

Das koaxiale Spannungsteilerelement als Baustein hochbelastbarer Breitband-Mikrowellenabschwächer beliebiger Dämpfung

Autor(en): **Stäger, Christian**

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): **58 (1980)**

Heft 3

PDF erstellt am: **16.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-875868>

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.

Das koaxiale Spannungsteilerelement als Baustein hochbelastbarer Breitband-Mikrowellenabschwächer beliebiger Dämpfung

Christian STÄGER, Bern

621.317.727.1.029.64:621.372.832.4:621.372.852.3

Zusammenfassung. Beschrieben wird ein neuartiges Mikrowellen-Abschwächerprinzip, das aus aneinandergereihten Einzel-Seriespannungsteilern in koaxialer Ausführung aufgebaut ist. Die im Aussenleiter angeordneten Dämpfungselemente erlauben eine grosse Belastbarkeit, da der Wärmeübertritt an die Aussenluft über Kühlrippen optimal ist. Aus geometrischen Gründen weisen diese Abschwächer eine untere Grenzfrequenz auf, die bei handlichen Ausführungen zwischen 1 und 2 GHz liegt. Nach oben wird die Arbeitsfrequenz jedoch nur durch die Abmessungen des verwendeten Koaxialsystems begrenzt. Reihenmessungen an Fabrikationsserien dienen zur Festsetzung von Spezifikationen für die Industrie, die solche Abschwächer in Lizenz nachbaut.

L'élément diviseur de tension coaxial en tant que composant d'atténuateurs micro-ondes à large bande, de valeur pouvant être choisie à volonté et supportant de hautes charges

Résumé. L'auteur décrit le principe d'un nouvel atténuateur micro-ondes composé d'une chaîne de diviseurs de tension série discrets de configuration coaxiale. Les éléments atténuateurs montés dans le conducteur extérieur permettent de fortes charges, la chaleur étant évacuée à l'air libre au moyen d'ailettes de refroidissement. Pour des raisons géométriques, ces atténuateurs présentent une fréquence de coupure inférieure située entre 1 et 2 GHz, pour les modèles maniables. La fréquence de travail supérieure n'est toutefois limitée que par les dimensions du système coaxial utilisé. Par des séries de mesure, on détermine les spécifications des atténuateurs sortant de fabrication, à l'intention de l'industrie qui les construit sous licence.

L'elemento divisore di tensione coassiale quale componente di attenuatori microonde a larga banda, con valori da stabilire a volontà e che sopportano grandi cariche

Riassunto. L'autore descrive il principio di un nuovo attenuatore microonde composto di una catena di divisori di tensione in serie discreti di struttura coassiale. Gli elementi attenuatori montati nel conduttore esteriore sopportano un grande carico, dato che il calore esce liberamente all'aria esterna per mezzo di alette di raffreddamento. Per motivi geometrici, questi attenuatori presentano una frequenza di taglio inferiore che si trova tra 1 e 2 GHz per i modelli maneggevoli. La frequenza di lavoro superiore è comunque solo limitata dalle dimensioni del sistema coassiale utilizzato. Si può determinare, per mezzo di serie di misurazioni, le specificazioni degli attenuatori provenienti dalla fabbricazione, all'intenzione dell'industria che li costruisce su licenza.

1 Allgemeines

In der Richtstrahltechnik und bei Radaranwendungen werden zunehmend grössere Mikrowellendauerleistungen eingesetzt. Dies führt zu einem vermehrten Bedarf von Leistungsabschwächern, die beispielsweise als gut angepasste Dämpfungsglieder zur Reduktion von Sendeleistungen oder als Prüf- und Laborabschwächer bei Abnahmemessungen von Richtstrahlssystemen und in der Entwicklung eingesetzt werden. Der Arbeitsfrequenzbereich der PTT-Richtstrahlssysteme umfasst heute etwa eine Dekade, das heisst ungefähr 1,6...18 GHz. Es ist deshalb wünschenswert, bei koaxialen Ausführungen Abschwächer für diesen gesamten Frequenzbereich zu entwickeln. Da beispielsweise bei der Zusammenschaltung verschiedener Mikrowellensysteme über eine einzige Antennenzuleitung auf eine Multibandantenne Gesamtsendeleistungen von etwa 50 W auftreten können, ist für solche Abschwächer eine Dauerbelastbarkeit von 50 W anzustreben. Handelsübliche Koaxialabschwächer für Mikrowellenfrequenzen sind meistens nur mit einigen Watt belastbar. Ein paar wenige Firmen bauen Ausführungen bis höchstens 20 W. Die Tendenz nach höheren Belastbarkeiten ist jedoch deutlich erkennbar. Bei der Mehrzahl der auf dem Markt erhältlichen Abschwächer sind die dämpfenden Strukturen am Innenleiter angebracht, was zu grossen Problemen bei der Wärmeübergabe an die Aussenluft führen kann. Entweder muss die Dämpfung in ganz kleinen Stufen erfolgen, damit je Dämpfungselement nicht zuviel Wärme abgeleitet werden muss, oder das Widerstandselement arbeitet bei hohen Temperaturen, was die Lebensdauer solcher Abschwächer erheblich herabsetzen kann. Günstiger sind Konstruktionen, bei denen

das Dämpfungselement ganz im Aussenleiter integriert wird. Hier kann die Wärmeübergabe über massive Metallteile und Kühlrippen an die Aussenluft stattfinden. Solche Abschwächer weisen jedoch eine grundsätzliche Eigenheit auf. Sie arbeiten nicht von Gleichstrom, sondern von einer unteren Grenzfrequenz an, die vor allem von der geometrischen Form des dämpfenden Elementes abhängt. Dagegen wird die obere Frequenzgrenze hier nur durch die geometrischen Abmessungen des Koaxialsystems selbst begrenzt. Zu erwähnen sind noch richtkopplerähnliche Abschwächeranordnungen, die jedoch den Nachteil einer hohen Minimaldämpfung aufweisen (≥ 10 dB).

2 Prinzip und Wirkungsweise des koaxialen Spannungsteilers als Dämpfungselement

Nachfolgend wird ein Abschwächerprinzip beschrieben [1], das über eine Frequenzbandbreite einer Dekade, beispielsweise 1,6...18 GHz, einen frequenzunabhängig flachen Dämpfungsverlauf aufweist. Der Aufbau von Abschwächern mit beliebigen Dämpfungswerten wird durch Aneinanderreihen von unter sich gleichen Abschwächerelementen erreicht.

Um die Wirkungsweise des neuen, weitgehend frequenzunabhängig wirkenden Abschwächerprinzips zu erläutern, geht man zweckmässig von einer einzelnen koaxialen Serieverzweigung aus. *Figur 1* zeigt eine solche Verzweigung, die zum Spannungsteiler wird, wenn das niederohmige Koaxialleitungsstück mit dem Aussendurchmesser D_1 und dem Innendurchmesser D_2 mit einem reflexionsfreien Abschlusswiderstand R ver-

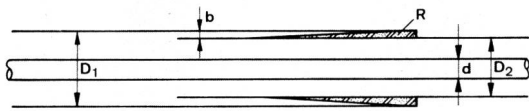


Fig. 1
Koaxiale Serieverzweigung als Spannungsteiler

sehen und das Koaxialleitungsstück mit den Durchmessern D_2 und d mit seinem Wellenwiderstand abgeschlossen wird. Die Wellenwiderstände können gemäss Fig. 2 wie folgt bestimmt werden:

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

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

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

für $b \ll D_1$ ist $D_1/2 \approx D$ und damit $Z_1 \approx Z_2 \approx Z$

Die Durchgangsdämpfung des Spannungsteilers kann aus den Teilspannungen aus Fig. 2 berechnet werden:

$$U_2 = U_1 \frac{Z}{Z + \Delta Z}$$

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

$$P_1 = \frac{U_1^2}{Z + \Delta Z}$$

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

$$A_{[\text{dB}]} = 10 \log \frac{P_1}{P_2} = 10 \log \frac{Z + \Delta Z}{Z}$$

Diese Dämpfung ist frequenzunabhängig, da sie nur von den geometrischen Massen des Spannungsteilers abhängt. Wenn der Schlitzhohlraum bis zur Innenwandfläche des Aussenleiters mit einem verlustbehafteten Dielektrikum e gefüllt wird, wie in Fig. 3 angedeutet, hängt die aus den Figuren 1 und 2 berechnete Impedanz ΔZ_e nur von der relativen Dielektrizitätszahl ϵ_r und der Permeabilitätszahl μ_r des Dielektrikums ab, wenn die Schlitzlänge l so gross gewählt wird, dass bei der gewählten unteren Grenzfrequenz f_u vom kurzgeschlossenen Schlitzende y her keine Rückwirkungen auf den Schlitzanfang Z merkbar sind. Es gilt dann:

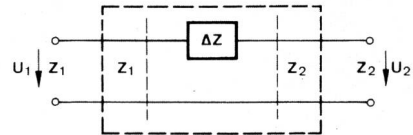


Fig. 2
Ersatzschaltung für die Anordnung nach Fig. 1

$$\Delta Z_e \approx 138 \cdot K \cdot \log \frac{D + 2 \cdot b/2}{D - 2 \cdot b/2} [\Omega]$$

K ist eine aus experimentellen Messungen gewonnene Verhältniszahl, die proportional mit $\sqrt{\mu_r/\epsilon_r}$ verläuft.

ϵ_r und μ_r sind im allgemeinen frequenzabhängige und komplexe Grössen. Messungen an verschiedenen Materialzusammensetzungen führten schliesslich auf eine günstige Dielektrikumsmischung aus drei Komponenten, einem nichtmagnetischen, einem magnetischen und einem Giessharzanteil. Die Verhältniszahl K dieser Mischung ist über den interessierenden Frequenzbereich weitgehend konstant.

Damit wird die Durchgangsdämpfung:

$$A_{[\text{dB}]} = 10 \log \frac{Z + \Delta Z_e}{Z} \approx 10 \log \left(1 + K \cdot \frac{\log(D + b) - \log(D - b)}{\log D - \log d} \right)$$

Diese ist oberhalb der unteren Grenzfrequenz f_u frequenzunabhängig konstant.

3 Praktischer Aufbau

Praktische Abschwächer können nun nicht, wie Fig. 3 zeigt, gebaut werden, da bei den erforderlichen Elementlängen (e in Fig. 3) ein aus mehreren Elementen bestehender Abschwächer viel zu lang würde.

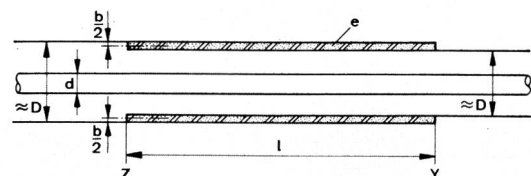


Fig. 3
Teilkaxial mit verlustbehaftetem Dielektrikum gefüllt

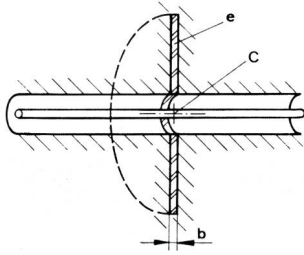


Fig. 4
Inhomogene Radialleitung als Spannungsteiler

e kann nun senkrecht zur Leitungsrichtung, wie in *Figur 4* angedeutet, gestellt werden. So wird e zu einer verlustbehafteten Radialleitung mit Leiterebenenabstand b. Radialleitungen mit konstanten Leiterebenenabständen sind inhomogen, das heisst ihr Wellenwiderstand nimmt mit zunehmender Entfernung vom Zentrum C ab. Damit ist auch die Bedingung für frequenzunabhängiges Verhalten der Dämpfung — konstante Teilimpedanz ΔZ_e — nicht mehr erfüllt.

Als dämpfende Radialleitung wird deshalb nicht die Form gemäss *Figur 4*, sondern eine doppelkegelförmige Anordnung, wie *Figur 5* zeigt, angewendet. Wenn die Kegelspitzen der Begrenzungsflächen dieser Radialleitung mit dem Zentrum C des Koaxials zusammenfallen, ist die Leitung homogen, was bedeutet, dass ihr Wellenwiderstand orts- und frequenzunabhängig ist. Damit wird ΔZ_e und damit die Dämpfung α frequenzunabhängig konstant. In *Figur 5* muss wiederum so gross gewählt werden, dass bei der Frequenz f_u die Rückwirkung des metallisch kurzgeschlossenen Scheibenrandes vernachlässigbar klein bleibt. Die Impedanz einer solchen Doppelkegel-Radialleitung ist nach [2] und gemäss *Figur 6*.

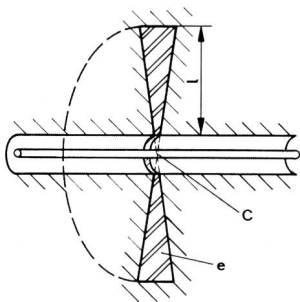


Fig. 6
Wellenwiderstand der Doppelkonusleitung

$$Z = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \left(\frac{\tan \theta_2/2}{\tan \theta_1/2} \right)$$

$$Z_{\text{Konus}} = 138 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \cdot \log \frac{\tan \theta_2/2}{\tan \theta_1/2} [\Omega]$$

Aus fabrikationstechnischen Gründen wird das Dämpfungselement als Metalltopf mit eingepresster und ausgehärteter Absorberrmischung, wie in *Figur 7* angedeutet, hergestellt.

Nach äusserer Bearbeitung entsteht eine flache, gelochte Scheibe von etwa 6 mm Dicke, die ungefähr 0,8 dB Dämpfung aufweist. Wie bereits eingangs erwähnt, rührt die hohe Belastbarkeit des neuen Konstruktionsprinzips davon her, dass im Gegensatz zu den herkömmlichen Abschwächern die Dämpfungsschichten im Aussenleiter angeordnet sind. Die massiven hochtemperaturfesten Absorberrschichten können die aufgenommene und in Wärme umgesetzte Mikrowellenenergie über ihre Aussenflächen direkt an die Luft abgeben. Eine Berechnung des Wärmeflusses zeigt, dass der grösste Wärmewiderstand an der Übergangsstelle Aussenleiter-aussenfläche—Umgebungsluft auftritt. Deshalb hängt die zulässige Leistungsaufnahme des Abschwächers hauptsächlich von der Beschaffenheit der Kühlflächen sowie von deren angenommenen zulässigen Temperatur

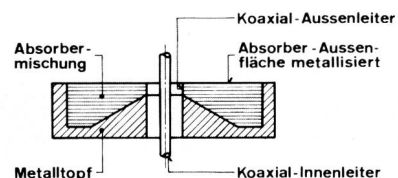


Fig. 7
Schnitt durch ein fabrikationsgerechtes Abschwächerelement

Fig. 5
Homogene Radialleitung als Spannungsteiler

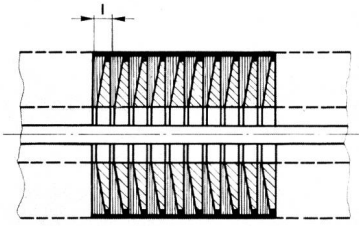


Fig. 8
Abschwächer, gebildet aus der Reihenschaltung vieler Einzelteiler, mit der Folgedistanz l

ab. Messungen an Prototypen mit Kühlringen als Übergangsstelle zur Umgebungsluft ergaben eine zulässige Belastung von 50 W Dauerleistung je 10 dB und 10 cm Abschwächerlänge und einer Aussenflächentemperatur von $\leq 130^\circ \text{C}$ (Raumtemperatur 20°C). Bei entsprechend dimensionierten Kühlkörpern kann für die gleiche Dämpfung und Baulänge mit einer zulässigen Belastung von mindestens 100 W Dauerleistung gerechnet werden.

4 Reflexion des Spannungsteilers, einzeln und in der Reihenschaltung

Die Fehlanpassung eines einzelnen Spannungsteilers ist

$$S = \frac{\Delta Z + Z}{Z} \text{ und die Reflexion } |r| = \frac{S-1}{S+1}$$

Der ganze Abschwächer besteht aus einer Reihenschaltung vieler Einzelteiler, wie *Figur 8* zeigt. Die Teiler folgen einander im Abstand l . Die Einzelreflexionen ad-

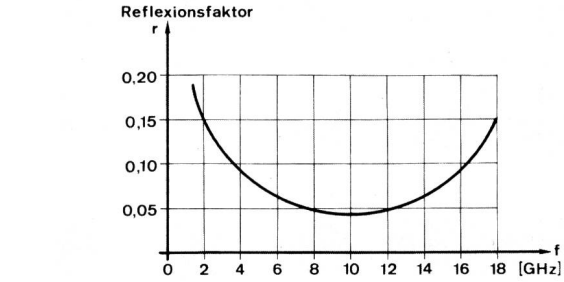
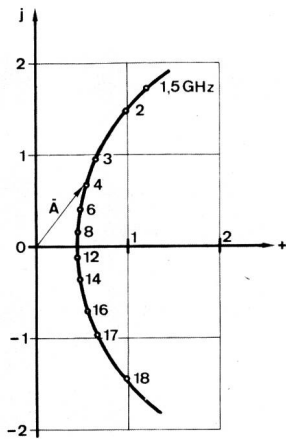


Fig. 10
Gerechnete Gesamtreflexion eines 20-dB-Abschwächers mit Einzeldämpfung 0,8 dB und Teilerschritt $l = 7,5 \text{ mm}$

dieren sich vektoriell zu einer Summenreflexion, deren Grösse und Phase durch die Summe einer geometrischen Reihe gegeben ist

$$\begin{aligned} \bar{r}_{\text{tot}} &= \bar{r}_{\text{Einzel}} [1 + ke^{i\varphi} + k^2e^{i2\varphi} + \dots + k^n e^{in\varphi}] = \bar{r}_{\text{Einzel}} \frac{1}{1 - k \cdot e^{i\varphi}} \\ &= \bar{r}_{\text{Einzel}} \cdot \left[\frac{1 - k \cos \varphi}{1 + k^2 - 2k \cos \varphi} + j \frac{k \cdot \sin \varphi}{1 + k^2 - 2k \cos \varphi} \right] \end{aligned}$$

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

In *Figur 9* ist die Ortskurve der Vektorspitze von $\bar{A} = \frac{\bar{r}_{\text{tot}}}{\bar{r}_{\text{Einzel}}}$ bei einem gegebenen Teilerschritt (mit f in GHz aus φ und l) und Einzeldämpfung in dB (aus k) in der komplexen Ebene aufgetragen. *Figur 10* zeigt den Verlauf der daraus resultierenden gerechneten Gesamtreflexion über den Frequenzbereich 1,5...18 GHz.

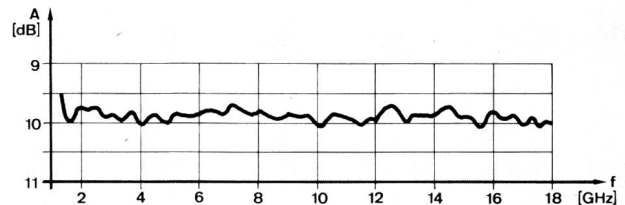


Fig. 11
Gemessener, typischer Dämpfungsverlauf eines 10-dB-Abschwächers

Fig. 9
Ortskurve der Vektorspitze \bar{A} in der komplexen Ebene

5 Reihenmessungen an 3-, 6-, 10- und 20-dB-Abschwächern und daraus abgeleitete Spezifikationen

In *Figur 11* ist ein typischer Dämpfungsverlauf eines 10-dB-Abschwächers über den Frequenzbereich 1,5...18 GHz dargestellt. Die Messunsicherheit beträgt hier $\pm 0,1$ dB. Reihenmessungen an 40 Abschwächern zu 10 dB sowie 20 Abschwächern zu 20 dB ergaben folgende maximale Sollwertabweichungen:

- Mittelwertabweichung der Dämpfung

$$\Delta A_o \leq \pm 2 \cdot 10^{-2} \text{ dB/dB}$$

- Frequenzgangabweichung der Dämpfung

$$\Delta A_f \leq \pm 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ dB/dB}$$

- Mittelwertabweichung mit Frequenzgangabweichung zusammen

$$\Delta A_o + \Delta A_f \leq \pm 4 \cdot 10^{-2} \text{ dB/dB}$$

- Temperaturbedingte Frequenzgangabweichung im Bereich -20 bis $+140^\circ \text{C}$ am Kühlkörper (Umgebungstemperatur -20 bis $+20^\circ \text{C}$) bei Belastungen P von $0 \dots 50$ W Dauerleistung

$$\Delta A_T \leq 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ dB/dB/}^\circ \text{C}$$

$\Delta A_o + \Delta A_f$ können zusammen als Toleranzgrenzen der Spezifikation verwendet werden, da die Temperaturabhängigkeitsschwankungen gut innerhalb dieser Grenzen gelegt werden können. Aus mechanischen Gründen ist für Abschwächer eine obere Dämpfungswertgrenze bei etwa 20 dB gegeben. Grössere Dämpfungswerte können durch Zusammensetzen erreicht werden. Zwischen 0,8

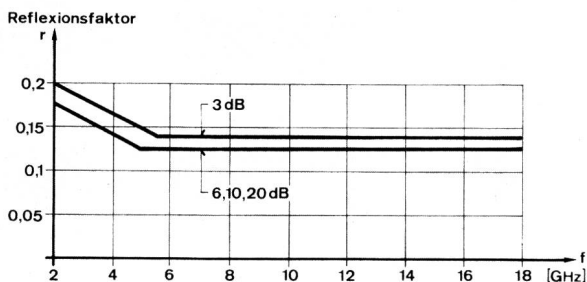


Fig. 12
Reflexionsspezifikation einer grösseren Serie von 3-, 6-, 10- und 20-dB-Abschwächern (Maximalwerte)

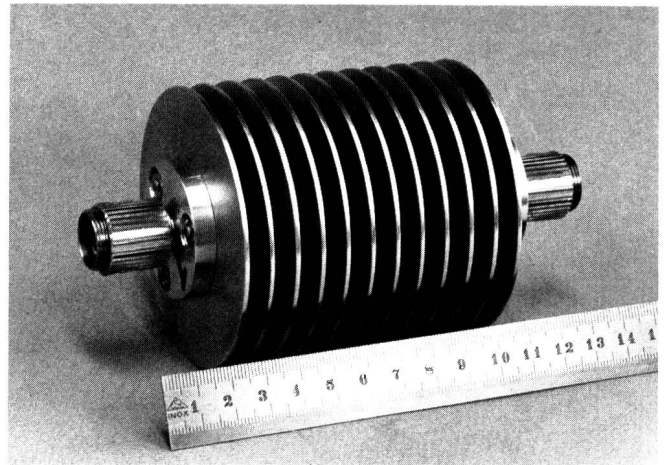


Fig. 13
Seriemässig hergestellter 10-dB-Abschwächer 1,7...18 GHz 50 W

und 20 dB kann jeder beliebige Dämpfungswert hergestellt werden. Die Reflexionsmaxima sind für verschiedene Dämpfungswerte in *Figur 12* gezeigt. Diese Reflexionen können auf Wunsch, unter Zwischenschaltung kleiner Leitungslängen zwischen die je 5 ersten Abschwächerelemente, im unteren Frequenzgebiet verbessert werden. Allerdings wird dadurch die Baulänge vergrössert.

6 Verfügbarkeit und Ausblick

Der beschriebene Abschwächer nach *Figur 13* ist seit einiger Zeit auf dem Komponentenmarkt erhältlich. Er wird von einer Lizenznehmerfirma hergestellt und vertrieben [3]. Einstellbare Abschwächer, die auf dem gleichen Grundaufbau beruhen, sollen im nächsten Entwicklungsschritt hergestellt werden. Seitdem auf dem Markt Koaxialsteckverbinder und andere Koaxialkomponenten bis zu einer oberen Frequenzgrenze von 40 GHz erhältlich sind, ist auch eine Abschwächer-Ausführung gleicher Art für den Frequenzbereich 4...40 GHz interessant geworden, da herkömmliche Konstruktionen bei Frequenzen oberhalb etwa 20 GHz versagen und bis heute niemand in der Lage ist, koaxiale Abschwächer für diesen Frequenzbereich anzubieten.

Bibliographie

- [1] Stäger C. Coaxial, Broad-band M/W. Attenuator with High Power Capability. Stockholm, Proceedings 1971, European Microwave Conference, Vol. 2/B10/3:1.
- [2] Meinke/Gundlach. Taschenbuch der Hochfrequenztechnik. Berlin, Springer Verlag, 1962, S. 265.
- [3] Stäger C. und Pochard D. Coaxial attenuators Handle 50 W over Multi-Octave Bands. Princeton, New Jersey, Microwave System News, May 1978, Vol. 8, No 5 p. 74.