

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

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 50 (1972)

Heft: 5

Artikel: Koaxialer Breitband-Mikrowellenabschwächer grosser Belastbarkeit

Autor: Stäger, Christian

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-874655>

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: 29.03.2025

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

Zusammenfassung. In der Mikrowellentechnik sind hauptsächlich zwei Arten von koaxialen Abschwächern gebräuchlich: breitbandige Ausführungen kleiner Leistung und relativ schmalbandige Abschwächer grosser Belastbarkeit. Es wird ein neues Prinzip beschrieben, in dem Breitbandigkeit und grosse Belastbarkeit miteinander kombiniert sind. Die Schaltung besteht im wesentlichen aus einer Reihe von Seriespannungsteilern in einem Streifenleitersystem. Das Dämpfungs- und Reflexionsverhalten kann mit einer einfachen Ersatzschaltung berechnet werden. Die erreichten Spezifikationen von gebauten Abschwächern zeigen gute Übereinstimmung mit der Theorie und die Überlegenheit der neuen Bauart gegenüber den bisherigen Abschwächern.

Atténuateur coaxial à large bande et grande capacité de charge pour microondes

Résumé. Dans la technique des microondes, on utilise principalement deux sortes d'atténuateurs coaxiaux: des modèles à large bande de petite puissance et des atténuateurs à grande capacité de charge dont la bande est relativement étroite. On décrit ici un nouveau principe dans lequel la largeur de bande et la grande capacité de charge sont combinées. Le dispositif consiste essentiellement en une rangée de diviseurs de tension branchés en série dans un système de conducteurs à rubans. Les caractéristiques de l'atténuation et de la réflexion peuvent être calculées à l'aide d'un simple circuit équivalent. Les spécifications atteintes par les atténuateurs construits correspondent bien aux valeurs théoriques et confirment la supériorité de la nouvelle construction comparée aux atténuateurs actuels.

Attenuatore coassiale a larga banda di microonde per grande capacità di carico

Riassunto. Nella tecnica delle microonde sono in uso principalmente due tipi di attenuatori coassiali: esecuzioni a larga banda di debole potenza e attenuatori a banda relativamente stretta per grande capacità di carico. Si descrive un nuovo principio, nel quale le qualifiche di larga banda e di grande capacità di carico sono combinate. Il circuito è costituito, in via di massima, da un gruppo di partitori di tensione in un sistema di conduttori a strisce. Il comportamento nei confronti dell'attenuazione e della riflessione può essere calcolato mediante un semplice circuito equivalente. Le specificazioni raggiunte con gli attenuatori costruiti rivelano buone concordanze con la teoria e la superiorità del nuovo sistema di costruzione rispetto agli attenuatori impiegati finora.

1. Allgemeines

Mit der fortlaufenden Erschliessung neuer Frequenzbänder im Mikrowellengebiet steigen die Anforderungen an die Breitbandigkeit von Komponenten und Geräten. In der Messtechnik sucht man zum Beispiel Generatoren, Detektoren und Leitungskomponenten, die über mehrere Frequenzoktaven verwendbar sind. Im Bereich der Koaxialabschwächer war es bis heute schwierig, für hohe Arbeitsfrequenzen fixe oder variable Abschwächer grosser Belastbarkeit und grosser Bandbreite zu finden.

Die gebräuchlichen Abschwächerelemente bestehen, wie in *Figur 1* skizziert, aus konzentrierten runden oder flachen Schichtwiderständen, die in π - oder T-Schaltung, neuerdings auch als verteilte Flächenwiderstände, in den Innenleiter eingefügt sind. Solche Abschwächer haben einen Arbeitsbereich von Gleichstrom bis zu einer oberen Frequenzgrenze, die durch die Güte der verwendeten Widerstandselemente, durch die Geometrie der Konstruktion und schliesslich durch die obere Frequenzgrenze des verwendeten Koaxial- oder Streifenleitungssystems bestimmt ist. Innen- und Aussenleiter sind voneinander thermisch isoliert. Dadurch wird die Wärmeableitung – bei elektrischer Belastung des Widerstandselementes – vom Innenleiter an den Aussenleiter und an die Umgebungsluft ungünstig. Deshalb können solche Abschwächer höchstens mit einigen Watt belastet werden. Bei hohen Arbeitsfrequenzen müssen zudem die Abmessungen der Leiter und Widerstandselemente zur Vermeidung unerwünschter höherer Ausbreitungsschwingungsformen klein gehalten werden. Dies begrenzt die höchste zulässige Belastbarkeit der Abschwächer nochmals.

Man erreicht eine Erhöhung der Belastbarkeit, wenn als dämpfendes Element verlustbehaftetes Dielektrikum im Raum zwischen Aussen- und Innenleiter eingebettet wird.

Das beste bisher bekannte Belastungsverhalten weist eine Konstruktion auf, bei der der Aussenleiter innen mit einem dämpfenden Material beschichtet wird. Hier wird der thermische Übergangswiderstand auf den äusseren Metallkörper des Abschwächers besonders klein. Es ist jedoch schwierig, mit diesen beiden Ausführungsformen frequenzunabhängiges Dämpfungsverhalten zu erreichen. Nachstehend wird das Prinzip eines fixen oder einstellbaren Abschwächers beschrieben¹, der die meisten Vorteile der bisher bekannten Konstruktionen aufweist, deren Nachteile aber vermeidet.

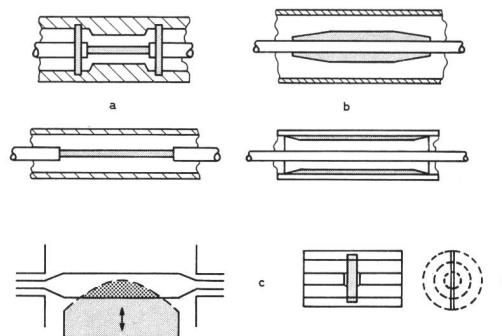


Fig. 1
Gebräuchliche koaxiale Dämpfungselemente

- a) Scheiben- und stabförmige Schichtwiderstände
- b) Verlustbehaftetes Dielektrikum
- c) Verschiebbares verlustbehaftetes Dielektrikum in Streifenleitungen
- d) Dünnschichtflächenwiderstand

¹ Schweizerisches Patent Nr. 486 129

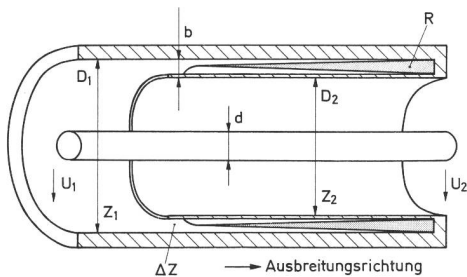


Fig. 2
Koaxialer Spannungsteiler

2. Der koaxiale Einzelspannungsteiler

Der neue Abschwächer besteht im wesentlichen aus der Reihenschaltung vieler Einzelspannungsteiler. Um die Wirkungsweise zu veranschaulichen, geht man von einer einzelnen koaxialen Serieverzweigung aus. *Figur 2* zeigt eine solche Verzweigung, die zum Spannungsteiler wird, wenn das niederohmige Koaxialleitungsstück mit D_1 und D_2 als Leiterdurchmesser mit einem reflexionsfreien Abschlusswiderstand R versehen ist und das Koaxialleitungsstück mit den Durchmessern D_2 und d mit seinem Wellenwiderstand abgeschlossen wird. Die einzelnen Impedanzen sind:

Eingangswellenwiderstand mit den Massen D_1 und d

$$Z_1 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{D_1}{d} [\Omega]$$

Ausgangswellenwiderstand mit den Massen D_2 und d

$$Z_2 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{D_2}{d} [\Omega]$$

Serieverzweigungsimpedanz mit den Massen D_1 und D_2

$$\Delta Z = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{D_1}{D_2} = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{D_1}{D_1 - 2b} [\Omega]$$

für $b \ll D$ ist $D_1 \sim D_2 \sim D$ und damit $Z_1 \sim Z_2 \sim Z$

Die Dämpfung des Spannungsteilers kann aus den Teilspannungen berechnet werden:

$$U_2 = U_1 \frac{Z}{Z + \Delta Z} \quad P_1 = \frac{U_1^2}{Z + \Delta Z} \quad P_2 = \frac{U_2^2}{Z} = \frac{U_1^2 \frac{Z^2}{(Z + \Delta Z)^2}}{Z} = \frac{U_1^2 \cdot Z}{(Z + \Delta Z)^2}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\frac{U_1^2}{Z + \Delta Z}}{\frac{U_1^2 \cdot Z}{(Z + \Delta Z)^2}} = \frac{Z + \Delta Z}{Z}$$

Die Dämpfung α wird

$$\alpha = 10 \cdot \log \frac{Z + \Delta Z}{Z} [\text{dB}]$$

Diese Dämpfung hängt nur von den geometrischen Massen D_1 und b ab und ist deshalb frequenzunabhängig. Voraussetzung ist, dass der Abschlusswiderstand R für das betrachtete Frequenzgebiet reflexionsfrei wirkt. Wird nun der konzentrische Schlitzraum, wie in *Figur 3* angedeutet, vollständig mit verlustbehaftetem Dielektrikum ausgefüllt, so verkleinert sich die Serie-Verzweigungsimpedanz $\Delta Z \epsilon$ proportional zur effektiven Dielektrizitätszahl $K \sim \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}}$ des verwendeten Dielektrikums.

(μ_r = relative Permeabilität, ϵ_r = relative Dielektrizitätskonstante der verwendeten Absorptionsmischung.)

Hier muss wiederum vorausgesetzt werden, dass die Schlitzraumlänge l so gross ist, dass im betrachteten Frequenzgebiet vom kurzgeschlossenen Schlitzende y her, wegen der Längsdämpfung im verlustbehafteten Dielektrikum, keine merkbaren Impedanz-Rückwirkungen in das Hauptkoaxial mit Z als Impedanz erfolgen.

$$\text{Damit wird } \Delta Z_\epsilon \sim 138 \cdot K \cdot \log \frac{D + 2 \cdot \frac{b}{2}}{D - 2 \cdot \frac{b}{2}} [\Omega]$$

$$Z \sim 138 \log \frac{D}{d} [\Omega]$$

Die Dämpfung α wird

$$\alpha_\epsilon = 10 \cdot \log \frac{Z + \Delta Z_\epsilon}{Z} [\text{dB}]$$

Sie ist frequenzunabhängig, wenn K und damit ΔZ über den interessierenden Frequenzbereich konstant sind.

3. Transformation des koaxialen Teilers in eine Streifenleiterausführung und Reihenschaltung mehrerer Einzelteiler

Den bisherigen Ausführungen hat ein rundes Koaxialsystem zugrunde gelegen. Konstruktiv lassen sich jedoch fixe und variable Abschwächer leichter in Streifenleiteranordnungen herstellen. Die Transformation des runden Koaxials in eine Streifenleiterschaltung (*Fig. 4*) deutet an, dass das Streifenleitersystem in erster Näherung als ein

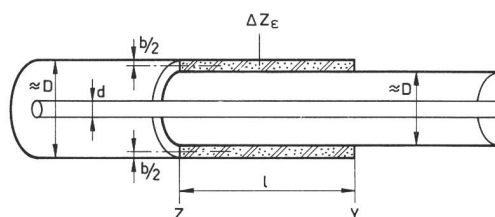


Fig. 3
Mit verlustbehaftetem Dielektrikum gefüllter Spannungsteiler, bei Y metallisch kurzgeschlossen

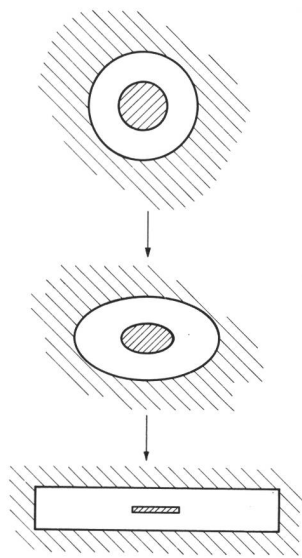


Fig. 4
Transformation der
Koaxialleitung in eine
gleichwertige Streifenleitung

flachgedrücktes rundes Koaxial betrachtet werden kann. Alle bis jetzt getroffenen Annahmen und durchgeführten Rechnungen gelten qualitativ ebenfalls für die Streifenleitung. *Figur 5a* wird deshalb gleichwertig wie *Figur 3*. Die mit verlustbehaftetem Dielektrikum gefüllten Schlitz (q in *Fig. 5a*) können nun, ohne dass an der Spannungsteilung etwas geändert wird, wie in *Figur 5b*, senkrecht zur Ausbreitungsrichtung aufgerichtet werden. Dies ermöglicht ein dichtes Aneinanderreihen einzelner Spannungsteiler zu einem ganzen Abschwächer, wie dies *Figur 5c* darstellt.

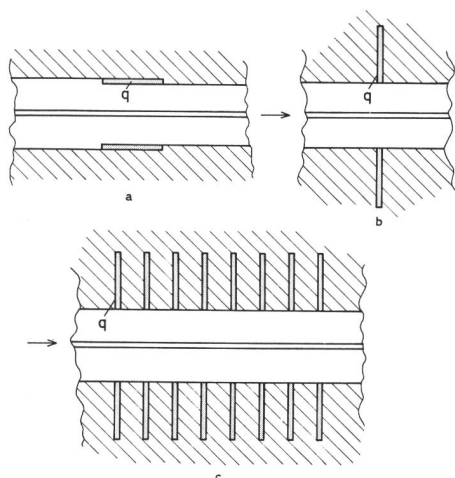


Fig. 5
Streifenleiter Spannungsteiler

- a) Einzelteiler, gleichwertig wie koaxiale Ausführung gemäss *Fig. 3*
- b) Einzelteiler wie a), jedoch Schlitz senkrecht gestellt
- c) Aneinanderzeichnung mehrerer Einzelteiler

4. Messung von Dämpfungsverläufen verschiedener Dämpfungsmaterialien in der Streifenleitung im Frequenzbereich 1...18 GHz

Wird Absorptionsmaterial in den Hohlraum zwischen Innen- und Aussenleiter einer Streifenleitung eingelegt (ganz, teilweise oder nur wenig ausfüllend), so ergibt sich für den TEM-Mode ein grundsätzlicher Dämpfungsverlauf gemäss Kurve a in *Figur 6*; der Logarithmus der Dämpfung nimmt ungefähr proportional mit der Frequenz zu. Das gleiche gilt demnach für Wellen, die in absorptionsmaterialgefüllte Querschlitz hineinfließen. Selbst bei grossen Schlitziefen wird die Kurzschlussimpedanz des Schlitzendes bei niederen Frequenzen wegen der kleinen Dämpfung fast unverändert als Kurzschluss an den Schlitzanfang transformiert, so dass die Dämpfung eines Abschwächers, wie in *Figur 5c*, bei Frequenzen gegen Gleichstrom Richtung Null strebt. Die Dielektrizitätszahl $K \sim \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}}$ des Absorptionsmaterials ist im allgemeinen frequenzabhängig. Praktische Versuche führten jedoch zu einer Mischung aus drei Komponenten, die zwischen 1 und 18 GHz ein weitgehend frequenzunabhängiges K ergibt. Bei kleinen Variationen des Mischverhältnisses (Simulation von Material- und Wägestreuungen) treten typische Dämpfungsverläufe auf, wie sie die Kurven b, c, d in *Figur 6* zeigen. Die Schlitz sind bei diesen Messungen so tief, dass die in den Schlitz laufenden Wellen bereits bei der unteren Frequenzgrenze von 1 GHz ~ 15 dB gedämpft werden, bis sie auf den Schlitzgrund treffen und reflektiert werden. Da bei der Herstellung von Abschwächern immer mit einer Material- und Massstreuung gerechnet werden muss, wird man mit Vorteil eine Absorptionsmischung verwenden, deren typischer Dämpfungsverlauf mit steigender Frequenz leicht fallend ist (Kurve b in *Fig. 6*). So kann im schraffierten Streubereich der möglichen Frequenzgänge, mit einer abgleichbaren Korrekturlängendämpfung gemäss Kurve a, der Gesamtdämpfungsverlauf flach auskorrigiert werden.

Die Dielektrizitätszahl $K \sim \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}}$ des Absorptionsmaterials ist im allgemeinen frequenzabhängig. Praktische Versuche führten jedoch zu einer Mischung aus drei Komponenten, die zwischen 1 und 18 GHz ein weitgehend frequenzunabhängiges K ergibt. Bei kleinen Variationen des Mischverhältnisses (Simulation von Material- und Wägestreuungen) treten typische Dämpfungsverläufe auf, wie sie die Kurven b, c, d in *Figur 6* zeigen. Die Schlitz sind bei diesen Messungen so tief, dass die in den Schlitz laufenden Wellen bereits bei der unteren Frequenzgrenze von 1 GHz ~ 15 dB gedämpft werden, bis sie auf den Schlitzgrund treffen und reflektiert werden. Da bei der Herstellung von Abschwächern immer mit einer Material- und Massstreuung gerechnet werden muss, wird man mit Vorteil eine Absorptionsmischung verwenden, deren typischer Dämpfungsverlauf mit steigender Frequenz leicht fallend ist (Kurve b in *Fig. 6*). So kann im schraffierten Streubereich der möglichen Frequenzgänge, mit einer abgleichbaren Korrekturlängendämpfung gemäss Kurve a, der Gesamtdämpfungsverlauf flach auskorrigiert werden.

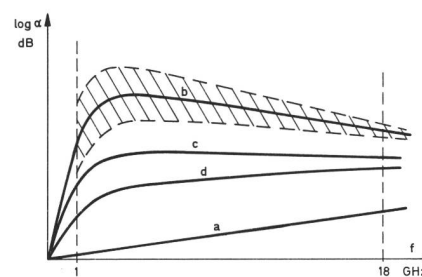


Fig. 6
Typische Frequenzgänge in den Streifenleitungen

- a) eines Längsabsorptionstreifens
- b), c), d) Verschiedene Mischungen verlustbehafteter Dielektrika
- Schraffiertes Gebiet: Streubereich infolge Material- und Massstreuung

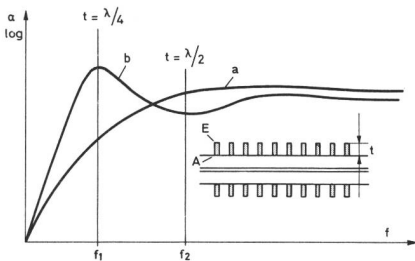


Fig. 7
Dämpfungsverläufe

Kurve a) für sehr grosse Schlittiefen t
Kurve b) für kleine Schlittiefen

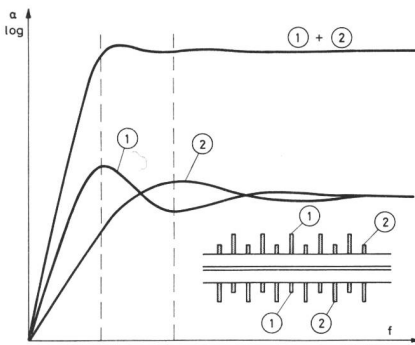


Fig. 8
Multiplikation zweier einander kompensierender Dämpfungsverläufe

Wird die Schlittiefe auf einige mm verkleinert, so beeinflusst das Schlitzende E den Dämpfungsverlauf eines Abschwächers, wie in Kurve b der *Figur 7* angegeben. Das Dämpfungsmaximum entsteht bei der Frequenz f_1 , wenn der Schlitz eine elektrische Länge von $\lambda/4$ hat. Der Kurzschluss am Schlitzende E wird auf einen um den doppelten Schlitzdämpfungswert reduzierten Leerlaufimpedanzwert an den Schlitzanfang A transformiert und bewirkt einen Anstieg der Schlitzimpedanz ΔZ_E und damit der Dämpfung des Spannungsteilers. Bei f_2 entspricht die gleiche Schlittiefe t einer elektrischen Länge von $\lambda/2$. Die dadurch entstehende Verminderung der Dämpfung gegenüber dem ungestörten Verlauf mit (elektrisch) grosser Schlittiefe (Kurve a in *Fig. 7*) ist weniger ausgeprägt wegen der bei f_2 ungefähr doppelt so grossen Schlitzdämpfung (in Richtung Schlitzende E). Durch Kombination zweier verschiedener Schlittiefen und der Multiplikation der entsprechenden Einzeldämpfungsverläufe, wie in *Figur 8* dargestellt, wird es möglich, die Dämpfungsmaxima und -minima gegeneinander zu kompensieren und zugleich die Dämpfung am unteren Frequenzende gegenüber der allmählich gekrümmten Kurve a in *Figur 7* anzuheben. Die verfügbare Bandbreite des Abschwächers wird so vergrössert.

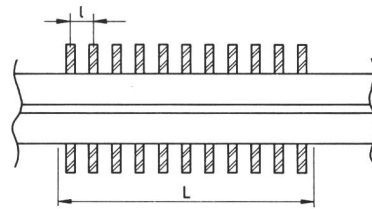


Fig. 9
Abschwächer mit Teilerabstand l und Baulänge L

5. Reflexion des Spannungsteilers, einzeln und in Reihenschaltung

Die Fehlanpassung S eines einzelnen Spannungsteilers ist

$$S = \frac{\Delta Z + Z}{Z}$$

und die Reflexion

$$|r| = \frac{S-1}{S+1}$$

Der ganze Abschwächer besteht aus der Reihenschaltung vieler Einzelteile gemäss *Figur 9*. Die Teilerschlitzte folgen einander im Abstand l . Die Einzelreflexionen addieren sich vektoriell zu einer Summenreflexion, deren Grösse und Phase durch die Summe einer geometrischen Reihe gegeben ist, wenn die Gesamtdämpfung $\alpha_{\text{tot}} > 10$ dB angenommen werden kann.

Die Summenreflexion wird

$$\begin{aligned} \bar{r}_{\text{tot}} &= \bar{r}_{\text{einzel}} [1 + k \cdot e^{j\varphi} + k^2 \cdot e^{j2\varphi} + \dots + k^n \cdot e^{jn\varphi}] \\ &= \bar{r}_{\text{einzel}} \cdot \frac{1}{1 - k \cdot e^{j\varphi}} \end{aligned}$$

k ist das Leistungsverhältnis von Ausgang zu Eingang des Einzelteilers ($k < 1$) und φ der Phasenwinkel eines Spannungsvektors beim Hin- und Rücklauf über die Distanz l .

In *Figur 10* sind die Summe $\frac{1}{1 - k \cdot e^{j\varphi}}$ sowie die Addition der einzelnen Reflexionen zur Gesamtreflexion bei zwei Frequenzen eingetragen.

Bei einer gegebenen Baulänge L und einer gewünschten Gesamtdämpfung α_{tot} kann die Dämpfungsstufe der einzelnen Teiler frei gewählt werden. Im Interesse einer stetigen Dämpfungsvariationsmöglichkeit soll die Einzeldämpfung α_{einzel} 0,3 dB nicht übersteigen. Damit ist die Einzelteilerzahl n bestimmt. Die Distanz l zwischen den

Einzelteilern wird somit $l = \frac{L}{n}$.

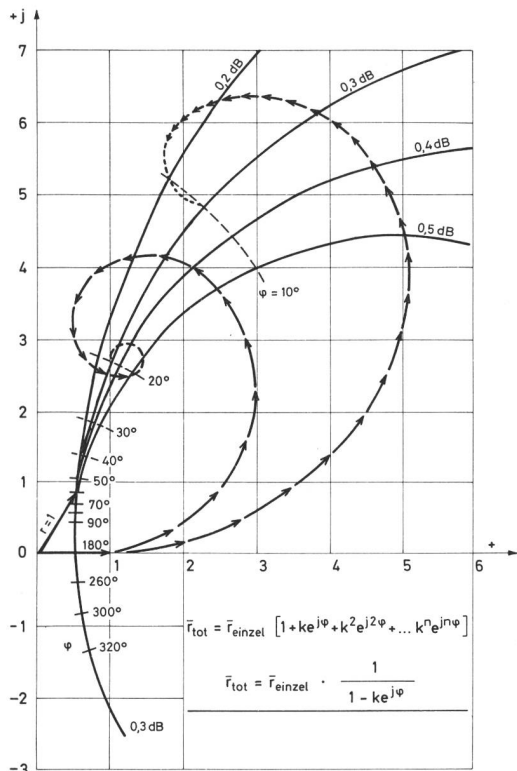


Fig. 10 Reflexionsverlauf eines Abschwächers mit normierter Einzelreflexion $r = 1$

Mit den Beziehungen

$$S = \frac{\Delta Z + Z}{Z} \text{ und}$$

$$|r| = \frac{S - 1}{S + 1}$$

und mit der Formel $r_{\text{tot}} = r_{\text{einzel}} \cdot \frac{1}{1 - k \cdot e^{j\psi}}$ können nun für

alle Betriebsfrequenzen die theoretischen Minimal-Gesamtreflexionen berechnet werden. Insgesamt treten jedoch die vier nachfolgend aufgeführten und in Fig. 11 dargestellten frequenzbegrenzenden Faktoren auf:

- Mit einer gewählten Einzelteilerdämpfung α_{einzel} und festgelegter Teilerdistanz l ist bei einer gewünschten maximal zugelassenen Summenreflexion eine untere Frequenzgrenze $f_{u\alpha}$ gegeben.
- Bei dieser Teilerdistanz l ergibt sich eine obere Frequenzgrenze $f_{o\text{refl}}$, wenn deren Wellenlänge $\lambda = 2 \cdot l$ wird und sich die Einzelreflexionen phasengleich zu einer unzulässig hohen Summenreflexion addieren.
- Die verwendete Mischung und die gewählten Schlitztiefen legen (unabhängig von Teilerdistanz l und Teiler-

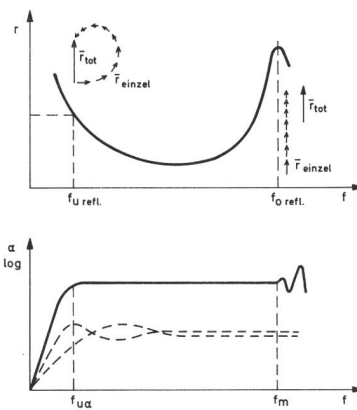


Fig. 11 Frequenzbegrenzende Faktoren eines fixen oder variablen Abschwächers

dämpfung α_{einzel}) eine untere Frequenzgrenze $f_{u\alpha}$ für flachen Dämpfungsverlauf fest.

- Eine obere Grenzfrequenz f_m ist schliesslich durch den nächsthöheren Ausbreitungsmodus des verwendeten Streifenleiterquerschnittes oder der angeschlossenen Koaxialenden gegeben.

6. Dämpfungsvariation und Leistungsverhalten

Da jedes Einzelteilerpaar den gleichen frequenzunabhängigen Dämpfungsverlauf aufweist, kann eine Dämpfungsvariation beim ganzen Abschwächer durch Abdecken aufeinanderfolgender Einzelteiler erzielt werden, indem man zwei dünne Metallmasken längsseitig über die AussenleiterInnenflächen schiebt. Dadurch ändert sich die Dämpfung in dB proportional zur Maskenverschiebung. Die Wellenwiderstände im Streifenleitersystem werden durch den Auftrag der Maskendicke nicht wesentlich beeinflusst. Ein leichtes Schrägstellen der Maskenvorderkante verbessert die Stetigkeit der Dämpfungsvariation. Fig. 12 stellt die Lage der verschiebbaren Metallmasken im Streifenleitersystem

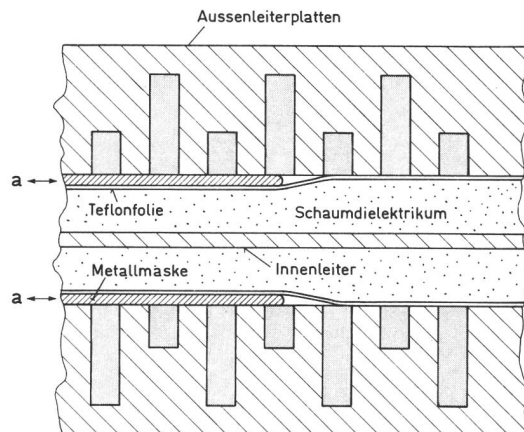


Fig. 12 Ausschnitt aus einem variablen Abschwächer, Lage der längsverschiebbaren Metallmaske im Streifenleitersystem

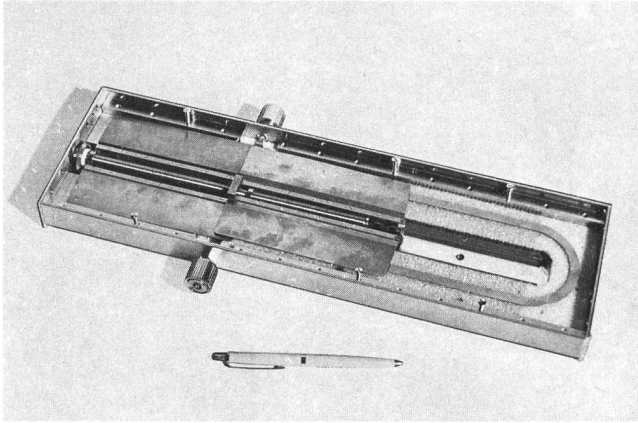


Fig. 13
Halbgeöffneter variabler Abschwächer 0...50 dB, 1,7...14 GHz, 50 W

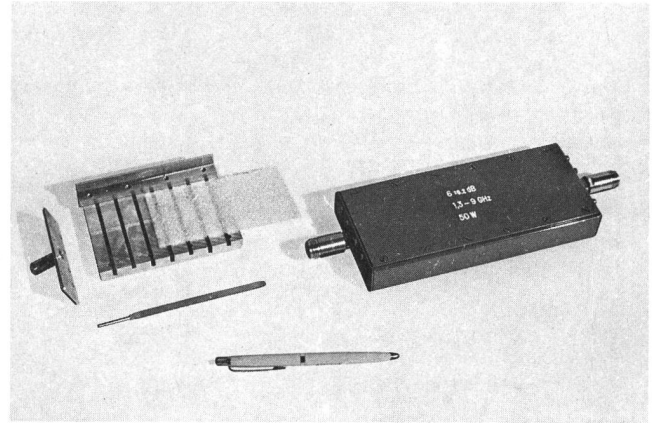


Fig. 14
Fixer Abschwächer 6 dB, 1,3...9 GHz, 50 W

system dar. *Figur 13* zeigt einen halb geöffneten variablen Abschwächer für den Frequenzbereich 1,7...14 GHz und Dämpfungsbereich 0...50 dB. In *Figur 14* ist eine fixe Ausführung abgebildet.

Das verlustbehaftete Dielektrikum ist satt in die Aussenleiterplatten eingebettet. Deshalb kann die in Wärme umgesetzte Mikrowellenenergie ohne grossen thermischen Übergangswiderstand an die massiven Aussenleiterplatten, und damit an die Umgebungsluft, abgegeben werden. Die zulässige Belastung hängt deshalb nur von der äusseren Beschaffenheit der Aussenleiterplatten ab (Wärmekonvektion über glatte Flächen oder Kühlrippen, forcierte Luftkühlung). Zwei weitere, jedoch hier nicht in Erscheinung tretende Grenzen wären die Erwärmung des glatten Innenleiters und die Spannungsfestigkeit der Koaxialenden.

7. Spezifikation und Schlussfolgerung

Die in einer kleinen Serie in der Werkstätte der PTT-Betriebe hergestellten fixen und variablen Abschwächer haben die in *Tabelle I* aufgeführten Spezifikationen.

Die Einflüsse von Summenreflexion, Teilerdistanz, Baulänge und Frequenzverhalten der verwendeten Mischung ergeben eine praktische unterste Frequenzgrenze der beschriebenen Abschwächer von etwa 1 GHz. Nach hohen Frequenzen ist die Verwendung dieses Prinzips nur durch die geometrischen Abmessungen der Streifenleitungssysteme und Koaxialenden eingeschränkt. Relative Bandbreiten 10:1 und Belastbarkeiten bis 100 W sind ohne Mühe erreichbar. Abwandlungen der beschriebenen Konstruktion könnten in der Mikrominiaturisierung mit Substrattechnik Verwendung finden. Versuche sind in Vorbereitung.

Tabelle I. Spezifikation von fixen und variablen Abschwächern

	fixe Ausführung		variable Ausführung
Frequenzbereich	1...8 GHz	1,4...18 GHz	1,4...14 GHz
Dämpfung	3, 6, 10 dB	3, 6, 10, 20, 30 dB	0...50 dB
Dämpfungsunsicherheit	$\pm 0,2$ dB	0...10 dB $\pm 0,2$ dB oberhalb $\pm 2\%$ der Dämpfung in dB	0...10 dB $\pm 0,2$ dB oberhalb $\pm 2\%$ der Dämpfung in dB
Nulleinfügungsdämpfung			< 1 dB
Belastung CW	50 W mit Zusatzkühlung mehr	50 W mit Zusatzkühlung mehr	50 W
Reflexion	< 10% je Anschlussseite	< 10% je Anschlussseite	1,4...4 GHz < 15% 4...14 GHz < 10% je Anschlussseite
Abmessung	Querschnitt 3×9 cm Länge ~ 3 cm/dB (ohne Stecker)	Querschnitt 2,5×6 cm Länge ~ 1 cm/dB (ohne Stecker)	4 × 13 × 42 cm (ohne Anschlussstecker)