna-coupled thermal detectors of mm-wave radiation.  
Microwave Journal, Vol. 36, No.1 (1993) S. 94-103
- [6] Lane, J.A.: Microwave power measurement.  
Peter Peregrinus, London, 1972