Nachrichtenübertragung mit Schlitzhohlleitern

Slotted Waveguide Communication Systems

Von Harald Dalichau, Klaus P. Lange und Wolf-D. Schuck

Mitteilung aus dem Institut für Theoretische Elektrotechnik der HOCHSCHULE DER BUNDESWEHR MÜNCHEN und dem Unternehmensbereich Apparate der MESSERSCHMITT-BÖLKOW-BLOHM GMBH, Ottobrunn

Übersicht:

Die zukünftige Entwicklung des Schienenverkehrs in Richtung automatischer Fahrbetrieb, hohe Verkehrsdichte und hohe Fahrgeschwindigkeit verlangt einen verstärkten Ausbau der Nachrichtenübertragungswege zu Schienenfahrzeugen. Die Frequenzknappheit in den Industrieländern zwingt dazu, diese Nachrichtenwege so zu gestalten, daß die elektromagnetischen Felder außerhalb des Fahrbereichs minimiert werden. Hierzu eignen sich parallel zur Fahrspur verlegte offene Wellenleiter. Von diesen bietet der Schlitzhohlleiter (SHL) die beste Entkopplung zur Umgebung. Nach einer Beschreibung der Eigenschaften des SHL werden ausgeführte Anwendungsbeispiele vorgestellt: Ein 1200 m langer linearer Hochgeschwindigkeitsprüfstand für Magnetschwebefahrzeuge, eine 900 m lange Strecke zur Demonstration der Magnetschwebetechnik auf der Internationalen Verkehrsausstellung 1979 in Hamburg und eine Versuchsstrecke für ein automatisches Personennahverkehrssystem. Geometrie, Abmessungen und Dämpfung der jeweils eingesetzten Schlitzhohlleiter, Eigenschaften der Koppelelemente sowie Aufbau und Leistungsdaten der Übertragungsstrecken werden beschrieben.

Abstract:

Future development of railway-traffic (remote control, high traffic density and high driving speed) demands an increase in communication links with moving trains. The shortage of frequency bands in industrialized regions makes it mandatory to use communication systems with negligible outside electromagnetic fields. Especially useful are open waveguides parallel to the track. From all these the slotted waveguide (SWG) guarantes the best decoupling from the environment. After a description of the properties of the SWG, three applications are given in detail: A linear highspeed-test-track (1200 m) for magnetic levitated vehicles, a track of 900 m length for the demonstration of a magnetic levitation train at the International Transport Exhibition (IVA) 1979 in Hamburg and a test facility for an automatic urban transit system. Shape, dimension and transmission data of the slotted waveguides, properties of the coupling elements and details of the communication system are described.

Für die Dokumentation:

Nachrichtenübertragung zu Fahrzeugen / Offener Wellenleiter / Schlitzhohlleiter / Telemetrie / Beweglicher Funkdienst / Nahfeldantenne

1. Nachrichtenübertragung zu Schienenfahrzeugen

Moderne spurgeführte Verkehrssysteme stehen im Zeichen von Automatisierung und Rationalisierung verbunden mit hohen Beförderungskapazitäten. Aus Betriebs- und Sicherheitsgründen ergibt sich die Notwendigkeit einer Nachrichtenübertragung zwischen den Fahrzeugen und den Steuerzentralen. Die erforderlichen Kanalkapazitäten übersteigen dabei meist die Leistungsfähigkeit herkömmlicher Übertragungssysteme (Zugfunk, Linienzugbeeinflussung).

Zum Aufbau derartiger Übertragungswege eignen sich prinzipiell sowohl der Freistrahlfunk als auch offene Wellenleiter, die, parallel zur Trasse verlegt, ein linienförmiges elektromagnetisches Feld erzeugen, das mit einer am Fahrzeug angebrachten Nahfeldantenne in Wechselwirkung tritt.

Die Eigenschaften der Übertragungssysteme mit Freistrahlfunk sind durch den Zugfunk der Deutschen Bundesbahn bekannt. Abgesehen von derzeit laufenden Untersuchungen im mm-Wellen-Bereich ist ein weiterer Ausbau solcher Systeme in Richtung breitbandiger Datenübertragung aus Gründen der Frequenzknappheit nicht möglich. Dagegen gestatten die offenen Wellenleiter den Aufbau von Nachrichtenübertragungswegen, die andere Funkverbindungen nicht stören, da sich ihr elektromagnetisches Feld auf die unmittelbare Umgebung der Fahrspur beschränkt.

Bild 1 zeigt die Grundformen solcher offener Wellenleiter [1]. Das Einsatzgebiet der Paralleldrahtleitung (a) sind

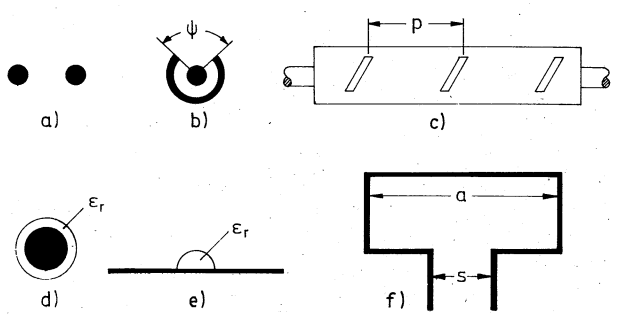

Bild 1: Grundformen offener Wellenleiter
a) Paralleldrahtleitung mit *TEM*-Welle
b) Koaxialleitung mit durchgehendem Längsschlitz (ohne Abstrahlung, *TEM*-Welle), $\psi \approx 110°$
c) geschlitzte Koaxialleitung mit Abstrahlung (Leckwelle), $p \approx \lambda/2 \ldots \lambda$
d) Harms-Goubau-Leitung mit E_{01}-Welle
e) Dielectric-Image-Line mit HE_{11}-Welle, $r_0 \approx \lambda_\varepsilon/4$
f) Schlitzhohlleiter mit H_{10}-Welle, $s \approx 0{,}2a \ldots 0{,}4a$

schmalbandige Signalübertragungen bei niedrigen Frequenzen (typisches Anwendungsbeispiel: Linienzugbeeinflussung der Deutschen Bundesbahn bei 35 und 55 kHz). Das Koaxialkabel mit durchgehendem Längsschlitz (b) wird vorwiegend in Tunnels eingesetzt und ermöglicht Sprechfunkverbindungen mit bis zu 95 % Orts- und Zeitwahrscheinlichkeit (Anwendungsbeispiel: U-Bahn Hannover und München, Zugfunk in Tunnels, Bergwerke); gebräuchliche Trägerfrequenzen liegen bei 80, 160 und 460 MHz.

Das Koaxialkabel mit Energie abstrahlenden Schlitzen (c) (Leckkabel) entspricht einer Kette von Einzelantennen mit phasenstarrer Speisung. Es wurde z. B. bei der New-Sanyo-Linie in Japan eingesetzt (400 MHz). Die beiden Oberflächenwellenleitungen (d und e) haben noch keine praktische Anwendung gefunden. Sie sind aber im Gespräch für den Anwendungsbereich „guided radar", d. h. für eine Radarüberwachung der Trasse zur Ortung von Hindernissen.

Über den Schlitzhohlleiter (f) und seine bisherigen Anwendungen wird im folgenden berichtet.

2. Schlitzhohlleiter mit H_{10}-Welle

Der Schlitzhohlleiter ist ein Rechteckhohlleiter, dessen eine Breitseite in der Mitte einen durchgehenden Längsschlitz aufweist, der bis zu 0,4 a breit ist [2]. Auf den Längsschlitz ist ein Kamin aufgesetzt. Im Querschnitt ist als niedrigster Wellentyp eine H-Welle ausbreitungsfähig, deren Feld mit numerischen Methoden berechnet wurde [1]. Betrachtet man in **Bild 2** nur die Feldlinien innerhalb des Rechteckquerschnitts, so sieht man, daß diese weitgehend mit denen der H_{10}-Welle in einem normalen Rechteckhohlleiter übereinstimmen. Im Kamin nimmt die Amplitude des Hohlleiterfeldes nach außen zu exponentiell ab. Sofern die Kaminhöhe h mindestens gleich der Schlitzbreite s gewählt wird, ist das Feld am offenen Ende des Kamins bereits so stark abgeklungen, daß die verbleibende Störstrahlung in der Praxis vernachlässigbar ist.

Der Schlitzhohlleiter entspricht damit einem geschlossenen Hohlleiter. Er erfüllt die aus der Feldtheorie für geschlossene Hohlleiter ableitbare Bedingung, daß die Frequenzabhängigkeit der Feldgrößen durch eine Konstante, die kritische Frequenz f_c, eindeutig festgelegt wird. Zum Beispiel gilt für die Frequenzabhängigkeit der Wellenlänge

$$\lambda_H = \lambda_0 / \sqrt{1-(f_c/f)^2}$$

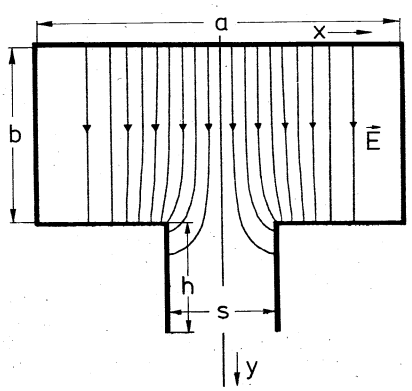

Bild 2: Querschnitt des Schlitzhohlleiters mit elektrischen Feldlinien der H_{10}-Welle (quadratischer Kamin $s=h$ mit Schlitzbreite $s=0{,}3a$)

Für die praktische Anwendung zur Nachrichtenübertragung mit spurgeführten Fahrzeugen ist jedoch der kontinuierliche Längsschlitz vorhanden, durch den eine am Fahrzeug angebrachte Antenne in das Hohlleiterfeld eintauchen kann.

Die Leitungseigenschaften können mit für die Praxis ausreichender Genauigkeit aus den bekannten Formeln für die H_{10}-Welle im geschlossenen Rechteck berechnet werden. Die Fehler liegen für Wellenlänge und Gruppenlaufzeit unter 1 %. Bei der Dämpfung ergeben sich etwas stärkere Abweichungen.

Für die in den folgenden Anwendungen eingesetzten Schlitzhohlleiterquerschnitte liegen die an H_{10p}-Resonatoren gemessenen Dämpfungswerte etwa 14 % über den theoretischen Werten. Dies ist zum einen durch die Feldverzerrung im Bereich der relativ breiten Schlitze bedingt, zum anderen durch Oberflächenrauhigkeit, die auch bei geschlossenen Hohlleitern je nach Herstellungsart und Leiterwerkstoff bei Frequenzen um 2 GHz zu 5 bis 10 % Dämpfungserhöhung führt (max. 34 % tolerierbar nach IEC bei 2 GHz).

Die Verkopplung zwischen Fahrzeug und Wellenleiter erfolgt durch einen Fahrzeugkoppler, der z. B. kostengünstig als gedruckte Schaltung auf Epoxy-GFK hergestellt werden kann. Die etwa 3 mm dicke Scheibe taucht in das Hohlleiterfeld ein; je nach Aufbau und Bandbreite sind Koppeldämpfungen bis hinab zu 3 dB ohne Richtwirkung und 0 dB mit Richtwirkung realisierbar. Bei starr am Fahrzeug befestigtem Fahrzeugkoppler sind in x-Richtung Fahrzeugschwankungen entsprechend der Schlitzbreite s und in y-Richtung entsprechend der Hohlleiterhöhe b zulässig.

Infolgedessen richtet sich die Größe des jeweils verwendbaren Schlitzhohlleiters nach der Amplitude der auftretenden Fahrzeugschwankungen. Je besser die Spurführung, desto kleiner können die Abmessungen s bzw. a des Hohlleiters gewählt werden.

Bei sich bewegendem Fahrzeug entstehen — neben der langsamen Pegeländerung aufgrund der Leitungsdämpfung — Pegelschwankungen durch reflektierte Wellen im Hohlleiter und durch Bewegungen des Fahrzeugkopplers quer zur Fahrtrichtung. Die Welligkeit des Signalpegels durch Reflexionsstellen im Hohlleiter beträgt

$$\Delta a_k/\mathrm{dB} = 20 \log \left((1+r)/(1-r)\right).$$

Sie kann durch Fahrzeugkoppler mit Richtwirkung reduziert werden. Die Koppeldämpfungsänderung durch Fahrzeugschwankungen läßt sich durch die Konstruktion des Fahrzeugkopplers minimieren. Breitbandig sind Werte unter ± 1 dB erreichbar. Über Aufbau und Eigenschaften der Fahrzeugkoppler sowie über die Konstruktion der Dehnungskoppler und der Übergänge auf Koaxialkabel wird in Kürze in einem zweiten Aufsatz berichtet.

Entlang der Strecke treten im Feld des Schlitzhohlleiters keine Interferenz-Nullstellen oder anderweitig hervorgerufene Übertragungsunterbrechungen auf. In bezug auf Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit entspricht die berührungsfreie Nachrichtenübertragung zwischen Fahrzeug und Schlitzhohlleiter einer fest installierten Leitungsverbindung.

Zwei weitere, wesentliche Vorteile von Schlitzhohlleiterstrecken sind die geringe Störstrahlung (andere Funkbindungen im gleichen Frequenzbereich werden nicht gestört und können selbst auch nicht stören) und die Hoch-

paßeigenschaft der H_{10}-Welle. Dies ist speziell für den Einsatz mit elektrisch betriebenen Schienenfahrzeugen wichtig, da diese ein sehr energiereiches Störspektrum bei Frequenzen bis zu 100 MHz erzeugen.

Umgebungseinflüsse auf die Übertragungseigenschaften von Schlitzhohlleiterstrecken sind nicht gegeben, da praktisch kein Außenfeld vorhanden ist; Umwelteinflüsse auf das Innenfeld der H_{10}-Welle (Nebel, Luftfeuchtigkeit, Schwitzwasser, Verschmutzung, Oberflächenkorrosion, Schnee, Eis etc.) haben unter realistischen Randbedingungen keinen nennenswerten Einfluß. Es muß lediglich gewährleistet sein, daß keine geschlossenen Wasserflächen im Innern auftreten. Dies erreicht man dadurch, daß der Schlitz nach unten zeigt.

3. Telemetriedatenübertragung von einem Hochgeschwindigkeitsfahrzeug

Nach Messungen im Labor und an einer Versuchsstrecke von 100 m Länge wurde 1976 eine 1200 m lange Schlitzhohlleiterübertragungsstrecke in Manching bei Ingolstadt gebaut. Dort betrieb die ARGE Transrapid-EMS, ein Firmenzusammenschluß für elektromagnetische Schwebetechnik, einen linearen Hochgeschwindigkeitsprüfstand, auf dem unbemannte, ferngesteuerte Magnetschwebefahrzeuge bei Fahrgeschwindigkeiten bis zu 400 km/h untersucht wurden. **Bild 3** zeigt das Versuchsfahrzeug KOMET (Komponentenmeßträger) und den Anbringungsort des Hohlleiters im Streckenquerschnitt.

Mechanische Daten:

Hohlleiter:
Auf einer Biegebank aus 0,85 mm verzinktem Stahlblech gebogen **(Bild 4)**

Strecke:
Gesamtlänge 1 200 m (geradlinig) zusammengesetzt aus 3-m-Teilstücken
Verbindung der Teilstücke über eine 10 cm lange, eng anliegende Außenmanschette aus 2-mm-Blech; eine Seite punktgeschweißt, andere Seite umlaufend Blindnieten
Wärmedehnungsausgleich alle 12 m durch Weglassen der Blindnieten

Fahrzeugschwankungen im Normalbetrieb (Grenzdaten in Klammern):
$\pm$ 6 mm ($\pm$10 mm) horizontal
$\pm$13 mm ($\pm$17 mm) vertikal

Elektrische Daten:

Fahrzeugkoppler:
2 dB Koppeldämpfung mit Richtwirkung (Vor-Rück-Verhältnis 10 dB), starr am Fahrzeug befestigt

Vom Fahrzeug zur Bodenstation übertragene Signale:
PCM-Telemetrie bei 1476 MHz; Bitrate 1,3 Mbit/s; FM mit Modulationsindex $\eta = 1$
Fernsehbild bei 1404 MHz; Videobandbreite 5 MHz; FM mit $\eta = 1$

Obwohl die an H_{10p}-Resonatoren gemessene Dämpfung des 20-cm-Schlitzholleiters nur 8 dB/km beträgt, ergab sich für die fertig montierte Strecke eine Dämpfung von 18 dB/km. Durch die Herstellungsart bedingte Querschnittssprünge an den Verbindungsstellen der Teilstücke zusammen mit der anspruchslosen Verbindung über eine Manschette erzeugten an jeder Flanschverbindung einen Energieverlust durch Abstrahlung. Weiterhin verursachten diese äquidistanten Störstellen periodische Dämpfungsspitzen im Frequenzgang der Strecke (Amplitude 2,5 dB, Abstand 40 MHz), da sich alle reflektierten Wellen immer dann phasengleich addieren, wenn ein ganzzahliges Vielfaches der halben Hohlleiterwellenlänge gleich der 3-m-Teillänge ist.

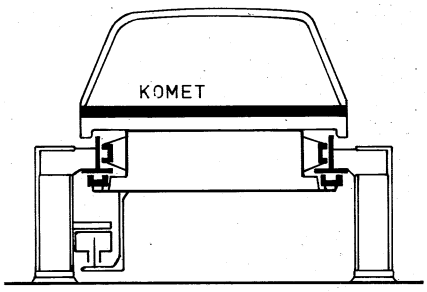

Bild 3: Magnetschwebefahrzeug KOMET mit am Fahrweg montiertem Schlitzhohlleiter
(Schlitzhohlleiter vergrößert dargestellt)

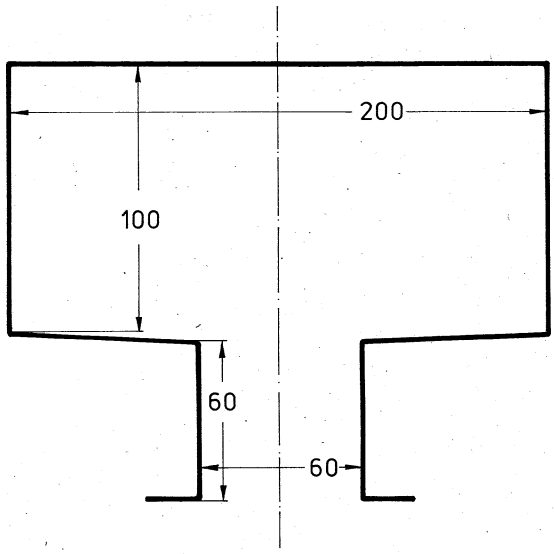

Bild 4: Schlitzhohlleiter für die Versuchsstrecke der Transrapid-EMS in Manching (Maße in mm)
nutzbarer Frequenzbereich: 1,0 bis 1,5 GHz
gemessene Dämpfung: 8 dB/km bei 1,3 GHz

Trotz der störenden Auswirkungen der stark reflektierenden Flanschverbindungen hat die Schlitzhohlleiterstrecke die ihr gestellte Aufgabe erfüllt. Die Feinstruktur der Pegelschwankungen beim Abfahren der Strecke betrug $\pm$1 dB. Dies ergab sich etwa zur Hälfte aus der Fehlanpassung der Welle im Hohlleiter und zur Hälfte aus der Änderung der Koppeldämpfung bei Fahrzeugschwankungen. Aufgrund dieser geringen Pegeländerungen konnte die in den Hohlleiter eingespeiste Sendeleistung im Telemetriekanal für 15 dB Störabstand auf 0,15 µW reduziert werden.

Die Erfahrungen beim Betrieb der Strecke haben gezeigt, daß das Material und die Herstellungsart für sehr längshomogene Hohlleiterstrecken ungeeignet sind und daß die verwendeten mechanisch einfachen Flanschverbindungen zu elektrisch unbefriedigenden Ergebnissen führen. Dennoch ist es positiv zu bewerten, daß auch eine mechanisch derart einfach aufgebaute Schlitzhohlleiterstrecke voll funktionstüchtig ist. Die Übertragungsqualität wurde hier besonders augenfällig dadurch demonstriert, daß die von der Kamera im fahrenden Fahrzeug aufgenommenen Fernsehbilder auf dem Übertragungsweg keine sichtbaren Qualitätseinbußen erlitten.

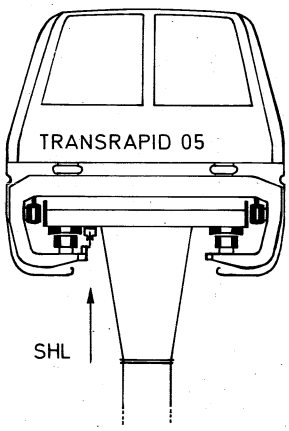

Bild 5: Magnetschwebebahn mit Fahrwegträger und daran befestigtem Schlitzhohlleiter

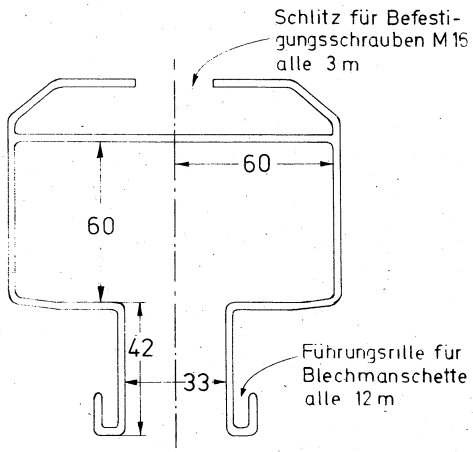

Bild 6: Querschnitt des Schlitzhohlleiters für die IVA-Hamburg (Maße in mm)
Al-Strangpreßprofil mit 2,5 mm Wandstärke
nutzbarer Frequenzbereich: 1,6 bis 2,4 GHz
gemessene Dämpfung: 13 dB/km bei 2 GHz

4. Betriebssteuerung einer Magnetschwebebahn

Bei der Internationalen Verkehrsausstellung in Hamburg 1979 wurde die Magnetschwebebahn Transrapid 05 der Öffentlichkeit vorgestellt. Während der Ausstellung wurden regelmäßig Demonstrationsfahrten mit Besuchern unternommen (Höchstgeschwindigkeit 75 km/h). Zur Übertragung von Steuersignalen, Betriebsdaten, Sprache und Fernsehbildern wurde ein 12-cm-Schlitzhohlleiter eingesetzt. **Bild 5** zeigt den Befestigungsort am Fahrwegträger und den Querschnitt des Fahrzeugs. Die Strecke war 900 m lang und verlief im wesentlichen geradlinig. Der Schlitzhohlleiter (**Bild 6**) war aus Aluminium (AlMgSi 0,5) im Strangpreßverfahren hergestellt. Die 12 m langen Teilstücke wurden längsverschieblich durch im oberen Schlitz eingeschobene Schrauben mit Teflon-Unterlegscheiben aufgehängt. Die Verbindung der Teillängen erfolgte über 50 cm lange Außenmanschetten, ebenfalls aus Aluminium, so daß alle 12 m ein Wärmedehnungsausgleich möglich war.

Über den Schlitzhohlleiter wurden insgesamt 7 digitale und analoge Nachrichten-Kanäle (davon 3 von der Zentrale zum Fahrzeug) geführt (Telekommando, Telemetrie, Sprache, Fahrgastinformation, Fernsehbild) mit Nutzbandbreiten zwischen 4 kHz für Sprache und 6 MHz für das Fernsehbild [3]. Die einzelnen Kanäle wurden zu 3 Bändern zusammengefaßt:

Band 1: 2,2 GHz ± 5 MHz
Band 2: 2,3 GHz ± 12,5 MHz
Band 3: 2,02 GHz ± 5 MHz

Mit Sendeleistungen von 1 μW wurden Störabstände besser 40 dB bzw. Bitfehlerquoten kleiner 10^{-9} erreicht. Der Fahrzeugkoppler mit Richtwirkung (zur Vermeidung von Geisterbildern im Fernsehbild) hatte eine Koppeldämpfung von 3,5 dB und ein Vor-Rück-Verhältnis besser als 10 dB. Durch die beim Fahren betriebsmäßig auftretenden Schwankungen des Magnetgestells, an dem der Fahrzeugkoppler befestigt war, von ±17 mm horizontal und ±20 mm vertikal änderte sich die Koppeldämpfung weniger als ±1 dB.

Bild 7 zeigt ein Blockschaltbild des Übertragungssystems. Es wurden Standard-Komponenten in Koaxialbauweise und Sender bzw. Empfänger in Halbleitertechnik eingesetzt. Die beiden Übertragungsrichtungen werden durch Zirkulatoren voneinander getrennt.

Der Fahrzeugantrieb erfolgte durch einen Linearmotor nach dem Langstator-Prinzip. Durch das beim Fortschalten des Magnetfeldes entlang der Trasse auftretende Störspektrum wurde die Nachrichtenübertragung im direkt neben dem Langstator-Paket angebrachten Hohlleiter (Bild 5) wegen seines Hochpaß-Charakters ($f_g = 750$ MHz) jedoch nicht beeinflußt.

Ein weiterer Vorteil des Schlitzhohlleiters, die Entkopplung zwischen dem Wellenfeld im Hohlleiter und der Umgebung, wurde bei dieser Anwendung ebenfalls deutlich. Zwischen den Richtfunkstrecken des Hamburger Fernsehturms in unmittelbarer Nachbarschaft der Anlage und den im gleichen Frequenzbereich arbeitenden Bändern der Schlitzhohlleiterstrecke kam es nicht zu gegenseitigen Beeinflussungen. Die Betriebsgenehmigung wurde vom FTZ erteilt.

Die beim Bau und Betrieb dieser Strecke gewonnenen Erfahrungen sind:

— Ein stranggepreßtes Aluminium-Profil ergibt einen elektrisch und mechanisch optimal-längshomogenen Hohlleiter;

— Blechmanschetten als Dehnungsausgleich mit Gleitkontakten Al auf Al und mit fertigungs- und montagebedingten Maßabweichungen bis zu ±2 mm ergeben elektrisch und mechanisch unbefriedigende Eigenschaften.

Nach dem Ende der Verkehrsausstellung wurde die gesamte Magnetbahn-Anlage abgebaut und 1980 mit auf 600 m verkürztem Fahrweg als „Magnetbahn-Versuchsanlage Kassel" erneut in Betrieb genommen. Ebenso wie in Hamburg erfüllt das Schlitzhohlleiterübertragungssystem auch beim Versuchsbetrieb in Kassel alle Anforderungen.

5. Automatischer Fahrbetrieb beim Cabinentaxi

Das System Cabinentaxi ist für den bedarfsgesteuerten, fahrplanlosen Nahverkehr der Zukunft konzipiert. Entlang einer aufgeständerten Trasse fahren auf Gummirollen Kabinen für 3 bis 12 Personen in der einen Richtung als Standbahn und in der Gegenrichtung als Hängebahn. Es sind in der Regel viele Fahrzeuge gleichzeitig auf der Strecke.

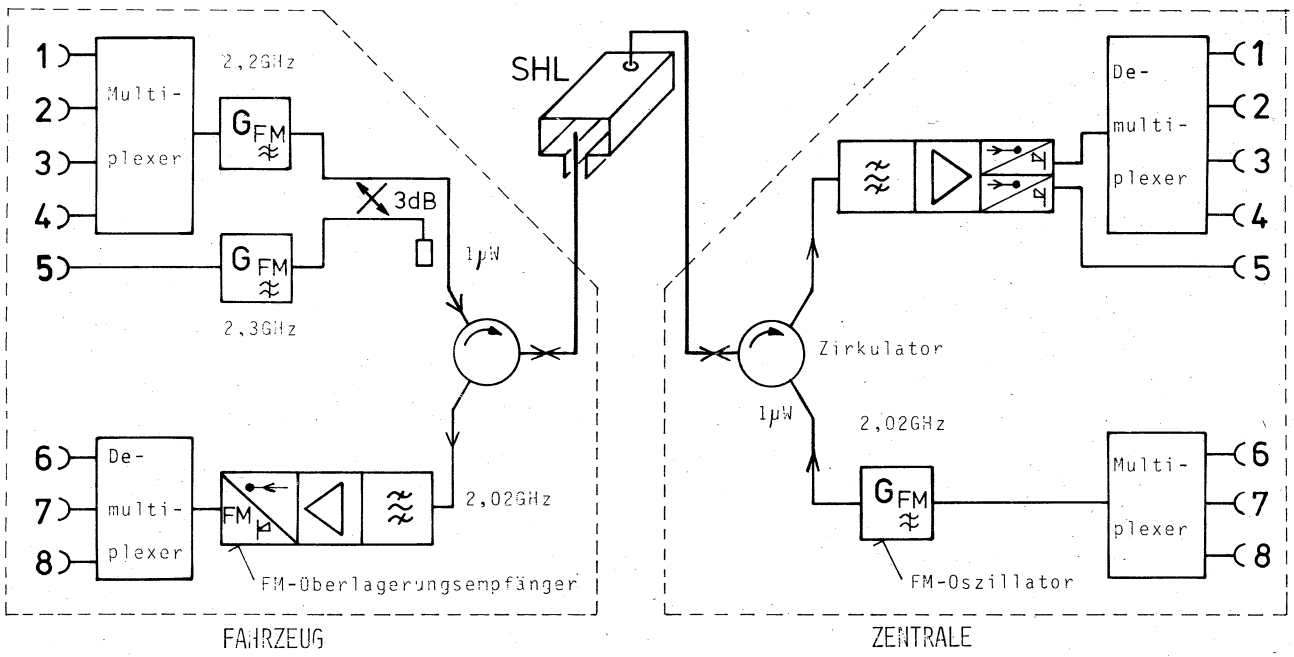

Bild 7: Blockschaltbild IVA-Hamburg 1979

1: Telemetrie } alternativ
2: Ladestromtelemetrie } alternativ
3: Sprache
4: Telekommando
5: Fernsehen
6: Sprache
7: Fahrgastinformation
8: Telekommando

Die hier beschriebene Schlitzhohlleiteranwendung bezieht sich auf eine 1,6 km lange C-Bahn-Anlage, die für die Hamburger City-Nord geplant war, jedoch aus finanzpolitischen Gründen nicht gebaut wurde. Die Funktion der Komponenten, einschließlich des Schlitzhohlleitersystems, wurde mehrere Jahre lang auf einer Versuchsstrecke in Hagen in Westfalen erprobt.

Im Unterschied zu den vorangegangenen Anwendungsbeispielen enthält diese Strecke viele Weichen und enge Kurven mit Krümmungsradien bis herab zu 12 m. Damit die starr montierten Fahrzeugkoppler ohne mechanische Schaltvorgänge an den Weichen aus dem einen Hohlleiter heraus und in den nächsten wieder hineinfahren können, ist das Profil (**Bild 8**) mit dem Schlitz zur Seite am Fahrbalken befestigt. Diese an sich ungünstige Montageform ist nur deshalb möglich, weil beim Cabinentaxi eine für andere Komponenten notwendige Fahrbahnverkleidung vorgesehen ist. Unter dieser Verkleidung ist der Hohlleiter gegen den direkten Einfluß von Schnee und Regen geschützt. Zur Vermeidung von Schwitzwasseransammlungen im Hohlleiterinneren sind in regelmäßigen Abständen Abflußlöcher in die untere Seitenwand gebohrt, die das Wellenfeld nicht beeinflussen.

Die SHL-Strecke ist aus 12-m-Teilstücken zusammengesetzt, die durch eine umlaufende Schweißnaht verbunden sind. Diese Verbindungsart gewährleistet elektrisch und mechanisch optimale Ergebnisse. Die Aufhängung läßt Längsverschiebungen zu und alle 40 m ist ein Dehnungskoppler eingebaut.

Die Kabinen fahren automatisch, mit einem Blocksystem, bei dem der Schlitzhohlleiter die Kennung des Streckenabschnitts zur Kabine überträgt. Bei dem geplanten Projekt ergaben sich maximale Blocklängen von 600 m, so daß keine Streckenverstärker erforderlich waren.

An jeder Kabine sind vier Fahrzeugkoppler (zwei an jeder Seite). An den Enden der Streckenabschnitte und an

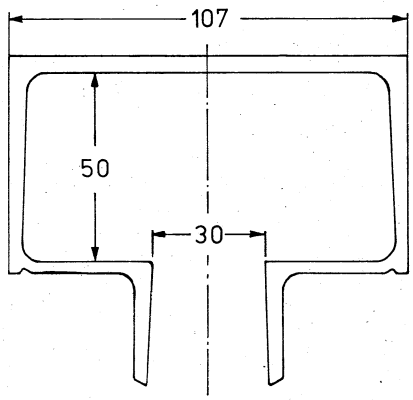

Bild 8: Querschnitt des Schlitzhohlleiters für das Cabinentaxi
Strangpreßprofil aus AlMgSi 0,5 (Maße in mm)
nutzbare Bandbreite: 2,0 bis 3,0 GHz
gemessene Dämpfung: 17 dB/km bei 2,5 GHz

den Weichen sind die Hohlleiter überlappend rechts und links vom Fahrzeug angebracht, so daß stets einer der Koppler in einen Hohlleiterschlitz eintaucht. Die Umschaltung der Koppler erfolgt automatisch. Bei bis zu 6 Kabinen pro Strecke entnehmen gleichzeitig 12 Koppler dem Hohlleiter Energie. Damit auch für den 12. Koppler noch ausreichend Signalamplitude vorhanden ist und damit die gegenseitige Beeinflussung durch interferierende, im SHL reflektierte Wellen klein bleibt, erhielten die Fahrzeugkoppler 15 dB ± 3 dB Koppeldämpfung im Frequenzbereich 2,4 bis 2,5 GHz. Jeder Koppler (der hier als Feldsonde bezeichnet werden kann) dämpft die durchgehende Welle im SHL um höchstens 0,4 dB und erzeugt eine reflektierte Welle im SHL kleiner als −12 dB.

Eine weitere Aufgabe des Schlitzhohlleiters ist das Erkennen von defekten, auf der Strecke stehengebliebenen Kabinen. Dazu wird im Falle eines Defektes von der betreffenden Kabine ein 20 cm langes Dämpfungsschwert

signaltechnisch sicher freigegeben. Das Dämpfungsschwert, z. B. eine dünne Platte aus Absorbermaterial, taucht in den Hohlleiter ein und senkt dort den Pegel eines modulierten Trägers um mehr als 15 dB ab. Dieser Signalausfall wird detektiert und der blockierte Streckenabschnitt wird gesperrt (Systembezeichnung: Mikrowellenschranke [4]).

6. Zukünftige Anwendungen

Zur Zeit befindet sich ein Schlitzhohlleiter-Übertragungssystem für die „Transrapid Versuchsanlage Emsland" (Nähe Nordseeküste) im Bau. Dort wird auf einer zunächst 20 km langen Strecke ab Ende 1982 die Magnetbahn Transrapid 06 im Dauerbetrieb erprobt [5]. Die Steuersignale, die im Versuchsbetrieb anfallenden Meßdaten und Sprache werden über einen trassenparallelen Schlitzhohlleiter übertragen.

Der Schlitzhohlleiter bietet für die Nachrichtenübertragung bei spurgeführten Fahrzeugen große Übertragungsbandbreite, geringe Übertragungsdämpfung (Leitungsdämpfung + Koppeldämpfung), hohe Störsicherheit und gute Entkopplung gegen die Umgebung.

Die reinen Herstellungskosten der 12-m-Teillängen eines stranggepreßten Aluminium-Schlitzhohlleiters entsprechend Bild 8 betragen etwa 20 DM. Bei einer Nutzbandbreite von 1000 MHz handelt es sich dabei um eine der preiswertesten Hochfrequenzleitungen, die derzeit einsetzbar ist. Über die Systemkosten, die außer den Leitungskosten noch die Kosten für Montage, stationäre Sender und Empfänger sowie die Fahrzeugausrüstung enthalten, lassen sich keine allgemeingültigen Aussagen machen; sie richten sich nach den speziellen Anforderungen des Einzelfalls. Die Ausrüstung eines automatisch fahrenden Flurförderers mit z. B. 300 bit/s kostet sicherlich weniger als die einer Hochgeschwindigkeitsmagnetbahn mit Datenraten von mehreren Mbit/s.

Im Falle großer Verkehrssysteme kann man zur Abschätzung der zusätzlichen Kosten heranziehen, daß die Linienzugbeeinflussung der Deutschen Bundesbahn 100 DM pro Meter (2 Datenkanäle mit 1200 bit/s bzw. 600 bit/s) und der Zugfunk 35 DM pro Meter kostet (1 Sprechfunkkanal und 1 Datenkanal mit 600 bit/s und 95 % Verfügbarkeit) (Systemkosten: Stand 1980).

Literatur:

[1] Dalichau, H.: Offene Wellenleiter für die Nachrichtenübertragung zu spurgeführten Fahrzeugen. VDI-Verlag Düsseldorf 1981.
[2] Lange, K. P.; Dalichau, H.: Ein Schlitzhohlleiter für breitbandige Nachrichtenverbindungen mit Schienenfahrzeugen. Nachrichtentechn. Z. 30 (1977) S. 92—94.
[3] Koerv, P. A. A.: Control Systems for Operating the Long Stator Maglev Vehicel TR 05. IEEE Trans. Vehicular Technol. 29 (1980) S. 23—34.
[4] Schuck, W.-D.; Brauer, J.: Verfahren und Anordnung zur Erkennung defekter spurgebundener Objekte (Fahrzeuge), die sich auf derselben Bahn oder Spur befinden. Patentanmeldung P 2918178.0.
[5] Kretzschmar, R.; Mölzer, P.: Die Planung der Transrapid-Versuchsanlage im Emsland. Eisenbahntechn. Rdsch. 5 (1979) S. 339—352.

Dr.-Ing. Harald Dalichau, Albert-Magnus-Weg 9, 8012 Ottobrunn
Prof. Dr.-Ing. Klaus P. Lange, Theodor-Heuss-Str. 10, 8011 Putzbrunn
Dr.-Ing. Wolf-Dieter Schuck, Kiem-Pauli-Weg 61, 8014 Neubiberg

(Eingegangen am 3. 7. 1981)

Neues aus Forschung, Industrie und Wirtschaft

Neuartiger Logikgenerator erleichtert digitales Testen

Rationeller testen und stimulieren lassen sich jetzt moderne Mikroprozessor-Baugruppen wie auch konventionelle Digitalschaltungen mit dem neuen Logic Generator IGA von Rohde & Schwarz. Durch sein universelles Konzept, seine benutzerfreundliche Meßobjekt-Adaptierung und seinen ungewöhnlichen Bedienkomfort erübrigt sich das unwirtschaftliche Selbstbauen spezieller Datengeber für Logikschaltungen. Gegenüber herkömmlichen Wortgeneratoren erleichtert der IGA die Mikroprozessor-Simulation, die Busansteuerung und die Meßobjekt-Adaptierung sowie Datenein- und -ausgabe und vereinfacht dadurch entscheidend Meßvorgänge an Digitalschaltungen für die Elektrotechnik und Chemie, den Maschinen- und Flugzeugbau.

Der IGA ist mit 16 oder 32 Datenkanälen lieferbar, wobei in jedem Fall eine Speichertiefe von 1024 Worten zur Verfügung steht. Eine Batteriepufferung verhindert auch bei Ausschalten des Gerätes den Verlust der gespeicherten Bitmuster. Die Datenausgänge werden über Treiberschaltungen, die es mit festem TTL-Pegel und hoher Belastbarkeit als Standardzubehör oder mit variablem Pegel als Ergänzung gibt, mit dem Meßobjekt verbunden. Alle Datenkanäle sind an beliebiger Stelle innerhalb der Datenausgabe in den hochohmigen Tristate-Zustand zu schalten, wobei die Steuerung kanalgruppenweise für jeweils acht Leitungen geschehen kann, so daß auch hochohmige und aktive Datenkanäle mischbar sind. Beim Steuern eines Bussystems bleiben so zum Beispiel die Adreß-Steuerleitungen aktiv, während die Datenleitungen hochohmig werden. Ein zusätzlicher Clock-Ausgang kennzeichnet den Zeitpunkt der Gültigkeit der Daten; Breite und Beginn des Clock-Impulses sind veränderbar.

Der IGA läßt sich mit dem internen Clock-Generator oder über einen externen Clock-Eingang bis zu einer oberen Frequenzgrenze von 1,8 MHz betreiben. Neben dieser synchronen Betriebsart kann das Gerät auch asynchron im Zweidraht- oder Dreidraht-Handshake nach IEC 625-1 arbeiten, wobei eine Datenrate von maximal 1 MHz erreicht wird. Bei Ausstattung mit einer Multiclock-Treibereinheit zum Steuern und Stimulieren von Mikroprozessor-Bussystemen werden vier Datenkanäle für die Clock-Steuerung benutzt, so daß zu dem vorhandenen Dauerclock-Signal vier individuell programmierbare Clock-Signalausgänge zur Verfügung stehen.

Die Bedienung des Logic Generators IGA wird durch einen komfortablen Editor zur Eingabe und Änderung der gewünschten Bitmuster unterstützt. Wesentliches Merkmal der Dateneingabe (Formate: binär, oktal, dezimal oder hexadezimal) ist die modulorientierte Datenverwaltung, wobei ein Modul ein aus mehreren Datenzeilen bestehender Datenblock ist, der durch einen frei wählbaren Namen angesprochen werden kann. Es besteht die Möglichkeit, mehrere Module zu einer Sequenz zu verketten, die ebenso mit frei wählbarem Namen aufrufbar ist. Mit Hilfe der Option Bandspeicher lassen sich die Daten speichern und laden; die Option IEC-Bus schafft die Voraussetzung für den Einsatz des IGA in automatischen Meßsystemen.