Übergänge und Fahrzeugkoppler für Schlitzhohlleiterstrecken

Adapters and Vehicle-Couplers for Slotted Waveguide Systems

Von Harald Dalichau

Mitteilung aus dem Institut für Theoretische Elektrotechnik der HOCHSCHULE DER BUNDESWEHR MÜNCHEN

Übersicht:

Der Schlitzhohlleiter (SHL) ist ein durchgehend längsgeschlitzter Rechteckhohlleiter mit H_{10}-Welle. Er wird im Frequenzbereich um 3 GHz eingesetzt, um berührungslos breitbandige Nachrichtenverbindungen zu spurgeführten Fahrzeugen herzustellen. Da die Übertragungseigenschaften des SHL denen eines normalen geschlossenen Rechteckhohlleiters entsprechen, sind es die weiteren Komponenten im Signalweg, die die Qualität des Gesamtsystems zur trassengebundenen Informationsübertragung festlegen. Nachdem in den vergangenen Jahren für mehrere Schlitzhohlleiter-Übertragungsstrecken solche Komponenten entwickelt, erprobt und eingesetzt wurden, wird hier zusammenfassend über die Ergebnisse berichtet. Aufbau, Eigenschaften und Dimensionierungsgesichtspunkte folgender Elemente werden mitgeteilt: Übergänge von SHL auf Koaxialleitung, starre und längsverschiebliche SHL-Verbindungen, Fahrzeugkoppler mit und ohne Richtwirkung sowie stationäre Absorber und solche, die am Fahrzeug befestigt sind. Für die Übergänge und Dehnungskoppler wurde ein spezieller Kammreflektor entwickelt, mit dem sich ein berührungsloser, verschieblicher Kurzschluß für die H_{10}-Welle im Rechteckhohlleiter realisieren läßt.

Abstract:

The slotted waveguide (SWG) is a continuously longitudinally slotted rectangular waveguide with a TE_{10}-mode. It is used for noncontacting broadband communication with guided vehicles in the frequency band around 3 GHz. As the transmission properties of the SWG are equal to those of a standard, unslotted rectangular waveguide, the quality of the entire system for continuous access guided communication is mainly affected by the other components within the communication link. In the last years such components have been developed, tested and applied in several slotted-waveguide communication-systems. This is a comprehensive review of the results of these developments. Construction details and performance data of the following components are given: adapters from SWG to caxial-line, rigid waveguide connections and expansion joints, vehicle couplers with and without directivity, stationary and moving absorbers. A special comb-reflector has been developed for application in some adapters and expansion joints, with which a non-contacting, movable short for the TE_{10}-mode in a rectangular waveguide can be realized.

Für die Dokumentation:

Nachrichtenübertragung zu Fahrzeugen / Offener Wellenleiter / Schlitzhohlleiter / Nahfeldantenne / Wellentypwandler / Hohlleiterverbindung / Kammreflektor / Absorber

1. Nachrichtenübertragung mit Schlitzhohlleitern

Der Schlitzhohlleiter (SHL) entsprechend Bild 1 ist ein offener Wellenleiter, mit dem breitbandige, berührungslose Nachrichtenübertragungen zu gut spurgeführten Fahrzeugen aufgebaut werden können. Nachdem er 1974 von Lange und Dalichau für diesen Anwendungszweck vorgeschlagen wurde, ist über seine Eigenschaften in [1, 2] und über die bisherigen praktischen Anwendungen (Hochgeschwindigkeits-Schlitten, Magnetschwebezug, Cabinentaxi) in [2, 3] berichtet worden. Hier soll über die in den vergangenen Jahren gesammelten Erfahrungen bei der Entwicklung der Systemkomponenten für derartige Strecken berichtet werden.

Bild 1 zeigt den Querschnitt eines Schlitzhohlleiters. Es ist ein Rechteckhohlleiter mit durchgehendem Längsschlitz in der Mitte der Breitseite, auf den ein Kamin aufgesetzt ist. Als Grundwelle ist im Rechteckquerschnitt ein Wellentyp ausbreitungsfähig, der für Schlitzbreiten unter $0{,}4a$ praktisch mit der H_{10}-Welle im geschlossenen Rechteckhohlleiter übereinstimmt. Im Kaminbereich wird das Feld exponentiell gedämpft, so daß praktisch keine Feldenergie austritt und abgestrahlt werden kann. Zur Herstellung einer berührungslosen Nachrichtenverbindung wird ein Schlitzhohlleiter parallel zur Fahrspur verlegt, und eine am Fahrzeug befestigte Antenne, im folgenden Fahrzeugkoppler genannt, taucht durch den Kamin hindurch in das Innere des Hohlleiters ein.

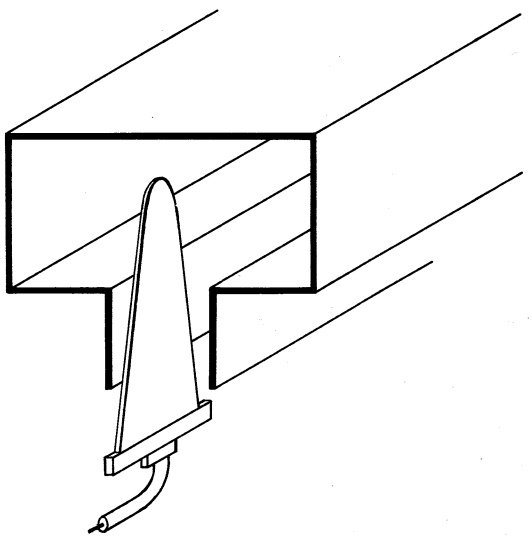

Bild 1: Schlitzhohlleiter mit Fahrzeugkoppler

Abhängig von den Innenabmessungen arbeiten Schlitzhohlleiterstrecken bei Frequenzen zwischen etwa 1 GHz und 5 GHz. Der besseren Übersicht wegen beziehen sich alle Zahlenangaben im folgenden auf einen 10 cm breiten SHL mit einem nutzbaren Frequenzbereich von 2,0 bis 3,0 GHz. Durch die enge Verwandtschaft zum Rechteckhohlleiter lassen sich viele Leitungsbauelemente in gleicher Weise wie dort realisieren. Hier soll nur auf davon abweichende, SHL-spezifische Bauformen eingegangen werden.

2. Übergang von Schlitzhohlleiter auf Koaxialleitung

Zur Anregung der H_{10}-Welle im Schlitzhohlleiter und zum Auskoppeln von Signalen werden an den ortsfesten Stationen des Übertragungssystems und an den Verstärkern entlang der Strecke Übergänge von SHL auf Koaxialleitung eingesetzt. Damit diese Übergangsstellen ungehindert vom Fahrzeugkoppler durchfahren werden können, muß der in **Bild 2** schraffierte Bereich frei bleiben. **Bild 3** zeigt eine Anordnung, die diese Bedingung erfüllt. In den Hohlleiter ragen zwei kapazitive Antennenstäbe, die bei gleichphasiger Speisung eine H_{10}-Welle anregen. Zur Abstimmung der Kapazität der Antennen und zum Verschluß des Hohlleiters in Rückwärtsrichtung wird eine ebenfalls geteilte Kurzschlußwand benutzt. Im Anschluß daran folgt ein Dämpfungskamin, der die Abstrahlung nach hinten verhindert. In **Tabelle 1** sind die elektrischen Daten eines ausgeführten Exemplars angegeben.

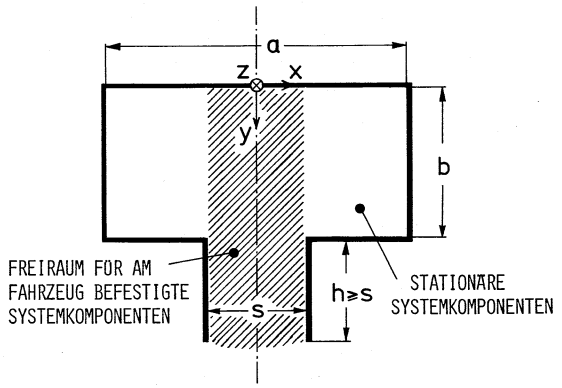

Bild 2: Bezeichnungen und Koordinatensystem; Freiraum für Schwankungen des Fahrzeugkopplers

Nachteil dieser Bauform ist die umfangreiche Bearbeitung des Schlitzhohlleiters beim Einbau des Übergangs. Da SHL-Strecken in der Regel aus 12 m langen, stranggepreßten Aluminiumrohren zusammengesetzt werden, ist eine Bearbeitung der Streckenenden mit Werkzeugmaschinen in der Regel nicht möglich. Deshalb wurde ein Übergang entwickelt, der im Labor mit einem Referenzhohlleiter abgeglichen werden kann und der dann in das unbearbeitete Hohlleiterende der fertigen Strecke eingeschoben und mit zwei Schrauben befestigt wird.

Bild 4 zeigt den konstruktiven Aufbau. Hinter der 50-Ω-N-Buchse teilt sich die Leitung auf in zwei koaxiale 100-Ω-Leitungen, an deren Enden je eine kapazitive Stabantenne zur Wellentypwandlung angebracht ist. Die Geometrie ist so gewählt, daß der Übergang ungehindert durchfahren werden kann. Zum Verschluß des rückwärtigen Hohlleiterendes wurde ein spezieller Kammreflektor entwickelt, der mit dem Außenleiter der 100-Ω-Leitungen verbunden ist. Mit der in Bild 4 dargestellten Bauform wurden für einen 10 cm breiten SHL Übergänge von Koaxialkabel auf Schlitzhohlleiter hergestellt, die sich einfach montieren lassen und zudem den Nebenbedingungen genügen, wasserdicht, witterungsbeständig und mechanisch stabil zu sein.

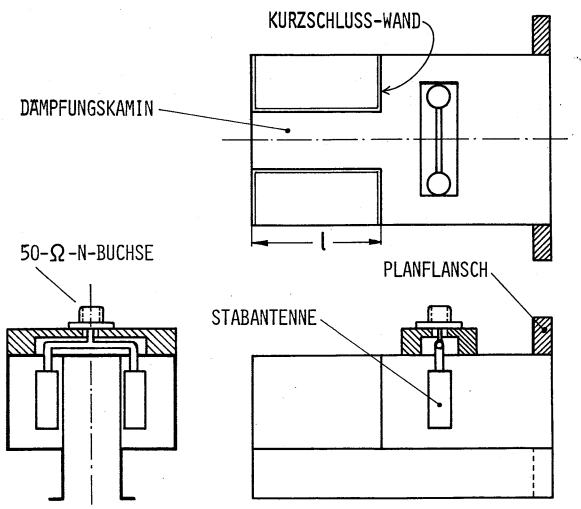

Bild 3: Übergang von Schlitzhohlleiter auf Koaxialleitung

Tabelle 1: Eigenschaften ausgeführter Systemkomponenten umgerechnet auf einen SHL mit $a = 10$ cm und $b = 5$ cm (Nutzfrequenzbereich 2,0 bis 3,0 GHz)

Bezeichnung	Bild	Bandbreite	Reflexionsfaktor im Hohlleiter	Durchgangsdämpfung bzw. Koppeldämpfung	Bemerkungen
Übergang SHL auf N	3	1000 MHz	≤ −20 dB	≤ 0,1 dB	60 dB Entkopplung gegen die Umgebung
Übergang SHL auf N	4	400 MHz	≤ −20 dB	≤ 0,1 dB	30 dB Entkopplung gegen die Umgebung
TEM-Dehnungskoppler	6b	600 MHz	≤ −20 dB	≤ 0,6 dB	35 cm Dehnungshub 2 × 1 m RG − 393/U
Fahrzeugkoppler mit loser Kopplung	ohne Abb.	400 MHz	≤ −12 dB	13 ± 3 dB	Nennschwankungsbereich ± 8 mm horizontal, ± 15 mm vertikal
Fahrzeugkoppler ohne Richtwirkung	7	1000 MHz	≤ − 6 dB	5 ± 1,5 dB	Nennschwankungsbereich ± 8 mm horizontal, ± 8 mm vertikal
Fahrzeugkoppler mit Richtwirkung	9	600 MHz	≤ − 6 dB	3,5 ± 1,5 dB (≥ 15 dB rückwärts)	Nennschwankungsbereich ± 14 mm horizontal, ± 17 mm vertikal

Die in Tabelle 1 angegebenen Daten beziehen sich auf ein für eine spezielle Anwendung entwickeltes Bauelement. Grundsätzlich lassen sich mit dieser Bauform auch größere Bandbreiten bzw. bessere Entkopplungen erzielen.

Da der Kammreflektor auch bei den Dehnungskopplern (s. Abschnitt 4) eingesetzt wird und sich als überaus nützliches Konstruktionselement erwiesen hat, werden seine Eigenschaften und Dimensionierungsgesichtspunkte im folgenden zusammengestellt. Die Entwicklung geht aus von einem Dämpfungskamin aus zwei eingeschweißten Blechen wie in Bild 3, jedoch ohne die dort zusätzlich vorhandene Kurzschlußwand. Die beiden Bleche wandeln die im Querschnitt der Breite a ausbreitungsfähige H_{10}-Welle um in drei aperiodisch gedämpfte H_{10}-Felder in den jeweils etwa $a/3$ breiten Teilbereichen zwischen der Seitenwand und dem Kaminblech bzw. zwischen den Kaminblechen.

Nachteilig hierbei ist, daß die Kaminbleche oben und unten leitend mit dem Hohlleiter verbunden sein müssen, da sonst ein Single-Ridge-Guide oder ein *TEM*-Wellenleiter entsteht, der die Feldenergie breitbandig durchläßt. Außerdem können sich auf den großflächigen Blechen bei Symmetriestörungen ungehindert Oberflächenströme in z-Richtung entwickeln, durch die andere Wellentypen angeregt werden und die Abstrahlungsverluste erzeugen. Deshalb wird statt der Bleche eine Kammstruktur aus mehreren Reflektorstäben benutzt. Die Stäbe lassen nur Ströme in y-Richtung, der Richtung der elektrischen Feldlinien zu.

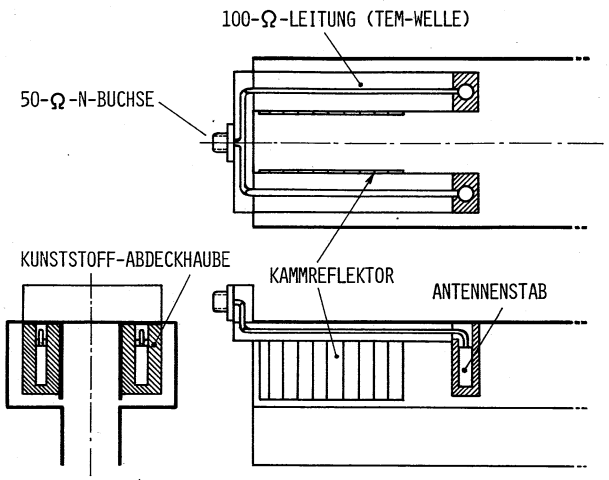

Bild 4: Einschiebbarer Übergang von SHL auf Koaxialleitung

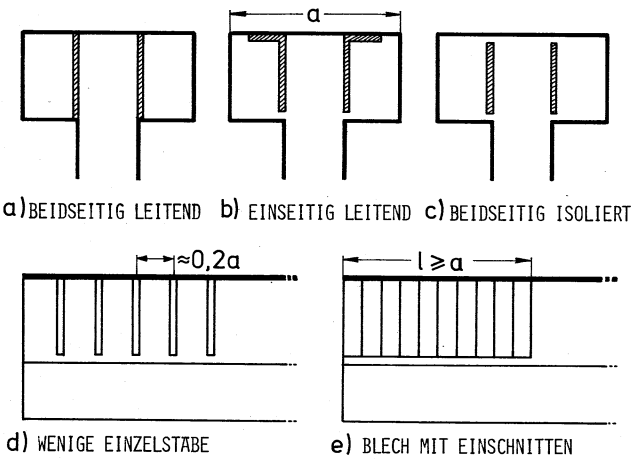

Bild 5: Konstruktionsvarianten von Kammreflektoren

Sie schließen gezielt das elektrische Feld der H_{10}-Welle kurz und vermeiden andere Stromrichtungen, durch die andere Wellentypen angeregt werden.

Die Stäbe können entweder oben und unten mit dem Hohlleiter leitend verbunden werden oder auch einseitig bzw. beidseitig isoliert sein (**Bild 5**). Dadurch ergeben sich vielfältige Möglichkeiten für den Einsatz bei unterschiedlichen Komponenten. Wählt man die Länge l des Kammreflektors gleich der Hohlleiterbreite a, so erhält man im gesamten Nutzbereich der H_{10}-Welle mehr als 40 dB Durchgangsdämpfung. Für die Bauform nach Bild 5 b bieten sich Winkelprofile an, die im Abstand von etwa $a/20$ eingesägt werden, um die ausschließlich in y-Richtung erwünschte Leitfähigkeit zu erzeugen (Schlitzbreite beliebig). Zu großer Abstand zwischen den Schlitzen vermindert die Durchgangsdämpfung im oberen Frequenzbereich. Die Einschnitte müssen gleich lang sein. Um die Ausbildung einer *TEM*-Welle zu verhindern, muß der unten auch in z-Richtung leitende Teil des Winkelprofils mit dem Hohlleiterboden leitfähig verbunden sein.

Der Abstand des Kammreflektors von der Mittelebene $x=0$ des Hohlleiters und die Höhe der Stäbe sind weitgehend unkritisch. Rückt man näher als $0{,}3\,a$ an die Seitenwände heran, vermindert sich die Durchgangsdämpfung im unteren Frequenzbereich. Für Stablängen unter etwa $0{,}7\,b$ werden die hohen Frequenzen durchgelassen. Anstelle der Metallwand mit Einschnitten (Bild 5 e) können auch nur wenige Einzelstäbe benutzt werden (minimal 5 Stäbe in $0{,}2\,a$ Abstand für breitbandig 40 dB Durchgangsdämpfung; s. Bild 5 d).

Bei der Bauform c nach Bild 5 werden die Reflektorstäbe zweckmäßigerweise als gedruckte Schaltung auf Epoxy-GFK oder Teflon hergestellt. Da keine leitenden Kontakte vorhanden sind, lassen sich so sehr einfach längsverschiebliche Kurzschlüsse realisieren. Die Lage der Kurzschlußebene ist weitgehend frequenzunabhängig. Sie liegt etwa $0{,}1\,a$ hinter der Vorderkante des 1. Streifens und wird durch die Höhe und die Breite der Reflektorstreifen beeinflußt. Der Reflexionsfaktor der Kammreflektoren liegt zwischen $-0{,}03$ dB für Bauform c mit Epoxy-GFK und $-0{,}003$ dB für Bauform b mit 3-mm-Al-Winkeln (Meßergebnisse im Bereich 2 bis 3 GHz).

3. Starre Schlitzhohlleiterverbindungen

Als Länge der Schlitzhohlleiter-Teilstücke, aus denen eine Strecke zusammengesetzt wird, hat sich 12 m als geeignet erwiesen. Noch größere Teillängen erzeugen Probleme beim Richten nach dem Strangpressen, beim Transport und bei der Montage. Zur starren Verbindung der Teilstücke können herkömmliche Planflansche oder umlaufend angenietete bzw. angepunktete Blechmanschetten eingesetzt werden. Für lange Strecken sind jedoch Planflansche zu aufwendig; Blechmanschetten ergeben Festigkeitsprobleme bei der Übertragung von Zugkräften in Längsrichtung. Außerdem müssen sie, wenn Reflexionsstörungen und Abstrahlungsverluste gering sein sollen, umlaufend exakt am Hohlleiter anliegen, was wiederum eine aufwendige Fertigung erfordert.

Durch die Überlagerung der an den örtlich periodisch angeordneten Flanschverbindungen auftretenden reflektierten Wellen entstehen im Frequenzgang der Strecke ebenfalls periodische Dämpfungsspitzen bzw. Laufzeitspitzen. Bei einem Abstand der Flansche von 12 m treten diese Spitzen für einen 10-cm-SHL etwa alle 10 MHz auf.

Für Einzelreflexionsfaktoren unter 1 % können solche Störungen vernachlässigt werden. Um dies zu erreichen, müssen die Querschnittsprünge an den Verbindungsstellen kleiner als 1 mm sein (10-cm-SHL).

Unter diesen Gesichtspunkten der vernachlässigbar kleinen Reflexionsstörungen sowie der Zuverlässigkeit, der Haltbarkeit und der geringen Montagekosten haben sich umlaufend geschweißte Hohlleiterverbindungen als am besten geeignet herausgestellt.

4. Längsverschiebliche Schlitzhohlleiterverbindungen (Dehnungskoppler)

Bei einem linearen Wärmedehnungskoeffizienten von $23 \cdot 10^{-6}$/Grad ergibt sich für einen 100 m langen Aluminium-Schlitzhohlleiter bei 100 Grad Temperaturunterschied eine Längenänderung von 23 cm. Zum Ausgleich dieser Wärmedehnung muß der Hohlleiter längsverschieblich befestigt werden. In regelmäßigen Abständen, etwa alle 100 m, wird ein durchfahrbarer Dehnungskoppler eingebaut. Abhängig von dem im längsverschieblichen Bereich des Dehnungskopplers vorhandenen Wellentyp kann man drei Gruppen unterscheiden:

(I) Dehnungskoppler mit H_{10}-Welle,
(II) Dehnungskoppler mit Oberflächen-Welle,
(III) Dehnungskoppler mit *TEM*-Welle.

Zur Gruppe I gehört zum einen der Wellmantel-Hohlleiter (Faltenbalg), bei dem man zum Längenausgleich einen flexiblen Hohlleiter benutzt, und zum anderen die Außenmanschette und die Innenmanschette, bei denen über federnde galvanische Kontakte oder über kapazitive Kontakte ein Übergang zu einem Zwischenhohlleiter gleicher Form hergestellt wird, der außen auf (bzw. innen in) den zu verbindenden Hohlleiter gleitet. Die wesentlichen Probleme entstehen hier durch die ungleichmäßig am Umfang verteilte Längsstromdichte, durch Impedanztransformationen beim Verschieben, durch Profiltoleranzen an den Hohlleiterenden und durch Verschmutzung der verschieblichen Bereiche. Obwohl viele Varianten untersucht wurden, konnte eine sowohl kostengünstige als auch elektrisch und mechanisch langzeitstabile Konstruktion in dieser Gruppe noch nicht gefunden werden.

Die Trennung der elektromagnetischen Welle von den Hohlleiterwänden durch Umwandlung der H_{10}-Welle in eine $H\underline{E}_{11}$-Welle auf zwei in den seitlichen Kammern des SHL angeordneten dielektrischen Stäben ergibt ebenfalls eine längsverschiebliche Hohlleiterverbindung. Die Probleme liegen hier hauptsächlich bei der Halterung der Stäbe und bei den Materialkosten. Für die notwendige enge Bindung der Welle an den Stab muß dessen Dielektrizitätszahl wesentlich größer als 10 sein.

Die Dehnungskoppler mit Wellentypwandlung H_{10} in *TEM* haben sich bei den bisherigen Untersuchungen als am besten geeignet herausgestellt. **Bild 6a** zeigt eine Ausführung ohne mechanische bzw. galvanische Kontakte zum SHL. Über je zwei kapazitive Antennenstäbe rechts und links in den seitlichen Kammern des SHL wird die H_{10}-Welle in zwei gleichphasige *TEM*-Wellen auf zwei starren, symmetrischen Doppelleitungen umgewandelt. Zur Anpassung der Antennen und zum Verschluß des Hohlleiters werden (ebenfalls berührungslose) Kammreflektoren benutzt.

Eine andere Variante dieser Bauform zeigt **Bild 6b.** Hier sind beide Wellentypwandler fest im Hohlleiter montiert,

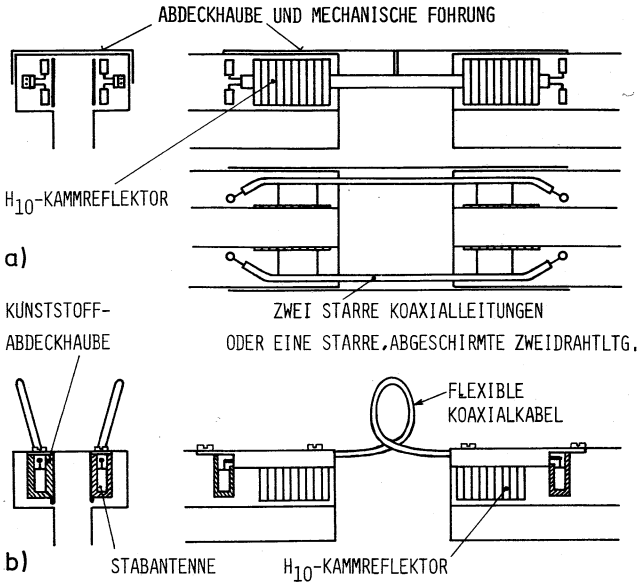

Bild 6: Konstruktionsvarianten von Dehnungskopplern mit TEM-Welle

und Längsverschiebungen werden von zwei flexiblen Koaxialkabeln ausgeglichen. Tabelle 1 enthält die Daten eines ausgeführten Exemplars dieses Typs, entwickelt für eine Lebensdauer von 10 Jahren bei Einsatz im Freien.

Durch die Umwandlung in einen anderen Wellentyp wird die Nachrichtenverbindung zum Fahrzeug beim Durchfahren des Dehnungskopplers unterbrochen. Bei langen Strecken mit Verstärkern ist dies kein zusätzliches Problem, da zum unterbrechungsfreien Überbrücken der Streckenverstärker ohnehin zwei Fahrzeugkoppler am Fahrzeug vorhanden sein müssen, die automatisch umgeschaltet werden.

5. Fahrzeugkoppler

Zur berührungslosen Verkopplung zwischen dem Fahrzeug und dem parallel zur Fahrspur verlegten Schlitzhohlleiter wird ein Fahrzeugkoppler benutzt. Er ist am Fahrzeug befestigt und taucht durch den Kamin hindurch in den Hohlleiter ein. Bei sendendem Fahrzeug wird im Hohlleiter ein Wellenfeld angeregt, bei empfangendem Fahrzeug entnimmt der Fahrzeugkoppler dem Wellenfeld Energie. **Bild 7** zeigt die Verhältnisse für den Fall, daß das Fahrzeug sendet. Am Koaxialanschluß wird eine *TEM*-Welle eingespeist. Über eine z. B. koplanare Zuleitung läuft die Welle zu einem Antennenelement, das die *TEM*-Welle in eine Hohlleiterwelle umwandelt. Im gezeigten Fall eines symmetrisch aufgebauten Kopplers sind die nach rechts bzw. links ablaufenden Hohlleiterwellen gleich groß. Weiterhin existieren eine über die zunächst koplanare und anschließend koaxiale Zuleitung rückwärts ablaufende Mantelwelle, eine in die Umgebung abgestrahlte Raumwelle sowie eine innerhalb der Zuleitung zurücklaufende, reflektierte Leitungswelle.

Durch entsprechende konstruktive Maßnahmen, wie Sperrtöpfe und Abschirmbleche, lassen sich die Anteile der Mantelwelle und der Raumwelle weit unter 1 % der eingespeisten Leistung halten. Damit kann der Fahrzeugkoppler als verlustloses Dreitor aufgefaßt und mit Hilfe der zugehörigen Streuparameter beschrieben bzw. berechnet werden. Für die Beträge der Streuparameter eines verlustlosen, symmetrischen Dreitores gelten u. a. folgende

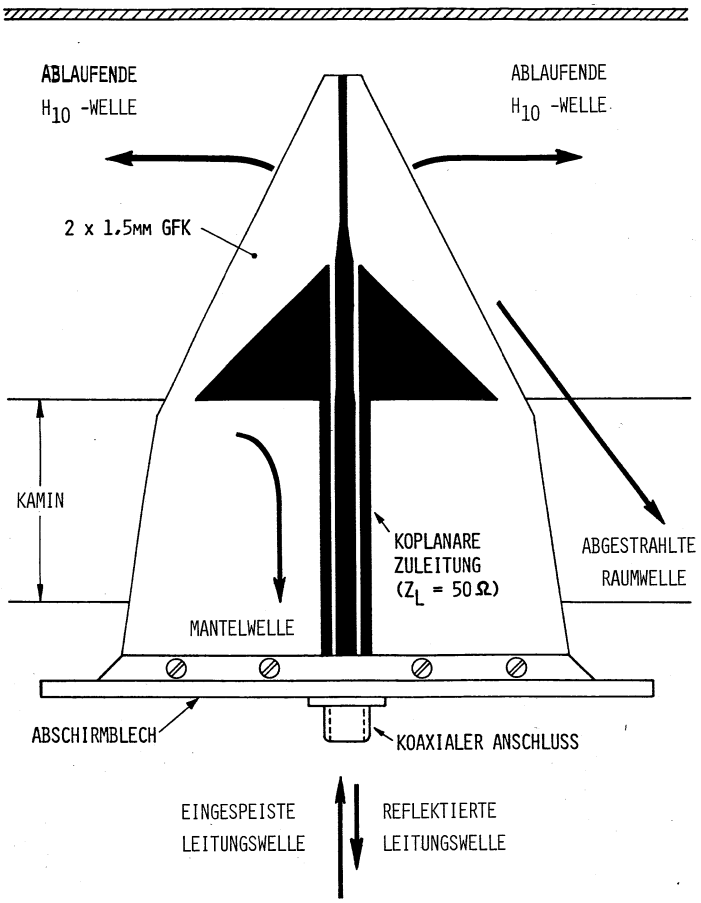

Bild 7: Breitbandiger Fahrzeugkoppler ohne Richtwirkung mit den bei sendendem Fahrzeug auftretenden Wellen

Beziehungen, die bei der Festlegung der von einem Fahrzeugkoppler gewünschten Eigenschaften von Interesse sind:

$$(\underline{S}) = \begin{pmatrix} \underline{r}_{\mathrm{H}} & \underline{t}_{\mathrm{HK}} & \underline{t}_{\mathrm{HH}} \\ \underline{t}_{\mathrm{KH}} & \underline{r}_{\mathrm{K}} & \underline{t}_{\mathrm{KH}} \\ \underline{t}_{\mathrm{HH}} & \underline{t}_{\mathrm{HK}} & \underline{r}_{\mathrm{H}} \end{pmatrix}$$

mit

$\underline{r}_{\mathrm{H}}$ Reflexionsfaktor im Hohlleiter,

$\underline{r}_{\mathrm{K}}$ Reflexionsfaktor am Koaxial-Eingang,

$\underline{t}_{\mathrm{HK}}$ Transmissionsfaktor vom Koaxialeingang zu einem Hohlleiterausgang,

$\underline{t}_{\mathrm{KH}}$ Transmissionsfaktor vom Hohlleiter zum Koaxialanschluß,

$\underline{t}_{\mathrm{HH}}$ Transmissionsfaktor vom Hohlleitereingang zum Hohlleiterausgang,

$$a_{\mathrm{k}} = -20 \log |\underline{t}_{\mathrm{KH}}| = -20 \log |\underline{t}_{\mathrm{HK}}| \text{ Koppeldämpfung,}$$
$$|\underline{r}_{\mathrm{K}}|^2 + 2\,|\underline{t}_{\mathrm{KH}}|^2 = 1,$$
$$|\underline{r}_{\mathrm{K}}|^2 + |\underline{t}_{\mathrm{KH}}|^2 + |\underline{t}_{\mathrm{HH}}|^2 = 1.$$

Aus der Koppeldämpfung läßt sich der Reflexionsfaktor berechnen und umgekehrt. So folgt dann, wenn zum Beispiel 25 % der eingespeisten Leistung als Hohlleiterwelle jeweils nach rechts und links ablaufen (Koppeldämpfung $a_{\mathrm{k}} = 6$ dB), daß die restlichen 50 % der Energie als reflektierte Welle am Koaxialeingang auftreten müssen (Reflexionsfaktor 0,7 bzw. -3 dB).

Als Antennenelement können sowohl kapazitive Stäbe als auch induktive Schleifen benutzt werden. Da Schleifen eine Symmetrierschaltung beim Anschluß an koaxiale Speiseleitungen benötigen, werden Fahrzeugkoppler mit Stabantennen konstruktiv einfacher und breitbandiger.

Wesentliches Ziel der Fahrzeugkopplerentwicklung ist in der Regel eine geringe Änderung der Koppeldämpfung bei Schwankungen des Fahrzeugs. Sofern die Kopplerstruktur keine zu große statische Kapazität gegen die Kaminwände hat, wirkt sich ein seitlicher Versatz praktisch kaum aus, da sich die Amplitude der Transversalkomponenten der H_{10}-Welle in Hohlleitermitte nur wenig ändert. Damit ergibt sich der zulässige horizontale Schwankungsbereich des Fahrzeugteils, an dem der Fahrzeugkoppler befestigt ist, aus der Schlitzbreite s abzüglich der Kopplerdicke d sowie der SHL-Verlegetoleranz Δx.

Um eine geringe Kopplerdicke bei gleichzeitiger hoher mechanischer Stabilität zu erhalten, wurden die meisten Koppler bisher als gedruckte Schaltung auf 1,5-mm-Epoxy-GFK hergestellt. Die Leiterbahnseite wurde dabei durch eine zweite, aufgeklebte Platte abgedeckt. Dieses Verfahren gewährleistet außerdem gute Reproduzierbarkeit und geringe Herstellungskosten.

Für vertikale Fahrzeugkopplerschwankungen steht mechanisch ein größerer Freiraum zur Verfügung, nach oben begrenzt durch die Hohlleiterwand und nach unten durch das Abklingen der Feldstärke im Kamin. Eine veränderte Eintauchtiefe beeinträchtigt die Koppeldämpfung jedoch wesentlich stärker, als es bei seitlichem Versatz der

Fall ist. Ohne besondere konstruktive Maßnahmen nimmt die Koppeldämpfung mit wachsender Eintauchtiefe monoton ab.

5.1 Fahrzeugkoppler mit loser Kopplung

Sofern sich im gleichen Streckenabschnitt mehrere Fahrzeuge befinden, muß die Koppeldämpfung der Fahrzeugkoppler groß sein, damit auch der vom Streckenverstärker am weitesten entfernte noch mit ausreichend Signalpegel versorgt wird. Außerdem muß der Reflexionsfaktor, den derartige Sonden (mit loser Kopplung an das Feld) im Hohlleiter erzeugen, ausreichend klein sein, damit die gegenseitige Beeinflussung gering bleibt. Die Daten einer Sonde, die für eine Strecke mit 6 Fahrzeugen entwickelt wurde, sind in Tabelle 1 angegeben.

5.2 Fahrzeugkoppler ohne Richtwirkung

Ein symmetrisch aufgebauter Fahrzeugkoppler entsprechend Bild 7 teilt die in den koaxialen Anschluß eingespeiste Leistung gleichmäßig nach beiden Seiten auf den Hohlleiter auf. Damit liegt das erreichbare Minimum der Koppeldämpfung bei 3 dB. Die abgebildete Bauform kann über den vollen Frequenzbereich des Hohlleiters eingesetzt werden (Daten in Tabelle 1). Sie wurde auf minimale Koppeldämpfungsänderung bei den im Normalbetrieb auftretenden Fahrzeugschwankungen ausgelegt. Bei Verzicht auf die volle Bandbreite lassen sich diese Änderungen weiter verringern, oder die Anpassung kann verbessert werden. Wie bereits zu Anfang dieses Kapitels erwähnt, sind die einzelnen Kenngrößen jedoch nicht unabhängig voneinander wählbar. **Bild 8** zeigt die Koppeldämpfung zwischen Fahrzeugkoppler und SHL als Funktion der Frequenz. Durch die Fahrzeugschwankungen des Normalbetriebs ändert sich die Koppeldämpfung innerhalb des Bereichs zwischen den gestrichelten Grenzlinien.

Die Verwendung einer koplanaren Zuleitung ergibt sich aus der Forderung nach geringer Dicke des in den SHL eintauchenden Fahrzeugkopplers. Außerdem kann dann die gesamte Materialstärke von $2 \times 1{,}5$ mm als Schutzschicht gegen mechanische Beschädigung der Leiterbahnen eingesetzt werden. Da bei 50 Ω Wellenwiderstand die Abstände zwischen den Leitern sehr klein werden und sich zudem der Wellenwiderstand als Funktion des Leiterabstandes sehr schnell ändert, muß die Fertigung der Antenne sehr sorgfältig erfolgen, damit keine Fehlanpassung bzw. ungewollte Impedanztransformation durch eine von 50 Ω abweichende Zuleitung auftreten.

5.3 Fahrzeugkoppler mit Richtwirkung

Fahrzeugkoppler, die bevorzugt aus einer Richtung empfangen, bzw. die nur in einer Richtung senden, werden eingesetzt, um

- niedrige Koppeldämpfung zu erreichen,
- gute Anpassung am Koaxialeingang bzw. im Hohlleiter zu haben,
- Störungen durch reflektierte Wellen aus dem von der Feststation abgewandten Teil der Schlitzhohlleiterstrecke zwischen Fahrzeug und Streckenende zu unterdrücken.

Bei den bisherigen SHL-Strecken wurden solche Fahrzeugkoppler immer dann eingesetzt, wenn Fernsehbilder übertragen wurden.

Zum Erzielen der Richtwirkung kann man entweder das Prinzip des Mehrelementekopplers benutzen, indem man zwei oder mehr räumlich auseinanderliegende Antennenelemente an eine gemeinsame Leitung anschließt, oder man kann entsprechend **Bild 9** einen passiven Reflektorstab einsetzen. Bei beiden Arten ändert sich die Koppeldämpfung rückwärts sehr stark mit der Eintauchtiefe des Kopplers. In einem größeren Frequenzbereich und bei gleichzeitigen großen Schwankungen des Fahrzeugs sind Vor-Rück-Verhältnisse von mehr als 10 dB nur schwer realisierbar. Für die meisten Anwendungen reicht es jedoch aus, wenn die Richtwirkung nur in einem Teil des Übertragungsbereiches optimiert wird (z. B. im TV-Band).

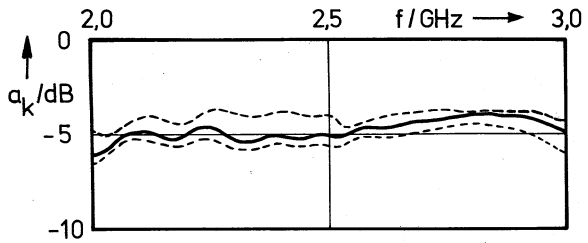

Bild 8: Koppeldämpfung zwischen Fahrzeug und Hohlleiter für den Fahrzeugkoppler in Bild 7 mit Grenzlinien für vertikale Fahrzeugschwankungen von ±8 mm

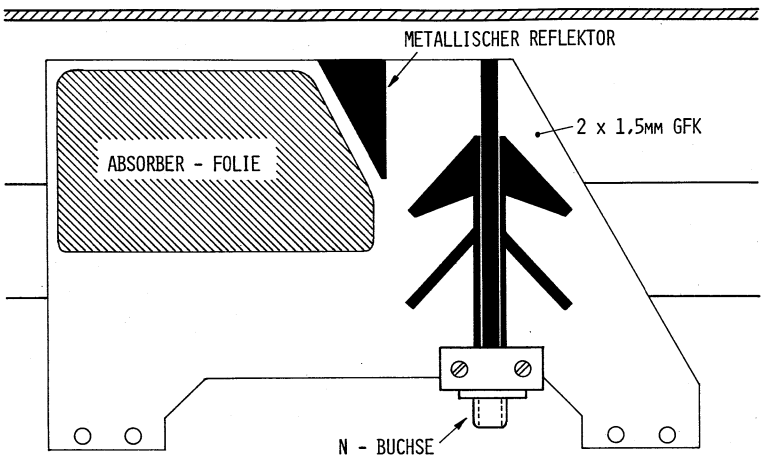

Bild 9: Fahrzeugkoppler mit Richtwirkung

Der Fahrzeugkoppler in Bild 9 (Daten siehe Tabelle 1) hat zusätzlich zum metallischen Reflektor noch eine Absorberfolie, durch die Reflexionsstörungen vom Streckenende weiter vermindert werden. Ein Fahrzeugkoppler dieser Bauart kann jedoch nur dann eingesetzt werden, wenn ein einzelnes Fahrzeug versorgt werden soll.

6. Absorber

Wie bei geschlossenen Hohlleitern können auch im SHL Absorberkeile aus Dämpfungsmaterial eingesetzt werden. Damit sie durchfahrbar sind, werden sie rechts und links in den seitlichen Kammern des Querschnitts angebracht (**Bild 10a**). Das Dämpfungsverhalten wird dadurch nicht beeinträchtigt. Einige SHL-Übertragungssysteme benötigen am Fahrzeug befestigte Absorber, die bei Bedarf in den SHL eingetaucht werden. Derartige Dämpfungsschwerter sollen bei möglichst kurzer Bauweise und bereits bei geringer Eintauchtiefe das Wellenfeld im SHL stark dämpfen. Es wurden zwei Bauformen entwickelt (**Bild 10b**):

α) Platten- bzw. Folien-Absorber,

β) Kamm-Absorber.

Im Fall α) wird eine dünne Platte aus homogenem Dämpfungsmaterial in das Hohlleiterfeld eingetaucht. Diese Bauform eignet sich dann, wenn die vertikalen Fahrzeugschwankungen so klein sind, daß die Absorberplatte stets sehr tief eintauchen kann, oder dann, wenn durch die Art der Befestigung stets dafür gesorgt wird, daß die Platte oben anliegt. Für eine 30 cm lange und 4 mm starke Platte aus Trovidur X (PVC mit Ruß, Hersteller: Dynamit Nobel AG) erhält man breitbandig mehr als 20 dB Dämpfung der Welle im Hohlleiter, sofern die Platte mehr als 2,5 cm $= b/2$ in den Rechteckquerschnitt hineinragt (seitlicher Versatz beliebig; 10-cm-SHL mit $b = a/2$). Dabei sind die Dicke der Platte und ihre Leitfähigkeit optimiert worden. Zur weiteren Dämpfungserhöhung muß die Länge der Platte vergrößert werden.

Für eine Anwendung, bei der noch geringere Eintauchtiefen gefordert waren, wurde ein Kamm-Absorber entwickelt. Er besteht aus vielen gleichabständigen Metallstäben, die in das Hohlleiterfeld eintauchen und diesem Energie entziehen. Die Energie wird außerhalb des Hohlleiters in einer Folie aus Dämpfungsmaterial in Wärme umgesetzt. Die Funktionsweise kann man sowohl damit erklären, daß eine Vielzahl angepaßter Stabantennen mit dem Hohlleiterfeld verkoppelt sind, als auch damit, daß durch die periodische Kamm-Struktur eine Wellenausbreitung im Kamin möglich wird. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit dort kleiner als die der H_{10}-Welle ist, wird der Energiefluß zur Absorberfolie abgelenkt.

Die Eigenschaften solcher metallischer Kamm-Strukturen sind schmalbandiger als die isotroper Scheibenabsorber. Die Stablänge richtet sich nach der Frequenz und nach der Eintauchtiefe für maximale Dämpfung. Abstand und Breite der Stäbe beeinflußt das Verhalten bei seitlichem Versatz. Bei 20 cm Länge erhält man im 10-cm-SHL mit $b = a/2$ für 100 MHz Bandbreite eine Dämpfung von 15 dB, sobald der Kamm mehr als 1 cm $= 0{,}2\,b$ in den Hohlleiterquerschnitt hineinragt. Für Dämpfungen über 20 dB ist diese Bauform weniger gut geeignet. Durch die Ströme in den Metallstäben wird Energie in die Umgebung abgestrahlt, sofern keine Abschirmmaßnahmen getroffen werden.

7. Zusammenfassung

Mit den hier vorgestellten Systemkomponenten, die sich alle bereits im praktischen Einsatz bewährt haben, wird die Möglichkeit gegeben, den Schlitzhohlleiter mit seiner ganzen Bandbreite nutzbar einzusetzen. Es steht ein „Baukasten" bereit, mit dem SHL-Übertragungsstrecken für spezielle Anwendungen zusammengestellt werden können. Bei der Entwicklung der hier beschriebenen Komponenten wurde Wert darauf gelegt, daß die Teile kostengünstig herstellbar und ohne größere Justierarbeiten bzw. SHL-Bearbeitung an der Strecke montierbar sind. Außerdem wurden Witterungs- und Umgebungseinflüsse berücksichtigt.

Da der Einsatzbereich von Schlitzhohlleitern bei etwa 2 GHz liegt, sind die Querschnittabmessungen so groß, daß mechanische Toleranzen keine so entscheidende Rolle spielen wie in der Hohlleitertechnik um 10 GHz bzw. bei noch höheren Frequenzen. Infolgedessen lassen sich Schlitzhohlleiter-Komponenten wesentlich kostengünstiger herstellen.

Die hier beschriebenen Bauteile wurden am Institut für Theoretische Elektrotechnik der Hochschule der Bundeswehr München (Leiter Professor Dr.-Ing. K. Lange) entwickelt für verschiedene SHL-Strecken, die von der Abteilung Hochfrequenztechnik der Firma MBB Ottobrunn projektiert wurden (Leiter Dr.-Ing. W.-D. Schuck).

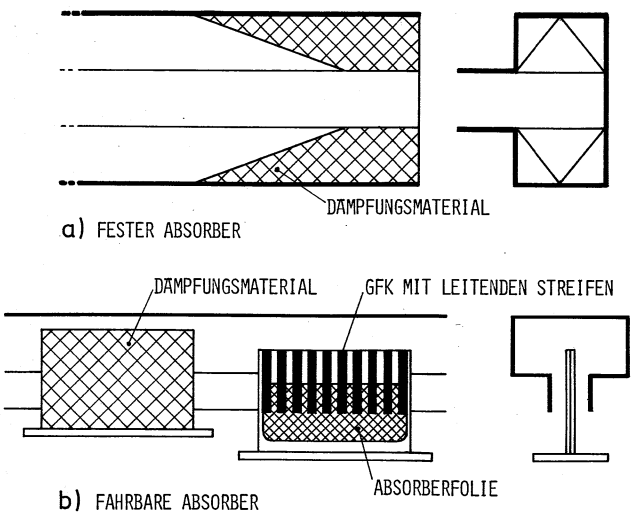

Bild 10: Absorber für Schlitzhohlleiter

Literatur:

[1] Lange, K. P.; Dalichau, H.: Ein Schlitzhohlleiter für breitbandige Nachrichtenverbindungen mit Schienenfahrzeugen. Nachrichtentechn. Z. 30 (1977) S. 92—94.

[2] Dalichau, H.: Offene Wellenleiter für die Nachrichtenübertragung zu spurgeführten Fahrzeugen. VDI-Verlag Düsseldorf 1981.

[3] Dalichau, H.; Lange, K. P.; Schuck, W.-D.: Nachrichtenübertragung mit Schlitzhohlleitern. Frequenz 35 (1981) S. 318—323.

Dr.-Ing. Harald Dalichau, Albertus-Magnus-Weg 9, 8012 Ottobrunn

(Eingegangen am 27. 11. 1981)