

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: 32 (1954)

Heft: 6

Artikel: Flächenwiderstände in der Zentimeterwellentechnik

Autor: Severin, Hans

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-874475>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

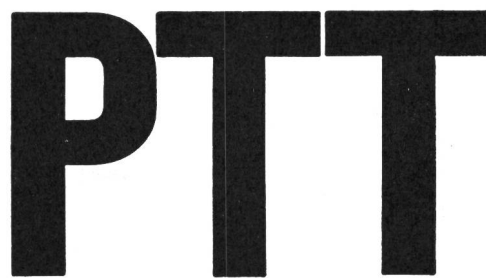
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 24.01.2026

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

TECHNISCHE MITTEILUNGEN

BULLETIN TECHNIQUE



BOLLETTINO TECNICO

Herausgegeben von der Schweizerischen Post-, Telegraphen- und Telephonverwaltung. Publié par l'administration des postes, télégraphes et téléphones suisses. Pubblicato dall'amministrazione delle poste, dei telegrafi e dei telefoni svizzeri

Flächenwiderstände in der Zentimeterwellentechnik*)

Von Hans Severin, Göttingen

621.396.692.029.64

Zusammenfassung. Ein Herstellungsverfahren für flächenhafte Kohleschichtwiderstände wird beschrieben. Besonderer Wert wird auf die Homogenität der Schichten gelegt, da der Flächenwiderstand auf eine Länge von etwa 30 cm möglichst konstant bleiben soll. Derartige Widerstandsstreifen werden in der Zentimeterwellentechnik beim Bau von Abschwächern und reflexionsfreien Abschlusswiderständen verwendet.

Résumé. L'auteur décrit un procédé de fabrication de résistances de surface formées de couches de charbon. L'homogénéité des couches présente une grande importance, la résistance de surface devant rester autant que possible constante sur une longueur de 30 cm environ. Des résistances de ce genre sont employées dans la technique des ondes centimétriques pour la construction d'atténuateurs et de résistances terminales sans réflexion.

Einleitung

Für die Zwecke der Zentimeterwellentechnik sind die in der Rundfunktechnik üblichen Schichtwiderstände nicht brauchbar. Man verwendet vielmehr zur Dämpfung leitungsgeführter Wellen flächenhaft ausgedehnte Widerstände (Widerstandsfolien), die parallel zum elektrischen Feld der Welle in die Leitung eingeführt werden können. Fig. 1 zeigt als Beispiele zwei Ausführungsformen eines variablen Abschwächers und einen reflexionsfreien Abschlusswiderstand für eine Hohlleitermessanordnung (Wellenlänge 7,5 cm).

Die charakteristische Grösse der Widerstandsfolien ist ihr «Flächenwiderstand» R_{\square} , d. i. der ohmsche Widerstand eines quadratischen Flächenstückes beliebiger Grösse; denn der Wert des Flächenwiderstandes ergibt sich unabhängig von der Kantenlänge a zu

$$R_{\square} = \frac{1}{\sigma \delta} [\Omega], \quad (1)$$

wenn δ die kleine Dicke und σ die Leitfähigkeit der homogen angenommenen Widerstandsschicht bedeuten (Fig. 2).

Nach ihrem Herstellungsverfahren unterscheidet man heute im wesentlichen zwei Typen von Widerstandsschichten:

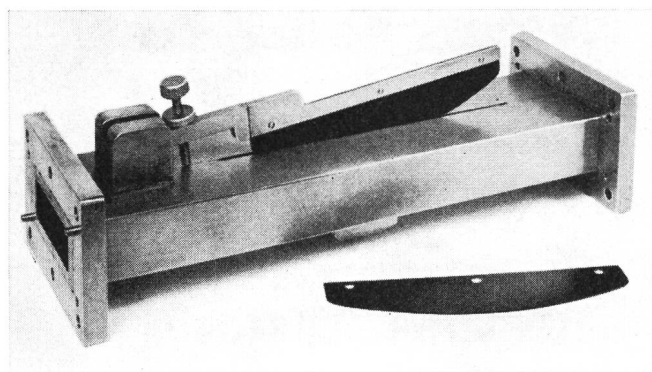
1. Auf einen dünnen Träger aus Isoliermaterial (Delit, Pertinax) wird eine kolloidale Aufschwemmung feinsten Kohleteilchen aufgebracht. Durch ein geeignetes Mischungsverhältnis zwischen Graphit und Lösungsmittel und durch die Schichtdicke kann der gewünschte Flächenwiderstand erzielt werden.

2. Dünne Metallschichten (z. B. Pt, Mn) werden im Vakuum auf einen Träger (Glas, Plexiglas) aufgedampft und der gewünschte Flächenwiderstand durch die Schichtdicke eingestellt.

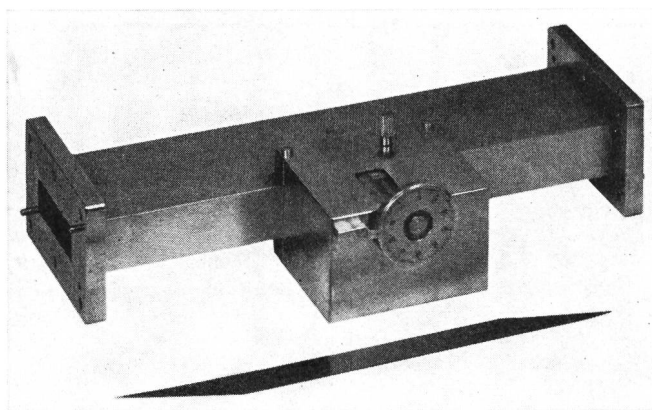
Im Rahmen des Aufbaus eines Hohlleitermessplatzes entstand u. a. auch die Aufgabe, derartige flächenhafte Widerstände herzustellen. Bei einer Arbeitsfrequenz von 4000 MHz und einer Hohlrohrwellenlänge von etwa 11 cm sind zum Beispiel für einen Abschlusswiderstand sehr kleiner Reflexion nach Figur 1c Widerstandsstreifen von etwa 30 cm Länge und der Breite des Hohlleiters (1,7 cm) erforderlich; dabei kommt es erfahrungsgemäss nicht so sehr auf den Absolutwert des Flächenwiderstandes an als vielmehr darauf, dass sein Wert längs des Streifens überall derselbe ist, da Änderungen im Flächenwiderstand Anlass zu unerwünschten Reflexionen geben können.

Bei nicht Vorhandensein einer geeigneten Aufdampf- oder Kathodenzerstäubungsapparatur schien das Herstellungsverfahren 1 das einfachere. Es wurde also versucht, Widerstandsfolien unter Verwendung von kolloidalen Graphitaufschwemmungen, wie man sie beispielsweise zur Abschirmung von elektrischen Apparaten benutzt, durch Aufbringen auf einen Kunststoffträger (Delit, Pertinax) selbst herzustellen.

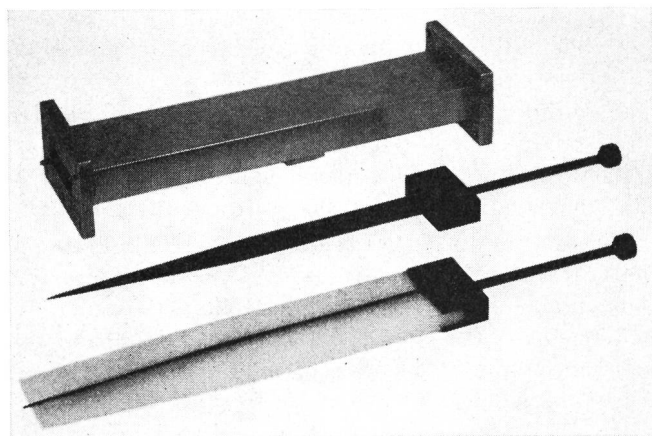
*) Die vorliegende Arbeit entstand 1952 an der Forschungs- und Versuchsanstalt der Generaldirektion PTT in Bern. Über die Ergebnisse wurde auf dem Deutschen Physikertag 1952 in Berlin vorgetragen. Mein besonderer Dank gebührt Herrn F. Rohrer, Leiter der Technischen Werkstätten, für seine unermüdlichen Bemühungen bei der Herstellung der Widerstandsschichten.



a



b



c

Fig. 1 a...c. a, b: Variable Abschwächer (etwa 20 dB); c: reflexionsfreier Abschlusswiderstand für eine Hohlleitermessanordnung ($\lambda = 7,5$ cm)

Nach einer Reihe von Vorversuchen ergab sich ein bestimmtes Verfahren hinsichtlich der Art des Aufbringens der leitenden Substanz auf den Träger, hinsichtlich der Auswahl der Graphitaufschwemmungen (in Wasser oder Alkohol), hinsichtlich ihrer Verdünnung, des Trocknungsprozesses, der Schichtenzahl usw. Über die Einzelheiten des Herstellungsverfahrens und die erzielten Ergebnisse wird im folgenden berichtet.

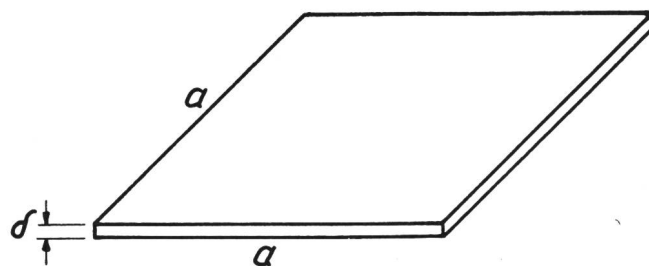
Die Herstellung der Widerstandsfolien

Als Ausgangsprodukte standen folgende Präparate kolloidaler Graphitaufschwemmungen zur Verfügung *):

Aquadag	}	kolloidales Graphit in Wasser
Dag Dispersion 479		
Dag Dispersion 450	}	kolloidales Graphit in Naphta
Dag Dispersion 80		
		kolloidales Graphit in Alkohol

Dag Dispersion 479 hat gegenüber Aquadag einen geringfügigen Zusatz eines Kunstharzes, wodurch die Schichten besser haften und beim Trocknen im Ofen gut härten. Der Flächenwiderstand ist unter gleichen Bedingungen niedriger als bei Aquadag. Die leicht flüchtigen Dispersionen 450 und 80 haben den Vorzug, gewisse Oberflächen wesentlich besser zu benetzen als die wässrigen Produkte und an der Luft schneller zu trocknen, führen jedoch auf Schichten von viel höherem Flächenwiderstand (ungefähr Faktor 100 gegenüber entsprechenden Schichten aus wässrigem Material). Die verschiedenen Präparate können bei Bedarf noch weiter verdünnt werden, wobei man sich zweckmässig an die in den Informationen der Herstellerfirma angegebenen Rezepte hält. Es wurde zum Beispiel versucht, dem Präparat Dag Dispersion 479 ein leicht flüchtiges Lösungsmittel, wie Azeton, Alkohol, Benzol, zuzusetzen, um den Trocknungsprozess zu beschleunigen. Eine homogene Durchmischung konnte indessen nicht erzielt werden, vielmehr bildeten sich — vermutlich wegen des Kunstharzzusatzes — kleine Graphitklümpchen, wodurch das Gemisch für eine weitere Verwendung unbrauchbar wurde.

*) Acheson Colloids Limited, 18, Pall Mall, London SW 1.



$$R_{\square} = \frac{a}{\sigma \delta a} = \frac{1}{\sigma \delta} [\Omega]$$

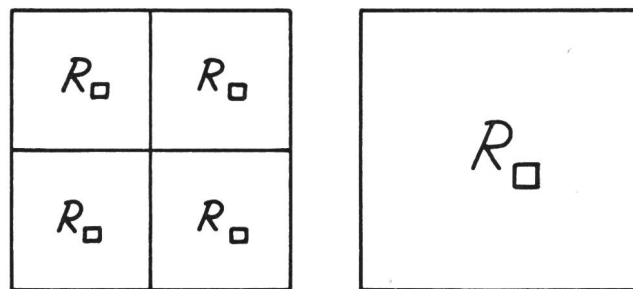


Fig. 2. Zur Definition des Flächenwiderstandes

Das Aufbringen des Präparates auf einen geeigneten Träger kann durch Streichen, Eintauchen des Trägers oder Aufspritzen erfolgen. Nach einigen Vorversuchen zeigte sich, dass die Forderung nach einer möglichst homogenen Widerstandsschicht nur nach dem dritten Verfahren verwirklicht werden konnte. Als Träger dienten Delit- (= Pertinax-)Streifen von 550 mm Länge, 40 mm Breite und 0,5 mm Dicke; sie wurden zur Erzielung eines gleichmässigen Vorschubs auf ein Holzrad von 720 mm Umfang und 34 mm Felgenbreite aufgespannt, das über Motor und Getriebe mit konstanter Geschwindigkeit gedreht werden konnte, während mit fest eingespannter Spritzpistole horizontal aufgespritzt wurde. Als günstigste Daten wurden ermittelt: Drehzahl des Rades: 30 min^{-1} , Entfernung zwischen Düse der Spritzpistole und Träger 30 cm, Düse mit Regulierung für Flachstrahl, Durchmesser der Düse etwa 1 mm, Spritzdruck 3...4 Atm. Nach Aufbringen der für einen gewünschten Flächenwiderstand erforderlichen Schichtenzahl wurden die Streifen zunächst an der Luft getrocknet und sodann $1\frac{1}{2}$ bis 2 Stunden im Ofen bei 120°C gehärtet. Nach dem Abkühlen wurde an den Rändern auf einer Breite von je 5 mm der Widerstandsbelag mit einem scharfen Messer abgekratzt, weil dort die Schwankungen im Flächenwiderstand am grössten waren. Im Endzustand hat man also Widerstandsstreifen von etwa 50 cm Länge und 3 cm Breite, die schliesslich noch mit einer Lack-schutzschicht versehen wurden.

Für die Herstellung unserer Widerstandsschichten wurden von den vorgenannten Graphitaufschwemmungen die Präparate Dag Dispersion 80 und Dag Dispersion 479 verwendet. Im Laufe der Untersuchungen zeigte sich, dass zwei verschiedene Lieferungen desselben Präparates unter sonst gleichen Bedingungen auf durchaus verschiedene Flächenwiderstandswerte führten, wahrscheinlich wegen teilweiser Verdunstung des Lösungsmittels, zum Beispiel bei längerer Lagerung. Eine Kontrolle des Flächenwiderstandes während des Aufspritzens führte nicht zum Erfolg, da der Flächenwiderstand beim Trocknen der Schicht innerhalb weniger Minuten um den Faktor 10...20 abnahm. Die Schwierigkeit wurde daher so behoben, dass die Leitfähigkeit des Spritzgutes durch Zusetzen von Lösungsmittel auf einen bestimmten Wert eingestellt wurde; dadurch konnten die Flächenwiderstände der aufgespritzten Schichten gut reproduziert werden. Zur Bestimmung der Leitfähigkeit wurden zwei Elektroden in der Form einer coaxialen Leitung ($2 r_a = 11 \text{ mm}$, $2 r_i = 5 \text{ mm}$) 50 mm tief in das Spritzgut eingetaucht und der Widerstand der von den Elektroden eingeschlossenen Flüssigkeits-säule mit einer technischen Wechselstrombrücke (Philoskop, 1000 Hz) gemessen. Unter der Annahme eines homogenen Mediums besteht zwischen seinem spezifischen Widerstand ϱ und dem gemessenen Widerstand R der Zusammenhang

$$R = \frac{\varrho}{l} \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r_a}{r_i},$$

wenn l die Eintauchtiefe der Elektroden bedeutet. Mit den angegebenen Zahlenwerten von r_a , r_i und δ ergibt sich in unserem Falle

$$\varrho = 0,4 \cdot R [\Omega \cdot \text{m}]$$

Dag Dispersion 80 wurde mit Azeton ($\varrho = 0,5 \cdot 10^6 [\Omega \cdot \text{m}]$), Dag Dispersion 479 mit destilliertem Wasser ($\varrho \approx 10^4 [\Omega \cdot \text{m}]$) verdünnt. Wie Fig. 3 zeigt, nimmt im untersuchten Bereich der spezifische Widerstand ϱ nahezu linear mit der Verdünnung zu.

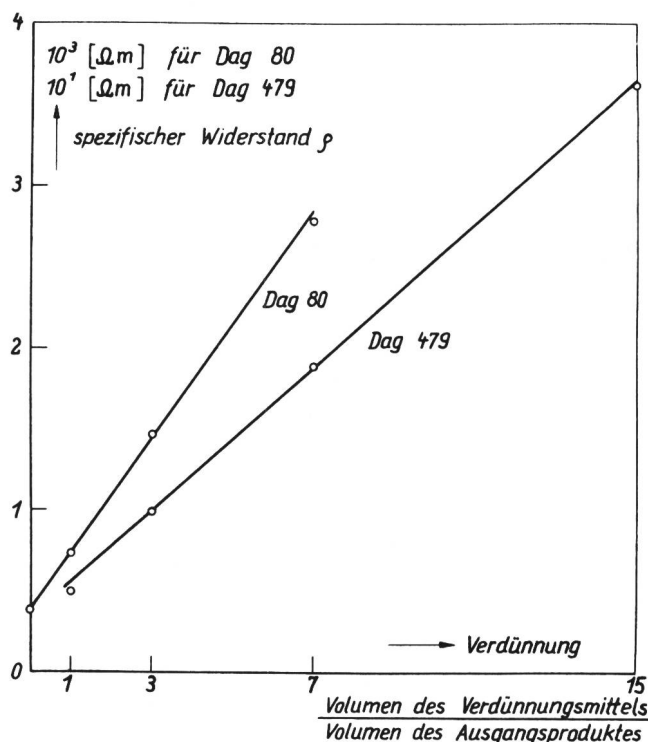


Fig. 3. Spezifischer Widerstand kolloidaler Graphitaufschwemmungen. Abhängigkeit von der Verdünnung. Verdünnungsmittel für Dag 80: Azeton, $\varrho = 0,5 \cdot 10^6 [\Omega \cdot \text{m}]$. Verdünnungsmittel für Dag 479: aqua dest., $\varrho \approx 10^4 [\Omega \cdot \text{m}]$

Bei Voruntersuchungen über die mit verschiedenen Verdünnungen bei einer Spritzung nach dem oben skizzierten Verfahren erzielbaren Flächenwiderstände ergab sich zunächst, dass Dag Dispersion 80 Werte von etwa $500 \text{ k}\Omega$ lieferte. Da der für unsere Zwecke interessierende Wertebereich zwischen 200Ω und 800Ω liegt, kam dieses Präparat für die Herstellung der Widerstandsstreifen nicht in Frage. Indessen konnte es gut zu ihrer Grundierung benutzt werden, weil es den Träger wesentlich besser benetzt als die wässrige Lösung Dag Dispersion 479; ausserdem hat der hohe Flächenwiderstand auf den Endwert überhaupt keinen Einfluss, so dass bei dieser Art der Grundierung keine besondere Sorgfalt für die Erzielung homogener Schichten erforderlich ist. Daher wurden auf sämtlichen Streifen zunächst drei Lagen eines Dag-80-Azeton-Gemisches (Verdünnung 1:3) aufgespritzt. Der Flächenwiderstand war nach dem Trocknen und Härten durchweg grösser als $1 \text{ M}\Omega$.

Auf die so präparierten Streifen wurde nun Dag Dispersion 479 in verschiedenen wässrigen Verdünnungen unter möglichster Konstanzhaltung aller anderen Bedingungen aufgespritzt; dabei ergaben sich die in *Tabelle 1* zusammengestellten Flächenwider-

Tabelle 1: Richtwerte des Flächenwiderstandes für Dag 479 in verschiedenen wässrigen Verdünnungen

Dag 479 + H ₂ O	Verdünnung			
	1:1	1:3	1:7	1:15
	Flächenwiderstand $R_a [\Omega]$			
1 Lage	1000	1600	2500	15000
2. Lage nach Antrocknen der ersten	480	700	1200	6600
2 Lagen, ohne Unterbrechung gespritzt	550	800	1300	8000

stände. Die Angaben sind als Richtwerte zu verstehen, da sie natürlich sehr stark von den Herstellungsbedingungen, zum Beispiel von der Beschaffenheit der Düse u. a., abhängen. Zudem schwankt wegen der geringen Zahl der Lagen der Flächenwiderstand längs des Streifens noch erheblich um die angegebenen Mittelwerte. Immerhin kann man daraus ersehen, dass über einen weiten Bereich der Verdünnung der Flächenwiderstand von zwei Lagen etwa halb so gross ist wie für eine. Aus der Abhängigkeit des Flächenwiderstandes von der Konzentration des Spritzgutes — der spezifische Widerstand ρ der in zwei aufeinanderfolgenden Spalten verwendeten Präparate unterscheidet sich jeweils um den Faktor 2 — kann geschlossen werden, dass die Menge des je Zeiteinheit durch die Düse gehenden Gemisches keineswegs für alle Verdünnungen dieselbe ist, was auch nicht zu erwarten war. Jedenfalls sind diese empirischen, für unser Spritzverfahren geltenden und auch recht gut reproduzierbaren Flächenwiderstandswerte erste Anhaltspunkte für das Herstellungsverfahren unserer Widerstandsstreifen. Die bei einer Spritzung noch vorhandenen, Zufälligkeiten zuzuschreibenden Schwankungen des Flächenwiderstandes längs des Streifens werden sicher bei mehreren Lagen durch eine gewisse Statistik ausgeglichen, womit man eine grössere Homogenität der Gesamtschicht erhält. Diese Überlegung konnte in einer Reihe von Versuchen tatsächlich bestätigt werden; damit scheiden die Verdünnungen 1:1 und 1:3 für die Herstellung aus, da mit ihnen der interessierende Flächenwiderstandswert nach 2 bis 3 Lagen erreicht wird.

Bei den weiteren Untersuchungen mit 1:7 bzw. 1:15 verdünnten Mischungen wurden zur Verkürzung des Arbeitsganges jeweils zwei Lagen aufgespritzt und an der Luft getrocknet. In Fig. 4 sind die reziproken Werte des Flächenwiderstandes über der Zahl der Lagen aufgetragen. Die lineare Zunahme des Flächenleitwertes lässt sich durch die plausible Vorstellung erklären, dass der Widerstand jeder neu aufgespritz-

ten Lage zum Widerstand der vorher vorhandenen Schicht parallel geschaltet wird. Dieser Befund gilt auch dann noch, wenn Lagen aus einer Verdünnung 1:7 mit solchen aus einer Verdünnung 1:15 kombiniert werden, wie entsprechende Versuche zeigten. Damit kann man bei bekanntem Flächenwiderstand einer einzelnen Lage das «Rezept» für die Herstellung einer Schicht von bestimmtem Flächenwiderstand angeben.

Erfahrungsgemäss ist für die spätere Verwendung in der Zentimeterwellentechnik der Absolutwert des Flächenwiderstandes gar nicht so entscheidend; vielmehr muss man mit abnehmender Wellenlänge auf die Homogenität der Widerstandsschicht bedacht sein, da Änderungen im Flächenwiderstand Anlass zu unerwünschten Reflexionen geben können. Die nach dem soeben beschriebenen Verfahren hergestellten Widerstandsstreifen mit 6...10 Lagen wiesen über die gesamte Länge von 50 cm noch Schwankungen im Widerstand von maximal $\pm 10\%$ auf, mitunter waren auf Teillängen bis zu 25 cm die Schwankungen kleiner als $\pm 5\%$. Um dieses Ergebnis noch zu verbessern, wurde versucht, die niederohmigen Teile eines Streifens durch individuelle Bearbeitung mit einem Radiergummi, später mit einer feinen Messingdrahtbürste, durch Verkleinerung der Schichtdicke hochohmiger zu machen. Indessen trat dabei der umgekehrte Effekt ein, der Flächenwiderstand wurde wesentlich kleiner und nahm bis auf 65% des ursprünglichen Wertes ab! Die Erklärung dafür ist die, dass das nach Verflüchtigung des Lösungsmittels übrigbleibende Kohlegerüst sehr locker ist und dass sich die Kohleteilchen durch den bei der Bearbeitung auftre-

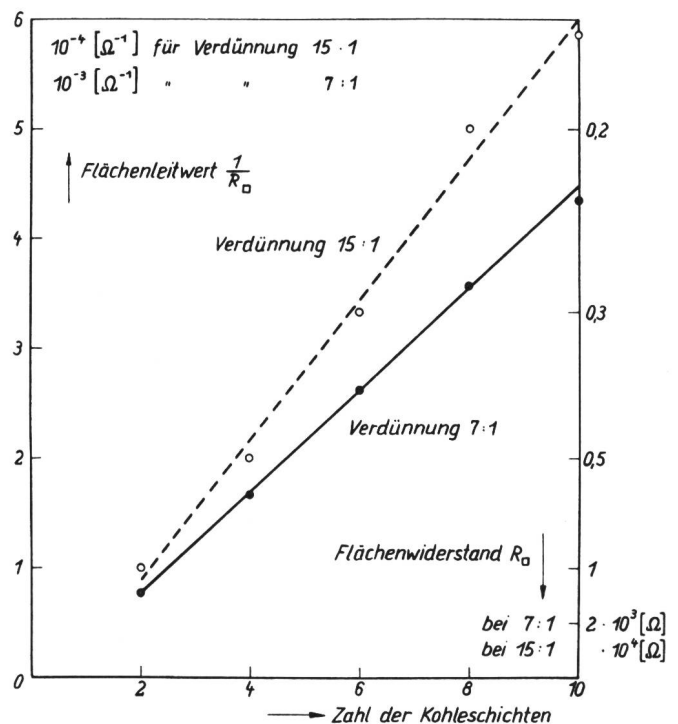


Fig. 4. Flächenleitwert bzw. Flächenwiderstand in Abhängigkeit von der Zahl der aufgespritzten Lagen von Dag 479, mit dem 7- bzw. 15fachen Volumen aqua dest. verdünnt

tenden Druck enger aneinanderlagern, wodurch der Übergangswiderstand zwischen ihnen geringer wird. Diese Überlegung wird bestätigt durch die Beobachtung, dass nach anfänglicher Widerstandsabnahme von einem gewissen Minimum des Widerstandes an bei weiterem «Radieren» der Flächenwiderstand wieder zunimmt. Es gelang auf diese Weise die Herstellung von Widerstandsstreifen, die über ihre gesamte Länge von 50 cm im Flächenwiderstand nicht mehr als $\pm 3\%$ schwankten: Streifen von $600 \pm 60 [\Omega]$ Flächenwiderstand hatten nach dem Bürsten einen solchen von $400 \pm 10 [\Omega]$.

Da für die Belange der Zentimeterwellentechnik ein direkter elektrischer Kontakt mit der Widerstandsschicht nicht erforderlich ist, wurde auf die fertigen Streifen noch eine Lackschicht zum Schutz gegen mechanische Beschädigungen und Witterungs-(Feuchtigkeits-) Einflüsse aufgebracht. Beim Aufspritzen von gewöhnlichem farblosem Lack wurde nach dem Trocknen ein bis 50 % höherer Gesamtwiderstand des Streifens gemessen als vor dem Lackieren. Die Lackmoleküle werden sich also in das Kohlegerüst einlagern und dadurch vorher bestehende «Brücken» zerstören. Daher wurden verschiedene Kunstharzlacke (grössere Moleküle!) versucht und schliesslich «Polyweld 912»^{*}, d. i. reines Polystyren in Lösung, verwendet. Es handelt sich dabei um einen farblosen, durchsichtigen Lack mit sehr guten dielektrischen Eigenschaften, der aufgestrichen wird^{**}) und nach dem Trocknen an der Luft (etwa 5 Minuten) eine harte durchsichtige Schicht von reinem Polystyren ergibt. Der Gesamtwiderstand des Streifens erhöht sich dabei um etwa 10 %. Zur Prüfung, inwieweit die Homogenität des Flächenwiderstandes bei dieser Behandlung beeinflusst wird, wurde bei einigen Widerstandsstreifen die Kohleschicht in Abständen von 3 cm durch 3 mm breite Ölpapierfalze abgedeckt, die nach dem Lackieren entfernt wurden. Die vom Lack freien Stellen erlaubten die Messung des Flächenwiderstandes längs des ganzen Streifens, und es zeigte sich, dass die Widerstandszunahme überall die gleiche war, so dass also die Homogenität des Widerstandsbelages durch das Lackieren nicht gelitten hatte.

Messung des Flächenwiderstandes mit Gleichstrom

Die einfachste und für eine erste Orientierung ausreichende Methode ist die, dass man zwei Elektroden von der Breite der Streifen auf den Widerstandsbelag presst, und zwar derart, dass sie ein quadratisches Flächenstück abgrenzen. Der zum Beispiel in einer Brücke (Pontavi) gemessene Widerstand ist gleich dem Flächenwiderstand. Wesentlich dabei ist, dass die Elektroden gut angedrückt werden, damit wirklich die Gesamtdicke δ der Schicht erfasst wird (s. Gleichung (1)!).

^{*}) Präparat der Amphenol (American Phenolic Corporation), 1830 South 54th Avenue, Chicago 50, Illinois.

^{**}) Beim Spritzen ohne hinreichende Verdünnung bilden sich an der Düse Fäden, wie bei der Herstellung von Kunstfasern.

Nach diesem Verfahren wurden die gefertigten Widerstandsstreifen auf ihre Homogenität untersucht. Die Elektroden, die entsprechend einer Streifenbreite von 3 cm jeweils eine Fläche von 9 cm^2 einschlossen, waren durch ein Isolierstück und einen Stahlklotz zu einer Art «Stempel» zusammengefügt. In einem Vorversuch wurden die Werte des Flächenwiderstands längs eines Streifens vor der Nachbehandlung in Abständen von 3 cm, 2 cm und 1 cm gemessen. Die Ergebnisse sind in Fig. 5 dargestellt; man ersieht daraus, dass Messungen in Abständen von 1 cm vollauf ausreichen, um den tatsächlichen Verlauf des Flächenwiderstandes wiedergeben zu können.

Der Verlauf des Flächenwiderstandes eines Widerstandsstreifens vor und nach der Bearbeitung mit der Messingdrahtbürste ist in Fig. 6c und 6d dargestellt; die beiden Kurven lassen die Wirksamkeit dieser Behandlung deutlich erkennen. Vergleichsweise zeigen Fig. 6a und 6b Messungen an kommerziellen^{*}) Widerstandsstreifen (Länge $12,5'' \approx 32 \text{ cm}$, Breite $1,75'' \approx 4,4 \text{ cm}$) vom Flächenwiderstand 400Ω .

Bei dem beschriebenen Verfahren der Messung quadratischer Flächenstücke sind diese noch relativ gross und ausserdem können die Schwankungen des Flächenwiderstandes über die Breite des Streifens nicht erfasst werden, wenn man ihn nicht in mehrere Streifen kleinerer Breite zerschneiden will. Es ist daher naheliegend, auf die Quadratflächen zu verzichten und an Stelle der bisher verwendeten Elektroden solche zu benutzen, die ein kleines Flächenstück *völlig* einschliessen, also zum Beispiel im einfachsten Falle kreiskonzentrische Elektroden. Während der Widerstand eines quadratischen Flächenstückes gleich seinem Flächenwiderstand ist, muss bei anders geformter Fläche der Zusammenhang zwischen dem von den Elektroden eingeschlossenen Widerstand R und dem Flächenwiderstand R_{\square} der Folie rechnerisch aus der Geometrie der Elektroden ermittelt werden. Ganz allgemein ist der Widerstand des von den Elektroden 1 und 2 berandeten Flächenstückes vom homogenen Flächenwiderstand R_{\square} gegeben durch

$$R = \frac{U}{\mathfrak{E}},$$

wobei die Spannung U zwischen den Elektroden mit der Feldstärke \mathfrak{E} durch

$$U = \int_1^2 (\mathfrak{E} \, ds) = \int_1^2 E_s \, ds$$

verknüpft ist, während der gesamte durch die Schicht fliessende Strom (Fig. 7)

$$J = \oint (j \, df) = \sigma \oint (\mathfrak{E} \, df) = \sigma \delta \oint E_s \, dq$$

ist, wobei das Ringintegral über einen beliebigen geschlossenen Weg zwischen den Elektroden, also zum Beispiel auch über die Randlinie einer Elektrode selbst zu nehmen ist. Insgesamt hat man für

^{*}) International Resistance Co., 401 N. Broad St., Philadelphia 8.

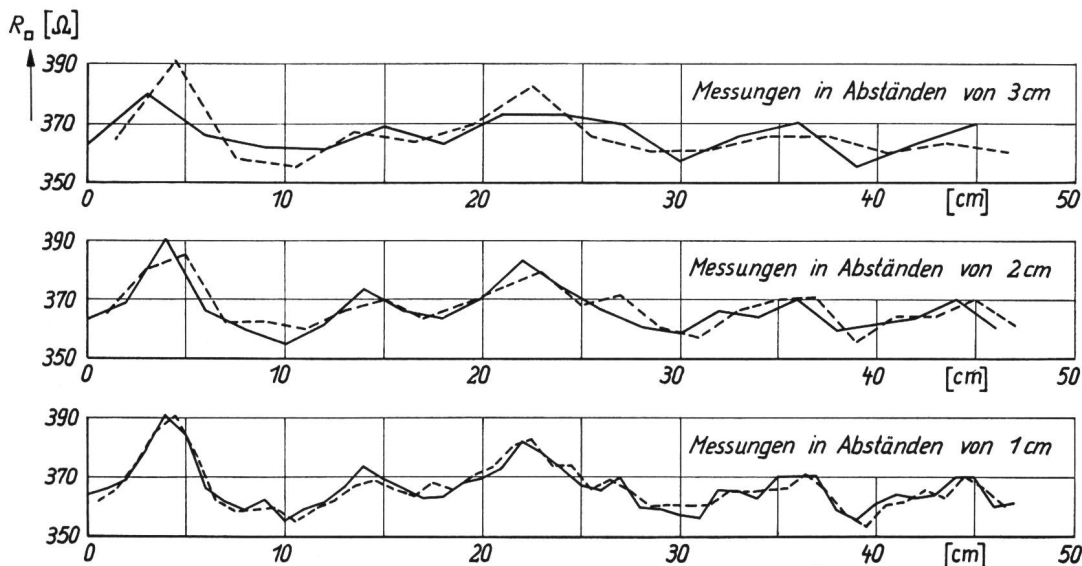


Fig. 5.
Messung des Flächenwiderstandes an einem selbst hergestellten Widerstandsstreifen. Die Messpunkte der gestrichelten Kurve sind um 1,5 cm, 1 cm, 0,5 cm gegen die Messpunkte der ausgezogenen Kurve verschoben

$$R = \frac{\int_1^2 E_s ds}{\sigma \oint E_s^{(1)} d\varrho} = R_{\square} \frac{\int_1^2 E_s ds}{\oint E_s^{(1)} d\varrho} \quad (2)$$

Im Falle kreiskonzentrischer Elektroden mit den Radien r_i und r_a lassen sich die Integrale leicht angeben. Mit

$$E_s = E_{\text{radial}} = E(r_i) \cdot \frac{r_i}{r}$$

erhält man

$$R = R_{\square} \cdot \frac{E(r_i) r_i \ln \frac{r_a}{r_i}}{E(r_i) 2\pi r_i} = R_{\square} \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r_a}{r_i} \quad (3)$$

Zu einer besonders einfachen und eleganten Schreibweise dieses Ergebnisses gelangt man durch Einführung eines Begriffes aus der Leitungstechnik, nämlich des Leitungswellenwiderstandes Z , der für eine koaxiale Leitung den Wert

$$Z = \frac{1}{2\pi} Z_0 \ln \frac{r_a}{r_i} \quad (4)$$

hat. Dabei ist Z_0 der Feldwellenwiderstand des freien Raumes für transversale elektromagnetische Wellen

$$Z_0 = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 [\Omega] \quad (5)$$

Durch Zusammenfassung von (3) und (4) ergibt sich

$$R = R_{\square} \frac{Z}{Z_0} \quad (6)$$

und dieses Ergebnis gilt, wie kurz gezeigt werden soll, völlig allgemein für Doppelleitungen beliebiger Form.

Der Leitungswellenwiderstand Z ist für jede Querschnittsebene definiert durch das Verhältnis von Spannung zwischen den Leitern zu Strom im Leiter, also

$$Z = \frac{U}{J} = \frac{\int_1^2 E_s ds}{\oint H_t d\varrho}$$

wobei das Ringintegral über die Randlinie des einen Leiters zu erstrecken ist und H_t das dort tangential zum Leiter, senkrecht zu den Stromlinien verlaufende

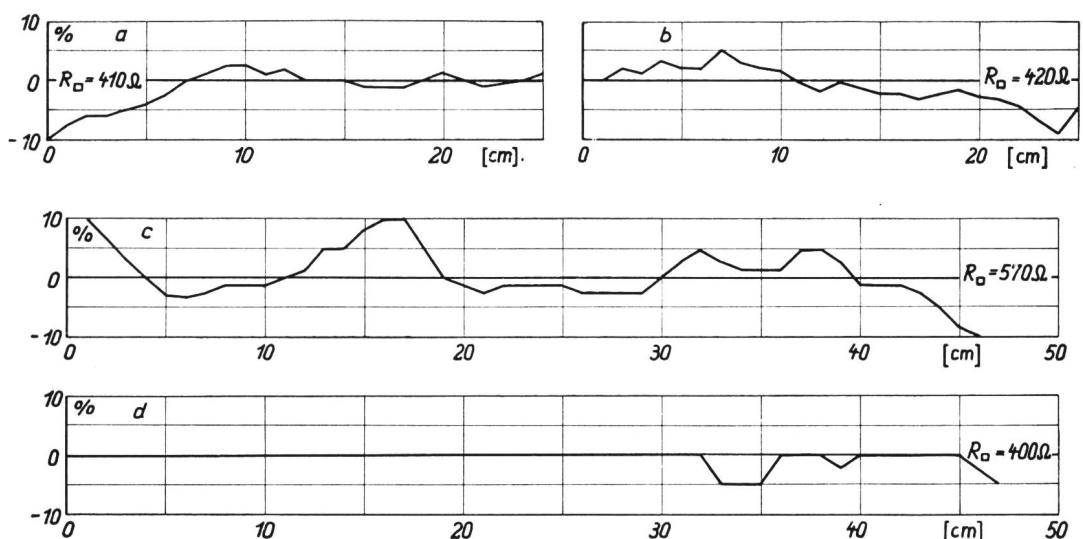


Fig. 6.
Werte des Flächenwiderstandes längs verschiedener Widerstandsstreifen, gemessen in Abständen von 1 cm
a, b: Widerstandsstreifen der International Resistance Company;
c: selbst hergestellter Widerstandsstreifen;
d: derselbe Widerstandsstreifen, nach Bearbeitung

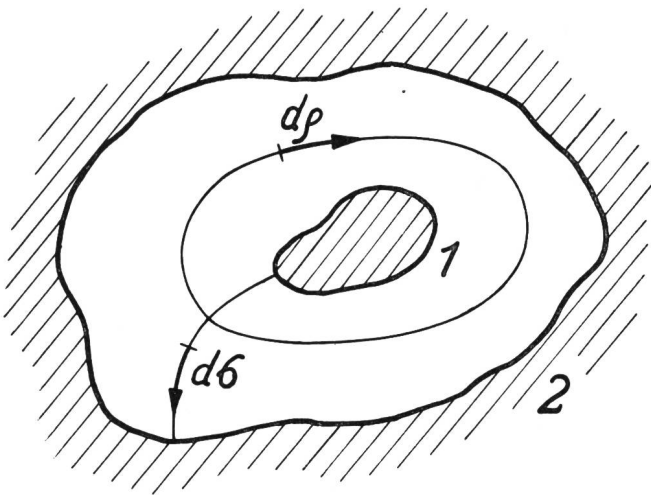


Fig. 7. Querschnitt einer Doppelleitung

Magnetfeld bedeutet. Durch Einführung des Feldwellenwiderstandes gemäss (5) erhält man

$$Z = Z_0 \frac{\int_1^2 E_s ds}{\oint E_s^{(1)} d\varrho}$$

und durch Kombination mit (2) folgt wiederum (6), jetzt für Doppelleitungen beliebiger Form.

Dieses für die Theorie der Leitung fundamentale Ergebnis lässt zwei Lesarten zu:

1. Jede Doppelleitung beliebiger Form kann durch eine Widerstandsfolie vom Flächenwiderstand $R_{\square} = Z_0 = 377 \Omega$ über ihren Querschnitt reflexionsfrei abgeschlossen werden.
2. Der Wellenwiderstand Z jeder Doppelleitung, insbesondere für der Rechnung schwer zugängliche Formen, kann in einfacher Weise gemessen werden: Man drücke die Leitung oder gegebenenfalls ein maßstäblich vergrößertes Modell gegen eine $377\text{-}\Omega$ -Folie und messe den Widerstand zwischen den beiden Elektroden, der gleich dem Wellenwiderstand der Leitung ist [1].

Die Umkehrung der zweiten Lesart machen wir uns hier zunutze, indem wir nämlich eine koaxiale Doppelleitung mit genau angebbarem Z verwenden und aus der Messung von R den Wert von R_{\square} bestimmen. Bei dem hier gebauten Messgerät wurde $Z = 37,69 \Omega$ gewählt; dann hat man nämlich gemäss (6) den nach Andrücken der Elektroden auf eine Folie gemessenen Widerstand R nur noch mit dem Faktor 10 zu multiplizieren, um den gesuchten Flächenwiderstand R_{\square} zu erhalten. Gibt man den Radius des Aussenleiters mit $r_a = 5 \text{ mm}$ vor und lässt für die Unsicherheit in Z insgesamt $\frac{\Delta Z}{Z} = 1,5 \%$ zu, das heisst

also für jede der drei möglichen Fehlerquellen (Innenleiter- und Aussenleiterradius, Exzentrizität beider Leiter) $0,5 \%$, so erhält man aus (4) für den Wert von r_i und die maximal zulässigen Toleranzen

$$\begin{aligned} r_i &= 2,668 \pm 0,003 \text{ [mm]} \\ r_a &= 5 \pm 0,005 \text{ [mm]} \\ e &\leq 0,25 \text{ [mm]} \end{aligned}$$

Figur 8 zeigt die Ausführung des kleinen Messgerätes. Durch eine Schraubvorrichtung werden die Elektroden gegen die auf einer planen Metallplatte liegende Folie gedrückt, bis das angeschlossene Brückeninstrument bei weiterem Anziehen der Schraube seinen Ausschlag nicht mehr verändert. Dann ist sichergestellt, dass die gesamte Dicke der Schicht erfasst und definitionsgemäss der Wert des Flächenwiderstandes gemessen wird.

Einer unserer Streifen wurde mit diesem Gerät auf die Homogenität des Flächenwiderstandes untersucht, indem entsprechend $2r_a = 1 \text{ cm}$ von Zentimeter zu Zentimeter über die Streifenbreite jeweils drei Messungen gemacht wurden. Es zeigte sich, dass in kleinen Bereichen noch erhebliche Schwankungen im Flächenwiderstand vorhanden sind (bis zu $\pm 10\%$), während bei der «integrierenden» Messung die Schwankungen an dem untersuchten Streifen nur $\pm 2\%$ betrugen.

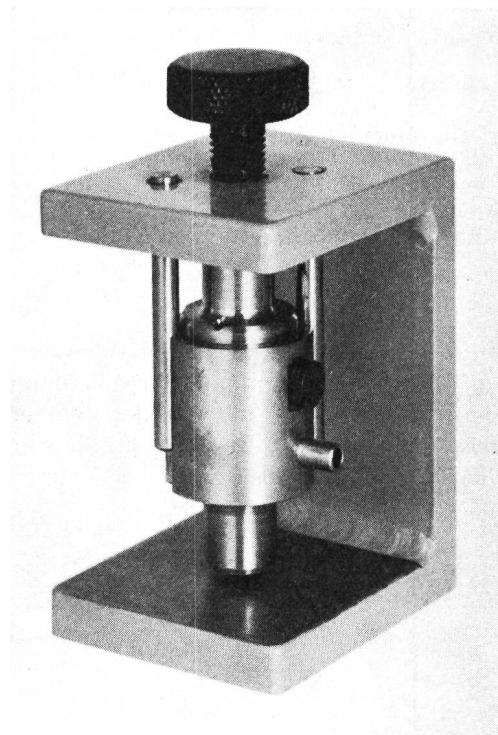


Fig. 8. Gerät zur Messung von Flächenwiderständen

Es sei abschliessend noch erwähnt, dass sich unser Messgerät bei einiger Vorsicht auch zur Messung des Flächenwiderstandes von Metallaufdampfschichten auf Glas eignet. Dies konnte an versuchsweise hergestellten kleinen Proben von Mn-Schichten durch Vergleich mit anderen Verfahren (Schichtdickenbestimmung durch Wägung oder optisch) festgestellt werden.

Messung des Flächenwiderstandes bei 3700 MHz

Wird ein Hohlleiter vom Wellenwiderstand Z durch eine beliebige Impedanz \Re abgeschlossen, so entstehen durch Reflexion an ihr stehende Wellen. Der Reflexionsfaktor r , d. i. das Amplitudenverhältnis der Feldstärken von reflektierter zu einfallender Welle in der Eingangsebene der Impedanz, bestimmt \Re vollständig gemäss

$$r = \frac{\Re - Z}{\Re + Z} \quad (7)$$

Bei der Messung des HF-Widerstandes unserer Kohlenfolien interessiert nur der die Dämpfung bestimmende Wirkwiderstand. Eine Blindkomponente, die möglicherweise in der Schicht selbst vorhanden bzw. durch den dünnen verlustfreien Träger bedingt ist, kann durch einen verschiebbaren Kurzschluss hinter der Folie kompensiert werden. Dieser lässt sich jedenfalls so einstellen, dass der Eingangswiderstand am Ort der Kohlenschicht rein ohmisch wird; damit ist auch der Reflexionsfaktor reell und aus (7) wird

$$\frac{Z}{R} = \frac{1+r}{1-r} = d \text{ für } R < Z \text{ und } \frac{R}{Z} = d \text{ für } R > Z, \quad (8)$$

wobei d die «Welligkeit» bedeutet, d. i. das Amplitudenverhältnis $\frac{E_{\max}}{E_{\min}}$ der stehenden Welle. Definiert man für eine Querschnittsebene des unendlich langen Hohlleiters das Verhältnis $\frac{E_{\text{tang}}}{H_{\text{tang}}}$ als seinen Wellenwiderstand Z , so gilt für alle TE-Wellen

$$Z = Z_0 \frac{\lambda_R}{\lambda}; \quad (9)$$

dabei ist Z_0 durch (5) erklärt, λ ist die Wellenlänge im freien Raum und λ_R die Rohrwellenlänge. Mit dieser Definition von Z ist in (8) R der Flächenwiderstand der verwendeten Folie, weil nämlich in jedem Punkt der Widerstandsebene

$$R = \frac{E_{\text{tang}}}{H_{\text{tang}}} = \frac{E_{\text{tang}}}{j \delta} = \frac{E_{\text{tang}}}{\sigma \delta E_{\text{tang}}} = \frac{1}{\sigma \delta} = R_{\square}$$

gilt. Somit kann aus der gemessenen Welligkeit d der Wert von R_{\square} angegeben werden. Insbesondere ist es möglich, mit einer Folie vom Flächenwiderstand $R_{\square} = Z$ die Leitung für eine Wellenlänge reflexionsfrei abzuschliessen. Die richtige Lage der Kurzschlussebene lässt sich durch Messung der Welligkeit d kontrollieren; bei Abweichungen vom Sollwert erscheint nämlich zum Flächenwiderstand R_{\square} der Folie ein Blindwiderstand parallel geschaltet, der eine Vergrösserung des Reflexionsfaktors $|r|$ und damit der Welligkeit d zur Folge hat. Eine numerische Abschätzung zeigt, dass — abgesehen von Werten R_{\square} in der Umgebung von Z — die Einstellung des Kurzschlussschiebers nicht so sehr kritisch ist, und dieser Befund konnte bei der Messung quantitativ bestätigt werden. Aus verschiedenen selbst hergestellten Widerstandstreifen wurden an willkürlich gewählten Stellen Proben von der Grösse des Hohlleiterquerschnitts herausgeschnitten und auf etwa 1 cm dicke Unterlagen aus Schaumtrotlital von der Breite und Höhe des Hohlleiters aufgeklebt, so dass sich das Ganze bequem in die Messleitung einführen liess. Gemessen wurde bei einer Rohrwellenlänge von 13,6 cm, entsprechend einer Wellenlänge von 8,14 cm im freien Raum. Damit ist der durch (9) definierte Wellenwiderstand des Hohlleiters $Z = 630 \Omega$, und aus den gemessenen d -Werten ergeben sich nach (8) die zugehörigen Werte des Flächenwiderstandes R_{\square} . Die Ergebnisse sind in Fig. 9 dargestellt. Die Zunahme des Flächenwiderstandes bei Hochfrequenz ist auf den Skineffekt zurückzuführen, der sich bei den niederohmigen und daher dickeren Schichten in steigendem Mass bemerkbar macht. Von zirka 600Ω an sind Gleichstrom- und Hochfrequenzwiderstand unserer Schichten gleich, und man kann aus der Skintiefe die Dicke der Kohlenschicht roh abschätzen. Die Skintiefe δ_s ist so definiert, dass das in den Leiter eindringende Feld auf

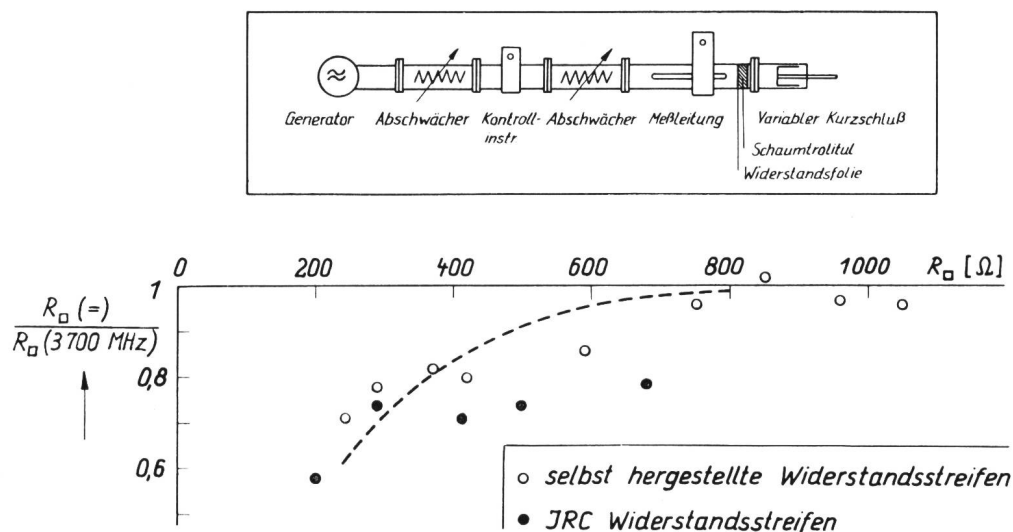


Fig. 9. Flächenwiderstand nach Gleichstrom in Abhängigkeit vom Flächenwiderstand bei Gleichstrom
Flächenwiderstand bei 3700 MHz

$\frac{1}{e}$ seines Wertes an der Oberfläche abgeklungen ist; für Kohle bei 4000 Hz ergibt sich ein Wert von $\delta_s \approx 5 \cdot 10^{-2}$ mm.

Anwendungen von Widerstandsfolien in der Zentimeterwellentechnik

Flächenhafte Widerstände werden in der Zentimeterwellentechnik zum Aufbau von Abschwächern und zum reflexionsfreien Abschluss von Hohlrohrleitungen benutzt.

Bei der einfachsten Ausführung eines Abschwächers für Hohlrohrwellen wird ein abgerundetes Plättchen Widerstandsfolie durch einen longitudinalen Spalt in der Mitte der Breitseite des Hohlleiters in diesen eingeführt; die Abschwächung wird so geregelt, dass man das Widerstandsplättchen mehr oder weniger tief in den Hohlleiter eintauchen lässt. Diese Ausführungsform (Fig. 1a) findet vorzugsweise dann Verwendung, wenn es sich um qualitative Einstellungen handelt, wie zum Beispiel bei der Entkopplung von Generator und übriger Messapparatur.

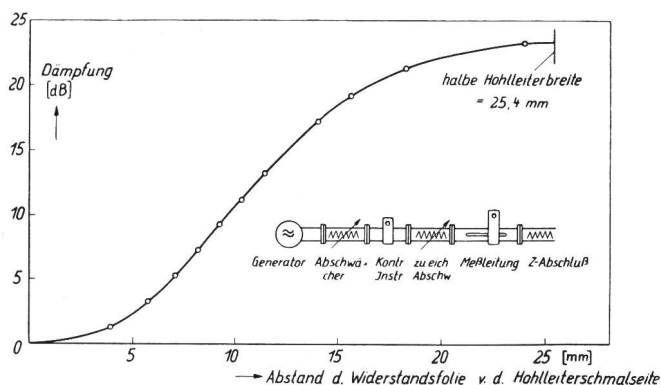


Fig. 10. Eichkurve eines Abschwächers

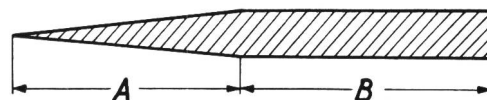
Beim Bau eines geeichten Abschwächers geht man von einer anderen Konstruktion aus, bei der die beiderseits spitz zulaufende Widerstandsfolie parallel zur Schmalseite des Hohlleiters verschoben werden kann (Fig. 1b); die Dämpfung wächst an, wenn die Folie vom Rand des Hohlleiters her in den Bereich grösserer Feldstärke gebracht wird. Fig. 10 zeigt die Eichkurve eines derartigen Abschwächers, die in Ermangelung eines Leistungsmessgerätes schrittweise mit einem geeichten Detektor aufgenommen wurde und in deren Verlauf natürlich die sinusförmige Verteilung des E -Feldes über den Hohlleiterquerschnitt zum Ausdruck kommen muss. Bemerkenswert ist die gute Übereinstimmung des Maximalwertes der Dämpfung von 23,2 dB mit dem aus einer empirischen Formel von Montgomery [2] sich ergebenden Wert. Danach ist für eine Widerstandsfolie (von 100 bis 800 Ω) in der Mitte des Hohlleiters bei $\lambda = 10$ cm die Dämpfung je Längeneinheit

$$\alpha = 1,97 - 0,15 \frac{R_{\square} (\Omega)}{100} \left[\frac{\text{dB}}{\text{cm}} \right]. \quad (10)$$

In unserem Fall war $R_{\square} = 470 \Omega$, die äquivalente Gesamtlänge 18,5 cm, so dass sich für die Gesamtdämpfung 23,4 dB ergibt.

Bei der Herstellung reflexionsfreier Abschlusswiderstände bringt man die Widerstandsfolie in der Mitte des Hohlleiters und parallel zu seiner Schmalseite, also im Bereich maximaler Feldstärke, an. Das senderseitige Ende lässt man spitz auslaufen, während das andere Ende in einen Schieber eingelassen wird, so dass der Abschlusswiderstand längs des Hohlleiters verschoben werden kann. Um auch für längere Stücke die Mittellage der Folie sicherzustellen, wird sie in einen Keil aus Schaumtrotitil eingebettet. Aus unseren Folien wurden eine Reihe solcher Abschlusswiderstände mit verschiedenem Flächenwiderstand und von verschiedener Form, jedoch gleicher Dämpfung (2×30 dB, nach (10) errechnet) hergestellt und ihr Reflexionsfaktor durch Verschieben des Widerstandes im Hohlleiter bei fester Sonde der Messleitung gemessen; dieses Verfahren garantiert, dass die beobachtete Welligkeit allein von dem zu untersuchenden Abschlusswiderstand herrührt. Es wurden die in Tabelle II zusammengestellten Resultate erzielt.

Tabelle 2: Reflexionsfreie Abschlusswiderstände verschiedener Form bei gleicher Gesamtdämpfung (30 dB). Messung des Reflexionsfaktors bei 3700 MHz



A (cm)	B (cm)	Flächenwiderst. $R_{\square} [\Omega]$	Reflexionsfaktor r (%)
135	105	145	2,1
	120	240	1,5
	130	350	0,5
	170	470	0,7
	290	750	0,9
250	100	430	0,5
200	125		1,5
70	190		2,8

Die erste Messreihe zeigt, daß es für die Auswahl des Flächenwiderstandes ein Optimum gibt, und dieser Wert liegt hier um 400 Ω . Dieser Befund ist wiederum in guter Übereinstimmung mit den Angaben von Montgomery [2]. Bei der zweiten Messreihe wurde für Folien des optimalen Flächenwiderstandswertes die Länge der Spitze variiert: Die Abschlusswider-

stände werden um so besser, je allmählicher der Übergang von Luft in das dämpfende Material ist. Durch Vergleich mit der Messung für $R_{\square} = 350 \Omega$ bzw. 470Ω der ersten Messreihe sieht man, dass man sich bei einer Spitzenlänge von etwa einer Rohrwellenlänge (13,6 cm) asymptotisch einem «Grenzwert» von $r = 0,5\%$ nähert.

Bibliographie

- [1] O. Macek. Flächenwiderstände in der Zentimeterwellentechnik. Elektrotechnik 2 (1948), 205.
- [2] C. G. Montgomery. Technique of microwave measurements. New York 1947. Im besonderen S. 729 ff.

Adresse des Verfassers: Privatdozent Dr. Hans Severin, III. Physikalisches Institut der Universität, (20b) Göttingen, Bürgerstrasse 42.

Vereinfachte Verfahren zur Messung raumakustischer Bestimmungsgrößen

Von G. Kurtze, Bern

534.84.08
534.844.1

Zusammenfassung. Die meisten Verfahren, die heute angewandt werden, um über die Nachhallzeit hinaus weitere Bestimmungsgrößen zur Beurteilung der akustischen Qualitäten von Räumen zu ermitteln, sind mit einem erheblichen Aufwand an Zeit und Arbeit für Messung und Auswertung verbunden. In der vorliegenden Arbeit wird nun für zwei dieser Verfahren, nämlich die Messung der Frequenzgangschwankungen (frequency irregularities) und der Richtungsdiffusität, eine einfache Apparatur angegeben, die den Arbeitsaufwand für die Messungen stark reduziert und eine nachträgliche Auswertung erübrigt.

Noch vor wenigen Jahren galt in der Raumakustik, ausser der räumlichen Ausdehnung, die Nachhallzeit und ihr Frequenzgang als das einzige Charakteristikum für die akustischen Eigenschaften eines Raumes. Nachdem sich jedoch die Erkenntnis durchgesetzt hat, dass dieses Kriterium bei weitem nicht ausreicht, um die «Akustik» eines Raumes zu beschreiben, existiert nun eine Vielzahl von Verfahren, zusätzliche Kriterien zu gewinnen. Man untersucht zum Teil die in der physiologisch wichtigen Zeitspanne von etwa 50 ms im Anschluss an das direkte Signal beim Hörer eintreffenden Schallkomponenten und beschäftigt sich andererseits mit der «Diffusion» oder «Diffusität» des Raumes bzw. des Schallfeldes im Raum, wobei eine einwandfreie Definition dieser Begriffe noch aussteht. Über die Notwendigkeit der einzelnen neu eingeführten Kriterien kann letzten Endes nur die Praxis entscheiden, so dass es verfrüht wäre, sie wertmässig gegeneinander abzuwägen. Vom physikalischen Standpunkt aus sind jedoch in erster Linie die Verfahren interessant, bei denen ein fest umrissener Begriff, der zum Beispiel «Diffusität» heissen könnte, mit einem für den untersuchten Raum charakteristischen Zahlenwert belegt werden kann.

Bei den erwähnten, in bezug auf die ersten 50 ms gemachten Untersuchungen ist das bis jetzt noch nicht der Fall, wenn man nicht einfach die Energie der in den ersten 50 ms eintreffenden Schallanteile zur Gesamtenergie in Beziehung setzt.

Anders liegen die Verhältnisse bei einigen Verfahren, die die «Diffusität» eines Raumes als Kriterium einführen. Hier ist das Resultat ein Zahlenwert, und es bedarf nur mehr einer einheitlichen Normierung, um den Messergebnissen eine allgemein gültige Bedeutung zu verleihen. Der Begriff «Diffusität» bzw.

Résumé. La plupart des procédés appliqués aujourd'hui pour déterminer, en plus de la durée de réverbération, d'autres grandeurs servant à apprécier les qualités acoustiques d'un local, exigent une dépense considérable de temps et de travail. L'auteur décrit, pour deux de ces procédés – la mesure des variations de la caractéristique de fréquence (frequency irregularities) et celle de la diffusité de direction – un appareillage simple qui permet de réduire fortement le travail de mesure et de renoncer à l'interprétation ultérieure des résultats.

«Diffusion» wird zurzeit für drei Grössen verwendet, die sich zumindest in der Art ihrer Ermittlung unterscheiden. Gemessen werden nämlich einmal die Frequenzgangschwankungen (frequency irregularities), dann die räumlichen Schwankungen (space irregularities) des Schalldruckes und schliesslich die räumliche Richtungsverteilung der an einem Ort eintreffenden Schallkomponenten.

Auf die Frage, inwieweit die einzelnen «Diffusitäten» miteinander identisch sind, soll hier nicht näher eingegangen werden. Die Berechtigung der Messverfahren 1 oder 2 und 3 nebeneinander leuchtet ein, wenn man sich vergegenwärtigt, dass man in einem stark gedämpften grossen Raum nur sehr geringe Schwankungen des Frequenzganges und räumliche Schwankungen messen wird, während in der Richtungsverteilung der direkte Schall und die ersten Reflexionen der Wände stark ausgeprägt erscheinen dürften. Zumindest in diesem Extremfall also kennzeichnet die Richtungsverteilung andere Eigenschaften des Schallfeldes als die beiden anderen Verfahren, während man im Falle eines kleineren halligen Raumes annehmen kann, dass Frequenzgang und Richtungsverteilung in gleicher Weise ein Kriterium für die Verteilung der Eigenfrequenzen des Raumes darstellen. Zwischen den Verfahren 1 und 2 ist die Ähnlichkeit grösser. Im ersten Falle wird der Frequenzgang an mehreren Orten, im zweiten die räumliche Schwankung bei mehreren Frequenzen gemessen, so dass der messtechnische Unterschied lediglich in einer Vertauschung der Parameter besteht.

Wenn man sich nun dafür interessiert, wie die Messungen in der Praxis ausgeführt werden, stellt man fest, dass sie mit einem erheblichen Arbeits- und Zeitaufwand verbunden sind. Hinzu kommt eine komplizierte Auswertung, die die auf die Messungen