

Setzt man diesen Anteil mit 90 % an, so darf wohl angenommen werden, daß ein Gegenstand, der sich außerhalb dieses Grenzradius befindet, die Welle nur noch vernachlässigbar wenig stört.

Die Berechnung der Grenzradien geschieht ähnlich wie die Berechnung der Gesamtleistung mit dem Unterschied, daß die Integration der Leistungsdichte in radialer Richtung dann abgebrochen wird, wenn 90 % der Gesamtleistung erreicht wird.

Bild 6 zeigt für $\epsilon_r = 2,2$ den auf ϱ_0 bezogenen Grenzradius ϱ_g als Funktion des Öffnungswinkels $2\varphi_0$. Parameter ist ϱ_0/λ_0 . Das Parameterverhalten bestätigt wieder die Feldkonzentration im Dielektrikum bei hohen Frequenzen. Während bei großen Frequenzen der Grenzradius ziemlich unabhängig vom Öffnungswinkel ist, zeigt sich bei kleinen Frequenzen ein Resonanzeffekt mit einem Maximum etwa bei $2\varphi_0 = 180^\circ$.

Vergleicht man die Bilder 5 und 6, so ist bemerkenswert, daß sowohl der prozentuale Leistungsanteil im Dielektrikum als auch der Grenzradius bei $2\varphi_0 = 180^\circ$ ein Maximum durchläuft.

Dieses Verhalten wird so interpretiert, daß im Falle $2\varphi_0 = 180^\circ$ die außerhalb des Dielektrikums transportierte Leistung zwar klein ist, die Abnahme der Leistungsdichte längs des Radius aber nur langsam erfolgt. Dies führt somit zu vergleichsweise großen Grenzradien.

Bei Öffnungswinkeln ungleich 180° dagegen wird die Leistung hauptsächlich in einer schmalen Zone oberhalb des Dielektrikums geführt, was sowohl kleine Leistungsanteile im Dielektrikum als auch kleine Grenzradien ergibt.

(Eingangsdatum: 10. Mai 1976;
wieder eingegangen am 9. Juli 1976)

Schrifttum

- [1] *Abele, M.*: Dielectric waveguide for communication with high speed vehicles. Appl. Science Lab. Techn. Rep. No. 729. New York, 1969.
- [2] *Abele, M.; Meddecki, H.*: 4 GHz dielectric wave guide communication line. Gen. Appl. Science Lab. Rep. No. FRA-RT-72-29. New York, 1971.
- [3] *Webber, G. E.*: Surface wave devices for applications in high speed guided vehicle communications. Memorandum to TSC/DOT from Honeywell, Inc., 1972.
- [4] *Toulios, P. P.; Knox, R. M.*: Rectangular dielectric image lines for millimeter integrated circuits. Mescon Part 14 Section 3/3, 1970.
- [5] *Knox, R. M.*: Dielectric wave guides: A low-cost option for ICs. *Microwaves* 15 (March 1976) S. 56–67.
- [6] *Kuno, H. J.; Chang, Y.*: Millimeter-wave integrated circuits. Hughes Aircraft Company, Torrance, 1974.
- [7] *Schlesinger, S. P.; King, D. D.*: Dielectric image lines. *IRE Trans. MTT* (1958) S. 291–299.

Ein Schlitzhohlleiter für breitbandige Nachrichtenverbindungen mit Schienenfahrzeugen

Von Klaus P. Lange, VDE/NTG und
Harald Dalichau, VDE/NTG*

Ein Schlitzhohlleiter für breitbandige
Nachrichtenverbindungen mit Schienenfahrzeugen

Zusammenfassung — Zur berührungsfreien Nachrichtenübertragung zwischen Hochgeschwindigkeitsbahnen und ihrer Leitstelle wird ein parallel zur Trasse verlegter Rechteckhohlleiter mit durchgehendem Längsschlitz vorgeschlagen. Eine am Fahrzeug angebrachte Antenne taucht durch den Schlitz in das H_{10} -Feld ein und ermöglicht so eine dämpfungsarme Verbindung ohne störende Abstrahlung in die Umgebung. Aufbau und Eigenschaften des Schlitzhohlleiters werden beschrieben und die Meßergebnisse an einer 100-m-Versuchsstrecke werden angegeben.

1. Einführung

Für die Erprobung und den Betrieb von Hochgeschwindigkeitsbahnen (z. B. Magnetschwebbahnen mit Linearmotor) werden zwischen Leitstelle und Fahrzeug sowie zwischen den Fahrzeugen Nachrichtenverbindungen benötigt, deren Bandbreitebedarf weit über den heute beim Bahnfunk üblichen Werten liegt. Da ungerichtete Funkverbindungen mangels verfügbarer Frequenzbereiche ausscheiden, konzentriert sich

* Mitteilung aus dem Fachbereich Elektrotechnik der Hochschule der Bundeswehr München

A slotted waveguide for broadband communication with trains

Abstract — A slotted rectangular waveguide parallel to the track is introduced for continuous communication with high-speed trains. An antenna connected to the train reaches through the slot into the H_{10} -field inside the waveguide, thus setting up a connection with low overall attenuation and practically no radiation. The construction and the performance of the slotted waveguide are described and the results of a 100-m-prototype line are given.

die Suche auf geeignete Wellenführungen, die entlang der Fahrstrecke verlegt, eine berührungsfreie Übertragung nur innerhalb ihrer unmittelbaren Umgebung ermöglichen [1, 2]. Bei Tunnelstrecken haben sich abstrahlende Koaxialkabel bewährt [3, 4, 5]. Typische Werte solcher Übertragungssysteme sind Leitungsdämpfungen von 40–80 dB/km bei Frequenzen zwischen 100 und 500 MHz und Koppeldämpfungen zwischen Leitung und Fahrzeugantenne von 50–80 dB bei Abständen von einigen Zentimetern bis zu mehreren Metern. Wegen dieser hohen Koppeldämpfung ist das Senden über die Fahrzeugantenne problematisch. Fast die gesamte Leistung wird in die Umgebung abgestrahlt und kann andere Funkdienste stören.

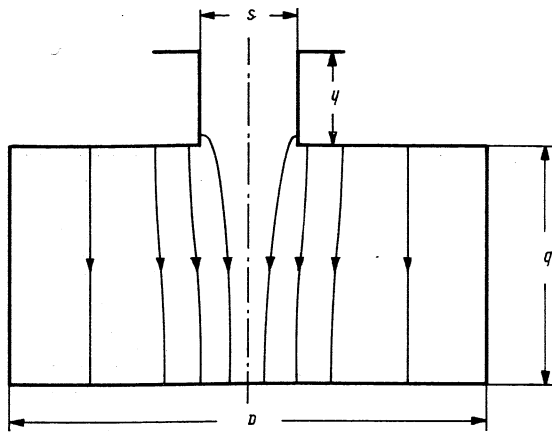


Bild 1.
Querschnitt des Schlitzhohlleiters mit elektrischen Feldlinien.

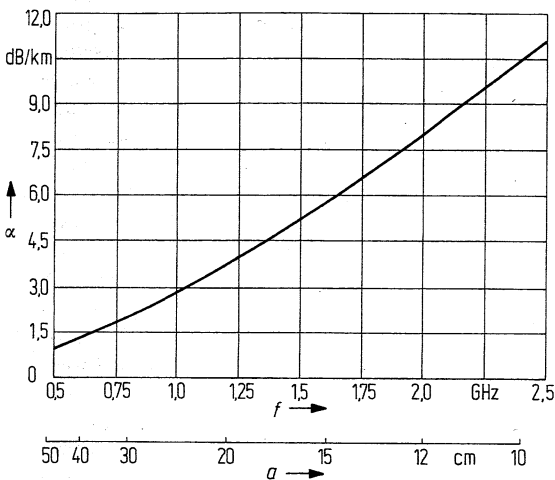


Bild 2.
Dämpfung eines Kupfer-Hohlleiters als Funktion der Frequenz bzw. der Breite a in der Mitte des Betriebsbereiches ($\lambda_0 = 1,25 a$, $b = a/2$).

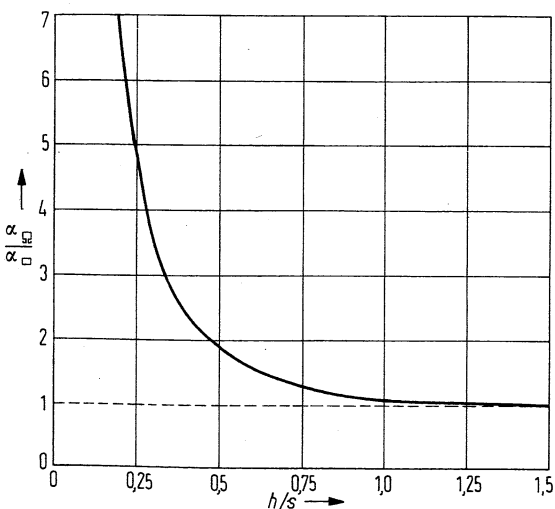


Bild 3.
Dämpfung des Schlitzhohlleiters bezogen auf die Dämpfung des geschlossenen Hohlleiters als Funktion der Kaminhöhe (Cu-Hohlleiter, $\alpha_{\square} = 3,5 \text{ dB/km}$, $s = 0,25 a$).

Um eine bessere Verkopplung zwischen Fahrzeugantenne und Wellenführung bei möglichst geringer Leitungsdämpfung zu erzielen, wird derzeit bei verschiedenen Institutionen der mögliche Einsatz von Oberflächenwellenleitungen untersucht (Goubau-Leitung, Dielectric-Image-line). Auch bei diesen Strukturen treten beträchtliche Schwierigkeiten auf, weil alle Gegenstände in der näheren Umgebung der Leitung Interferenzen bewirken und die Wellenführung beeinträchtigen. Zur dämpfungsarmen Ein- und Auskopplung der Wellen werden aufwendige, richtkopplerähnliche Konstruktionen benötigt [6, 1].

Als andere Möglichkeit zur trassengebundenen Wellenführung wurde in Zusammenarbeit mit Messerschmitt-Bölkow-Blohm der Einsatz eines Schlitzhohlleiters mit H_{10} -Welle untersucht, der geringe Koppel- und Leitungsdämpfung unabhängig von Umgebungseinflüssen ermöglicht.

2. Aufbau und Eigenschaften des Schlitzhohlleiters

Bild 1 zeigt den Querschnitt des Hohlleiters, der parallel zur Trasse verlegt wird. Die Fahrzeugantenne taucht von unten durch den Kamin in den Hohlleiter ein. Insbesondere bei Hochgeschwindigkeitsbahnen ist zu erwarten, daß die seitlichen Schwankungen des Fahrzeugs nur wenige Zentimeter betragen. Der Schlitzhohlleiter gestattet seitliche Bewegungen der Fahrzeugantenne innerhalb der Schlitzbreite s und vertikale Bewegungen innerhalb der gesamten Hohlleiterhöhe b . Das Hochpaßverhalten des Hohlleiters verhindert, daß Störspannungen, die der Antrieb des Fahrzeugs verursacht, zum Empfangsort weitergeleitet werden. Das Wellenfeld im Hohlleiter entspricht weitestgehend dem H_{10} -Feld im Rechteckhohlleiter. In **Bild 1** sind einige elektrische Feldlinien skizziert. Auch die Leitungsdämpfung weicht nur unwesentlich von der des geschlossenen Rechteckhohlleiters ab. Die Frequenzen, bei denen eine Schlitzhohlleiterstrecke eingesetzt werden kann, werden zu tiefen Frequenzen hin durch die größer werdenden Querschnittsabmessungen und bei hohen Frequenzen durch die wachsende Leitungsdämpfung bestimmt.

Bild 2 zeigt diese Zusammenhänge für einen Hohlleiter aus Kupfer mit dem Seitenverhältnis $a : b = 2 : 1$ und eine mittlere Betriebswellenlänge $\lambda_0 = 1,25 a$. Zweckmäßig erscheint ein Hohlleiter mit etwa 20 cm Breite. Bei diesen Abmessungen sind Schlitzbreiten bis zu 8 cm zulässig, die mechanischen Toleranzen bereiten keine Schwierigkeiten, und im entsprechenden Frequenzbereich von 0,8–1,5 GHz können für die notwendigen Oszillatoren und Verstärker Transistoren und konventionelle Bauelemente verwendet werden. Wesentlich ist eine ausreichende Kaminhöhe h , wenn Abstrahlung und damit ein Anstieg der Leitungsdämpfung vermieden werden soll. **Bild 3** zeigt den gemessenen Zusammenhang. Man erkennt, daß es ausreicht, wenn die Kaminhöhe h etwa gleich der Schlitzbreite s gewählt wird. Unter der Annahme eines solchen quadratischen Kamins wurde untersucht, wie breit ein Schlitz werden darf, ohne daß die stabile Wellenführung verlorengeht. In **Bild 4** erkennt man, daß bei sehr schmalen Schlitz ($s/a < 0,1$) die Dämpfung gleich der des normalen Rechteckhohlleiters ist. Bei Vergrößerung der Schlitzbreite steigt die Dämpfung zunächst an. Bei $s/a \approx 0,3$ wird sie wegen der geringeren Wandverluste im Bereich des Kamins zunächst wieder etwas kleiner und wächst dann bei weiterer Schlitzverbreiterung ($s/a > 0,4$) infolge abnehmender Führung der H_{10} -Welle rasch an.

Für die Wahl des Betriebsfrequenzbereiches muß auch die Frequenzabhängigkeit der Gruppenlaufzeit (**Bild 5**) berücksichtigt werden. Kanäle mit großer Bandbreite sollten im oberen Frequenzbereich angeordnet werden. Schmalbandige Sprechfunkkanäle können am unteren Bereichsende liegen.

Mikrowellen für Fahrzeuge

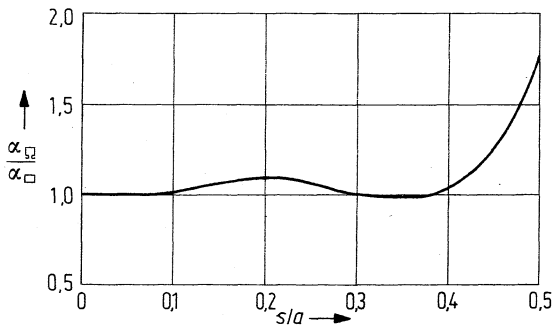


Bild 4.
Dämpfung des Schlitzhohlleiters bezogen auf die Dämpfung des geschlossenen Hohlleiters als Funktion der Schlitzbreite (Cu-Hohlleiter, $\alpha_{\square} = 3,5 \text{ dB/km}$, $h = s$, $f = 1,3 \text{ GHz}$).

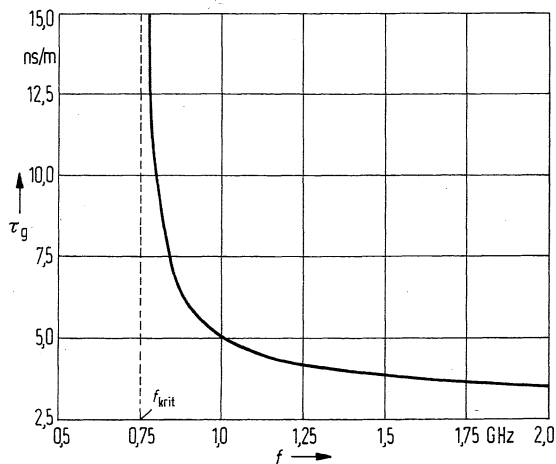


Bild 5.
Gruppenlaufzeit im Rechteckhohlleiter mit $a = 20 \text{ cm}$.

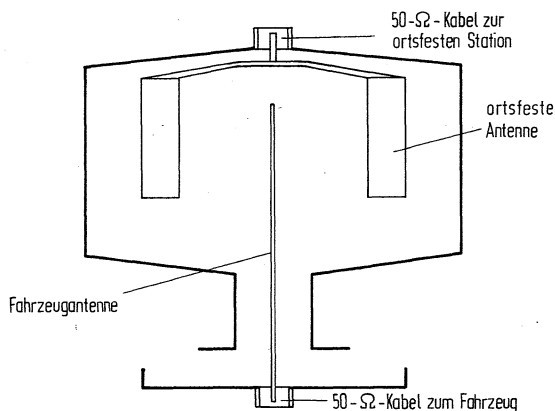


Bild 6.
Schlitzhohlleiter mit ortsfester Antenne und eintauchender Fahrzeugantenne.

3. Meßergebnisse an einer 100-m-Versuchsstrecke

Auf dem Gelände der Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH wurde in Ottobrunn bei München eine 100 m lange, gerade Schlitzhohlleiterstrecke mit den Querschnittsabmessungen $a = 20 \text{ cm}$, $b = 10 \text{ cm}$, $s = h = 4 \text{ cm}$ verlegt. Abweichend von der herkömmlichen Hohlleitertechnik, die gezogene Messingprofile und gefräste Flansche benutzt, wurde die Leitung aus 0,75 mm starkem, verzinktem Stahlblech gebogen. An den Enden der 3-m-Teilstücke wurden Winkeleisen angepunktet, die bei der Montage verschraubt wurden. Um gute Kontaktierung an den Flanschen zu erreichen, wurden flexible, leitfähige Dichtungen zwischengelegt. Im übrigen wurde die Ausrichtung der Strecke sorgfältig, aber ohne Präzision durchgeführt (Toleranz der Schlitzbreite $s: \pm 2 \text{ mm}$; Abweichung der Strecke von einer Geraden: $\pm 2 \text{ cm}$).

Die gemessenen Übertragungseigenschaften entsprechen erwartungsgemäß denen eines geschlossenen Hohlleiters. Der nutzbare Frequenzbereich liegt zwischen 1,0 und 1,5 GHz. Zwischen 1,3 und 1,5 GHz wurde eine nahezu konstante Dämpfung von 1 dB/100 m gemessen. Etwa alle 42 MHz treten Dämpfungsspitzen von 0,1 dB auf, da die Flanschreflexionen sich verstärken, wenn innerhalb eines 3-m-Teilstückes ganzzahlige Vielfache einer halben Hohlleiterwellenlänge vorhanden sind [7]. Die Leistungsdichte der durch den Schlitz austretenden Welle liegt bei 5 m seitlichem Abstand von der Strecke etwa 80 dB unter der der Hohlleiterwelle.

In Bild 6 erkennt man einen aus zwei Halbschalen bestehenden Schlitzhohlleiter, in den eine Fahrzeugantenne eintaucht. Die eingezeichnete ortsfeste Antenne ist so aufgebaut, daß die Verbindung beim Durchfahren nicht beeinträchtigt wird. Durch den symmetrischen Aufbau wird die H_{10} -Welle im Hohlleiter angeregt, ohne daß störende Abstrahlung auftritt. Die Fahrzeugantennen wurden als gedruckte Schaltung auf 1,3 mm starken Isolierplatten hergestellt, um die verfügbare Schlitzbreite möglichst vollständig ausnutzen zu können. Die minimal erreichbare Koppeldämpfung beträgt bei Fahrzeugantennen mit Richtwirkung 0 dB und ohne Richtwirkung 3 dB. An einer Fahrzeugantenne mit 5,5 dB Koppeldämpfung wurden bei 100 MHz Bandbreite für horizontale Versetzungen von $\pm 1,8 \text{ cm}$ und vertikale Versetzungen von $\pm 2 \text{ cm}$ maximale Änderungen der Koppeldämpfung von $\pm 0,25 \text{ dB}$ gemessen.

Aufgrund der Messungen im Labor und an der 100-m-Versuchsstrecke hat sich der beschriebene Schlitzhohlleiter als problemlos und direkt einsatzfähig für Nachrichtenverbindungen mit spurgeführten Fahrzeugen erwiesen. Der Bau einer längeren Erprobungsstrecke mit 6 cm Schlitzbreite ist in Vorbereitung, ebenso die Nutzung des Hohlleiters zur exakten Messung von Fahrzeugort und Fahrzeuggeschwindigkeit. (Eingangsdatum: 11. Juni 1976)

Schrifttum

- [1] Beal, J. C.; Josiak, J.; Mahmoud, S. F.; Rawat, V.: Continuous — access guided communication (CAGC) for ground-transportation systems. Proc. IEEE 61 (1973) H. 5, S. 562 bis 568.
- [2] Barlow, H. M.: High frequency guided electromagnetic waves in application to railway signalling and control. Radio Electron. Eng. 33 (1967) H. 5, S. 275 bis 281.
- [3] Breitenbach, O.; Stitz, G.: Unterirdische Funkübertragung mit abstrahlenden Hochfrequenzleitungen. Elektr. Bahnen 46 (1975) H. 7, S. 3 bis 10.
- [4] Nakahara, T.; Kurauchi, N.; Yoshida, K.; Miyamoto, Y.: Extensive applications of leaky cables. Sumitomo Electr. Techn. Rev. (1971) H. 15, S. 27 bis 31.
- [5] Mikoshiba, K.; Nurita, Y.: Guided radiation by coaxial cable for train wireless systems in tunnels. IEEE Trans. VT-18 (1969) H. 2, S. 66 bis 69.
- [6] Fitzgerrell, R. G.; Haidle, L. L.; Parich, J. E.: Surface waves for vehicular communication. IEEE Trans. VT-21 (1972) H. 2, S. 51 bis 59.
- [7] Hu, A. S.: Transmission properties of wayside communication systems. Proc. IEEE 61 (1973) H. 5, S. 556 bis 561.