

Vorhersage der Rückflußdämpfung während der Extrusion

Bernhard Mund

Ein wesentliches Kriterium für das Hochfrequenzverhalten eines Kabels und damit für seine Qualität ist die Rückflußdämpfung. Normalerweise kann die Rückflußdämpfung erst am fertigen Kabel, d.h. nach Durchlaufen einiger Fertigungsschritte gemessen werden. Mit dem beschriebenen Meßverfahren ist die Vorhersage der Rückflußdämpfung während der Extrusion der Isolation des Innenleiters mit Hilfe der Fast-Fourier-Transformation (FFT) möglich. Damit können Fehlproduktionen der Kabelfertigung durch rechtzeitiges Eingreifen verhindert werden.

Einleitung

Das Hochfrequenzverhalten eines Koaxialkabels wird bestimmt durch seine geometrische Homogenität. Ein Kriterium für diese Homogenität und damit für seine Qualität ist die Rückflußdämpfung. Kabel mit geringer Rückflußdämpfung beeinträchtigen die Signalübertragung sowohl bei analoger als auch bei digitaler Übertragung.

Normalerweise kann die Rückflußdämpfung erst am fertigen Kabel gemessen werden, obwohl Inhomogenitäten dem Kabel bereits in einem frühen Fertigungsstadium aufgebracht werden können. Falls die am fertigen Kabel gemessene Rückflußdämpfung die festgelegten Grenzwerte übersteigt, ist das fertige Kabel nicht zu gebrauchen.

Im folgenden Artikel ist ein neues Meßverfahren beschrieben, welches

die Vorhersage der Rückflußdämpfung während der Extrusion der Isolation des Innenleiters über die Fast-Fourier-Transformation (FFT), ermöglicht. Mit diesem neuen Meßverfahren können Fehler in der Kabelproduktion in einem frühen Fertigungsstadium erkannt und Korrekturmaßnahmen ergriffen werden.

So können die Fertigungskosten gesenkt und die Kabelqualität erhöht werden; durch Vermeiden von Fehlproduktionen wird gleichzeitig ein Beitrag zum Umweltschutz geleistet. Das Meßverfahren wurde von *bedea* in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Gießen-Friedberg sowie der Technischen Hochschule TH-Darmstadt während verschiedener Diplomarbeiten entwickelt bzw. an eine neue Computergeneration angepaßt.

Produktion von Koaxialkabeln

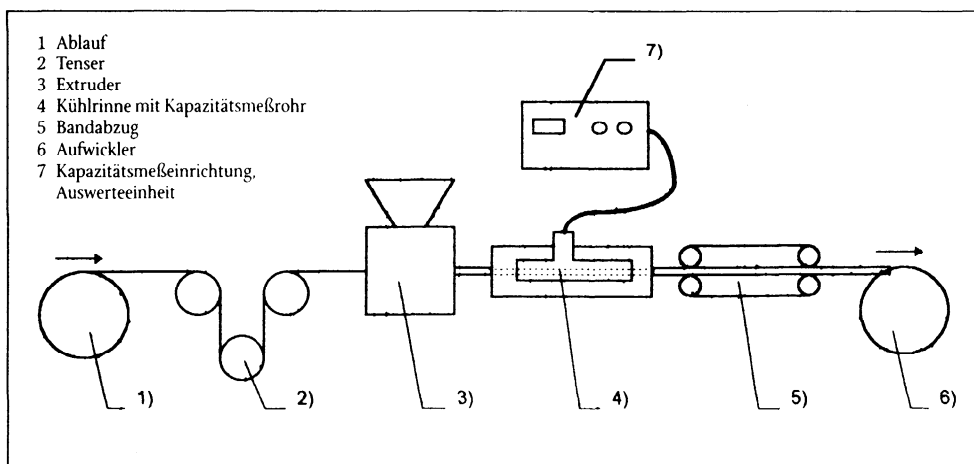
Die Produktion von Koaxialkabeln kann in vier Hauptgruppen bzw. Arbeitsgänge unterteilt werden:

- Herstellen der Drähte bzw. Bänder für Innen- und Außenleiter
- Extrusion der Isolation
- Aufbringen des Außenleiters
- Extrusion des Mantels

Während des Herstellungsprozesses durchläuft das Kabel die Extrusionsanlagen und die Flechtmaschinen, wobei es eine Reihe rotierender Teile passiert, welche dem Kabel periodische Störungen aufprägen können. Erfahrungsgemäß erfährt das Kabel solche periodisch mechanischen Störungen, die Reflexionen im übertragenen Signal zur Folge haben, während der Isolation des Innenleiters oder sie sind bereits im Innenleiterdraht vorhanden.

Periodische Fehler können bereits im Innenleiterdraht vorhanden sein oder durch Schwankungen der Dielektrizitätskonstante oder Schwankungen des Isolationsdurchmessers während der Kabelfertigung hervorgerufen werden. Periodische Fehler im Draht, welche Einfluß auf das Hochfrequenzverhalten eines Kabels haben können, werden im allgemeinen erst am fertigen Kabel während der Endkontrolle bekannt. Zu solchen Fehlern können u.a. Gefügeveränderungen im Kupfer gehören, welche dem Draht beim Glühen aufgeprägt werden. Ein Verfahren zur Ermittlung solcher Fehler direkt am Draht ist nicht bekannt.

▼ Bild 1.
Schematische Darstellung einer Extrusionsanlage



Physikalische Grundlagen

Der Wellenwiderstand Z eines Koaxialkabels bei hohen Frequenzen ergibt sich aus Gleichung (1). Die Kapazität pro Längeneinheit, C' , ist gegeben durch Gleichung (2). Die Beziehung des Wellenwiderstandes Z und der Kapazität C' ist gegeben durch Gleichung (3).

Ein Hochfrequenzsignal, welches durch einen Übertragungskanal (Viropol) mit dem Wellenwiderstand Z_n läuft, erfährt an jeder Stelle i , eines solchen Kanals an der es auf Abweichungen des Wellenwiderstandes Z_n trifft eine Teilreflexion. Die Größe dieser Reflexion wird durch den

$$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad [\Omega] \quad (1)$$

$$C' = 55,6 \cdot \epsilon_r \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad [\text{pF/m}] \quad (2)$$

$$Z = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{C' \cdot c_0} \quad (3)$$

$$\epsilon_i = \frac{Z_i - Z_n}{Z_i + Z_n} \quad (4)$$

$$f_r = \frac{c_0 \cdot v_k}{2 \cdot l_0} \quad (5a)$$

$$= \frac{c_0}{2 \cdot l_0 \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (5b)$$

$$\lambda = 2 \cdot l_0 \quad (6)$$

$$a_r = 20 \cdot \log\left(\frac{u_i}{u_r}\right) \quad \text{in dB} \quad (7a)$$

$$= 20 \cdot \log\left(\frac{1}{R}\right) \quad \text{in dB} \quad (7b)$$

$$s = \frac{(1+R)}{(1-R)} \quad (8)$$

- ϵ_r relative Dielektrizitätskonstante des Isolationsmaterials
- D Durchmesser der Isolation
- d Durchmesser des Innenleiters.
- c_0 Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts in Vakuum
- Z_n Wellenwiderstand des Kabels
- Z_i Wellenwiderstand an der Störstelle
- v_k Verkürzungsfaktor (= 0,67 bei PE-Isolation).
- u_i Spannung der in das Kabel eingespeisten Welle mit dem Wellenwiderstand Z_n als Bezug
- u_r Spannung der reflektierten Welle bei Abschluß des Kabels mit dem Wellenwiderstand Z_n
- Z_n nominelle Wellenwiderstand des Kabels
- R Eingangsreflexionsfaktor

Reflexionsfaktor ϵ_i ausgedrückt – Gleichung (4). Der Reflexionsfaktor ϵ_i eines Kabels beträgt „1“ an einem offenen Ende, „-1“ bei Kurzschluß und Null bei Anpassung, d.h. bei Abschluß mit seinem Wellenwiderstand.

Bei Standard-Anwendungen wie z.B. Kabelfernsehen (CATV-Netze) beeinträchtigen zufällig oder stochastisch verteilte Störstellen die Übertragung nicht, wenn der Reflexionsfaktor ϵ_i einer solchen Störstelle < 0,01 bzw. > 40 dB beträgt. Maximal zulässige Reflexionsfaktoren ϵ_i einer Einzelstörstelle sind in den Bauartspezifikationen der Kabel festgelegt. Der Eingangsreflexionsfaktor R am Kabeleingang ist die Summe aller Einzelreflexionen ϵ_i . Im Falle periodisch verteilter Einzelstörstellen mit dem Abstand l_0 erreicht die Summe der Einzelreflexionen und damit der Eingangsreflexionsfaktor R am Kabeleingang bei der Resonanzfrequenz f_r ein Maximum. Die Resonanzfrequenz f_r ergibt sich aus den Gleichungen (5a) und (5b). Zu beachten ist, daß die Wellenlänge λ bei der Resonanzfrequenz f_r das zweifache des Störstellenabstandes l_0 beträgt, Gleichung (6).

Rückflußdämpfung

Der logarithmierte Wert des Eingangsreflexionsfaktor R am Kabeleingang ergibt die Rückflußdämpfung a_r , Gleichungen (7a) und (7b). Die Beziehung der Rückflußdämpfung zum Stehwellenverhältnis s ist durch Gleichung 8 gegeben. Die Rückflußdämpfung ist ein Maß für die Abweichung des Wellenwiderstandes eines Kabels vom Nennwert über der Frequenz und das wesentliche Kriterium für die Qualität eines Hochfrequenzkabels bezüglich seines HF-Verhaltens. Das Meßverfahren zur Messung der Rückflußdämpfung an fertigen Kabeln ist in IEC 1196-1 sowie in DIN EN 50 117-1 festgelegt.

Mathematisches Modell eines Kabels mit Störstellen

Zur mathematischen Beschreibung eines Koaxialkabels mit periodischen Störstellen wird das Kabelersatzbild in einzelne Abschnitte jeweils mit

STABOTEC

Lohnrichten von Drähten

je nach Festigkeit
und Stärke:
von 0,80–10,00 mm Ø
von 20–4000 mm Länge
einschließlich
Endenbearbeitung,
wie Fasen und Spitzen.

Jetzt auch Vierkant- und Profildrähte

von 2,00 bis 6,00 mm
bzw. ca. 35 mm²
Querschnitt.

Auf Wunsch übernehmen wir Ihre Materialbeschaffung.

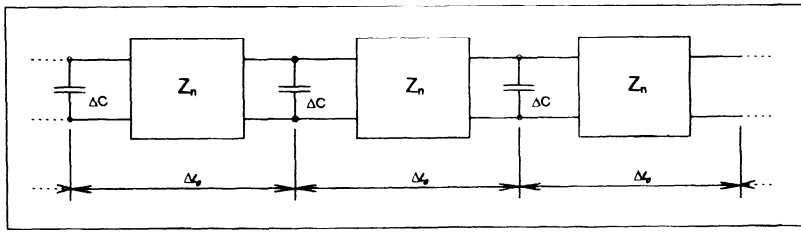
Bitte fordern Sie unsere Preisliste an.

STABOTEC
Metallverarbeitungs-GmbH

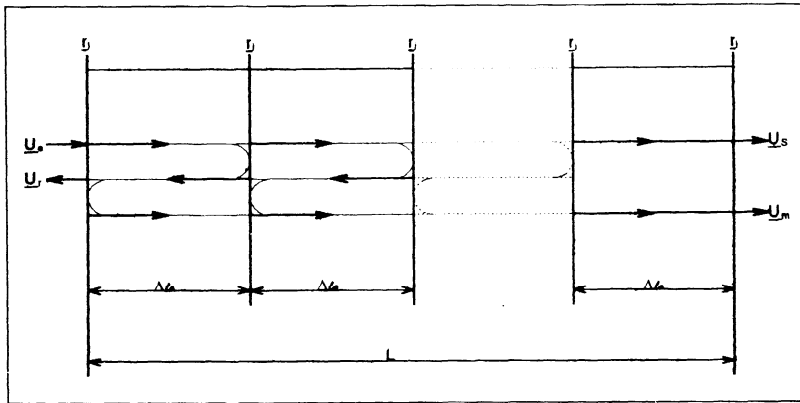
Liegnitzer Straße 6
58642 Iserlohn-Letmathe
Telefon (02374) 23 45
Telefax (02374) 134 00

ab 30. 6. 97 neue Telefon + Fax-Nr.:
Telefon (02374) 9376-90
Telefax (02374) 9376-50

STABOTEC



▲ Bild 2.
Ersatzbild eines Kabels mit periodischen Störstellen



▲ Bild 3.
Schematische Darstellung
von Einzelreflexionen

dem Wellenwiderstand Z_n und dem komplexen Leitwert \underline{Y} unterteilt. Zum besseren Verständnis werden die Störstellen durch kleine Kapazitäten C dargestellt, welche den Kabelstücken mit dem Wellenwiderstand Z_n im Abstand l_0 parallelgeschaltet sind. Dabei wird angenommen, daß die räumliche Ausdehnung der Störstellen klein ist.

Der resultierende Wellenwiderstand Z_i der Parallelschaltung des Wellenwiderstandes Z_n und der Kapazität C nach Bild 2 ist durch Gleichung (9) gegeben. Mit Gleichung (9) eingesetzt in Gleichung (4) ergibt sich der Einzelreflexionsfaktor \underline{r}_i zu Gleichung (10a). Der Zähler in Gleichung (10a) ist wegen der geringen Kapazitätsabweichung C klein gegenüber dem Wert 4 in Gleichung (10a) und kann daher vernachlässigt werden. Mit dieser Vereinfachung ergibt sich der Einzelreflexionsfaktor \underline{r}_i zu Gleichung (10b). Die Transformation einer Einzelreflexion an den Kabeingang ergibt sich unter Berücksichtigung der Kabeldämpfung zu Gleichung (11), wobei die Ausbreitungskonstante durch Gleichung (12) gegeben ist:

$$\underline{Z}_i = \frac{1}{\frac{1}{Z_n} + j\omega \cdot \Delta C} \quad (9)$$

$$\underline{r}_i = \frac{\omega \cdot \Delta C \cdot Z_n}{\sqrt{4 + (\omega \cdot \Delta C \cdot Z_n)^2}} \quad (10a)$$

$$\underline{r}_i = \pi \cdot f \cdot \Delta C \cdot Z_n \quad (10b)$$

$$\underline{r}_i(l) = \underline{r}_i \cdot e^{-2\gamma \cdot l} \quad (11)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (12)$$

- ΔC Abweichung von der nominellen Kapazität C des Kabels
- ω Kreisfrequenz $= 2\pi f$
- l Abstand der Einzelreflexion vom Kabeingang
- α Dämpfungskonstante
- β Phasenskonstante

Zur Berechnung der Rückflußdämpfung ist es erforderlich, zunächst den komplexen Eingangreflexionsfaktor \underline{R} zu berechnen. Der Eingangreflexionsfaktor \underline{R} ergibt sich als die Summe der Einzelreflexionen r_i unter Berücksichtigung der zweifachen Kabeldämpfung auf der Länge l_0 vom Kabeingang zur Störstelle und zurück, bzw. der Dämpfung 2 mal n mal l_0 für die n -te Störstelle.

Der Gesamt-Eingangreflexionsfaktor \underline{R} für den Störstellenabstand l_0 ergibt sich durch Gleichung (13). Die betrachtete Kabellänge L ergibt sich aus der Anzahl der Störstellen n und dem Abstand l_0 mit Gleichung (14). Die Phasenkonstante β ist gegeben durch Gleichung (15). Bei Resonanz wird β zu einem ganzzahligen Vielfachen von 2π , d.h. $|\beta|$ ist 1. Mit dieser Vereinfachung und mit Gleichung (14) ergibt sich der Eingangreflexionsfaktor \underline{R} aus Gleichung (16),

$$\underline{R} = r_i \cdot \frac{1 - e^{-2\gamma \cdot l_0 \cdot (n+1)}}{1 - e^{-2\gamma \cdot l_0}} \quad (13)$$

$$L = n \cdot l_0 \quad (14)$$

$$\beta = \frac{2 \cdot \pi}{l_0} \quad (15)$$

$$R = \underline{r}_i \cdot \frac{1 - e^{-2\alpha \cdot (L+l_0)}}{1 - e^{-2\alpha \cdot l_0}} \quad (16)$$

$$a_r = -20 \cdot \log \left| \pi \cdot f \cdot \Delta C' \cdot Z_n \cdot \frac{1 - e^{-2\alpha \cdot (L+l_0)}}{1 - e^{-2\alpha \cdot l_0}} \right| \quad (17a)$$

$$a_r \approx -20 \cdot \log \left| \pi \cdot f \cdot \Delta C' \cdot Z_n \cdot \frac{1}{1 - e^{-2\alpha \cdot l_0}} \right| \quad (17b)$$

$$f_{\text{FFTmax}} = \frac{v_L}{l_{0\text{min}}} \quad (18)$$

n ist die Anzahl der Störstellen

wobei R jetzt keine komplexe Größe mehr darstellt. Mit Gleichung (16) eingefügt in Gleichung (6b) und mit Gleichung (10b) ergibt sich die Rückflußdämpfung a_r zu Gleichung (17a) unter der Voraussetzung $L \gg l_0$. Durch die Messung der Kapazitätschwankungen C welche über die FFT auf die diskreten Abstände l_0 bezogen werden, ist es möglich, mit Gleichung (17b) die Rückflußdämpfung a_r zu berechnen.

Fast Fourier Transformation FFT

Die Fourier-Transformation ist ein mathematisches Verfahren um ein gegebenes Signal auf seine sinusförmigen bzw. auf seine periodischen Anteile hin zu untersuchen. Die Fast-Fourier-Transformation (FFT) ist eine spezielle Art dieses Verfahrens bei der Rechenaufwand eingespart wird, und die für Anwendungen auf Personal-Computern geeignet ist. Die Anzahl der zu berechnenden Spektrallinien muß hierbei einem Quadrat der Zahl Zwei entsprechen. In der beschriebenen Anwendung werden 1024 bzw. 2048 Spektrallinien berechnet.

Meßsystem

Das Meßsystem besteht aus der Kapazitäts-Meßeinrichtung, dem Anti-Aliasing Filter, dem Analog/Digital-

Wandler (A/D-Wandler), der Multitasking-Karte und dem Personal-Computer (PC). Während der Extrusion der Isolation des Innenleiters durchläuft der isolierte Leiter das Kapazitätsmeßrohr welches in der Kühlrinne montiert ist. Dabei wird die Abweichung der Kapazität vom Nominalwert erfaßt und als analoges Signal ausgegeben.

Die Messung der Kapazität einer isolierten Ader ist ein bekanntes Verfahren in der Kabelindustrie. Für die beschriebene Anwendung können die Meßeinrichtungen verschiedener Hersteller eingesetzt werden. Um bei der Analyse den auszuwertenden Frequenzbereich nach oben zu verschieben, sollte eine möglichst kurze Elektrode eingesetzt werden – Gleichung (5). Mit einer aktiven Elektrode von 0,05 m liegt die obere Frequenzgrenze bei ca. 2,4 GHz.

Um Fehlinterpretationen des Analogsignals zu vermeiden, muß das analoge Signal der Kapazitäts-Meßeinrichtung über ein Antialiasing-Filter mit hoher Steilheit begrenzt werden. Das analoge Kapazitätssignal wird dann dem A/D-Wandler zugeführt, der das Signal digitalisiert.

Dieses digitale Signal kann dann vom PC über die Fast-Fourier-Transformation auf seine periodischen Anteile hin untersucht werden. Der A/D-Wandler befindet sich auf der Multitasking Karte, welche einen eigenen Mikroprozessor besitzt und somit mehrere Rechenoperationen des aus Karte und PC gebildeten Systems zu gleicher Zeit ermöglicht.

Die Aufnahmerate (sampling rate) des A/D-Wandlers hängt vom kürzesten, zu untersuchenden Störstellenabstand l_{0min} , ab, welcher durch die Länge des aktiven Teils des Kapazitätsmeßrohres gegeben ist. Die höchste Frequenz f_{FFTmax} der zu untersuchenden Spektrallinien ergibt sich mit Gleichung (18). Um das Shannon-Theorem zu erfüllen, d.h. um das aufgenommene Signal eindeutig rekonstruieren zu können, muß die Aufnahmerate mindestens 2 mal so hoch wie die höchste, aufzunehmende Frequenz sein.

Die Multitaskingkarte zeichnet ein zweidimensionales Feld mit 1024 (2048) Werten auf, welche blockweise zum PC gegeben werden. Im PC wird die FFT durchgeführt und

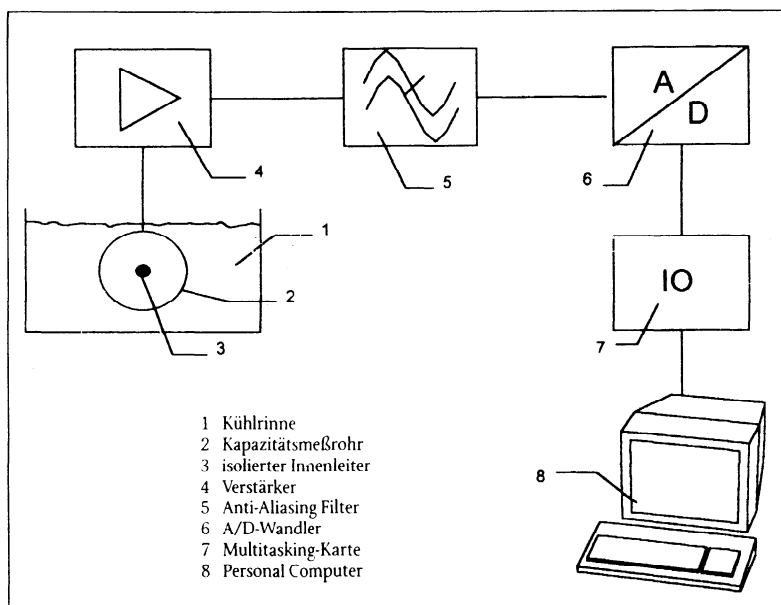
die Rückflußdämpfung nach Gleichung (17) berechnet. Dabei sind die Blöcke so verschachtelt, daß sich keine Lücken in der Aufzeichnung ergeben. Auf dem Bildschirm des PC können die Kapazitätswerte und die prognostizierte Rückflußdämpfung dargestellt werden; diese Werte können je nach Bedarf gespeichert werden. Das Meßsystem kann vier Extrusionsanlagen gleichzeitig überwachen. Bei Überschreiten vorgegebener Grenzwerte kann ein Alarm ausgelöst werden.

Obwohl das Meßsystem für die Erfassung von periodischen Störungen ausgelegt ist, können auch stochastische Störungen erfaßt und angezeigt

werden. Abhängig vom verwendeten „FFT-Fenster“ wird beim Auftreten einer zufälligen, nichtperiodischen Störung das Grundrauschen der FFT-Analyse entsprechend angehoben.

Genauigkeit des Systems

Eine gute Möglichkeit, das Meßsystem auf seine Genauigkeit zu überprüfen ist während der Produktion sogenannter Bambuskabel gegeben. Diese Kabel bestehen aus einer Isolation aus Polyethylen-Scheiben in periodischem Abstand mit darüberliegendem Polyethylen-Schlauch. Durch die periodischen Scheibenabstände ergeben sich hier gut zu erfassen.



◀ Bild 4. Block Diagramm des Meßsystems

▼ Bild 5. Aufgebautes Meßsystem



Bild 6. ▶
Vorhersage der Rückflußdämpfung eines scheibenisolierten Kabels bedea TELASS L5

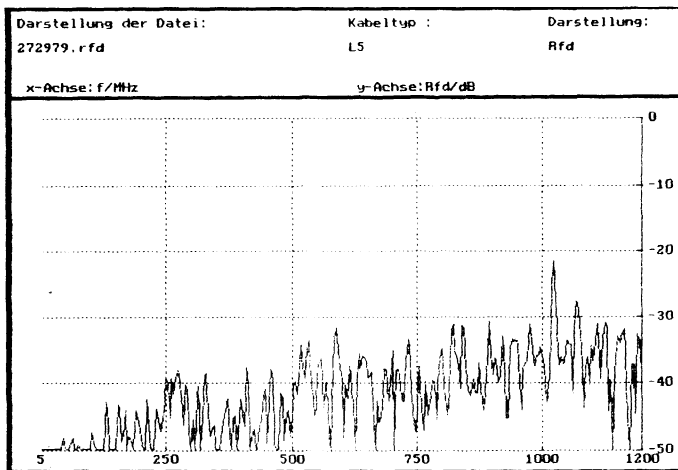
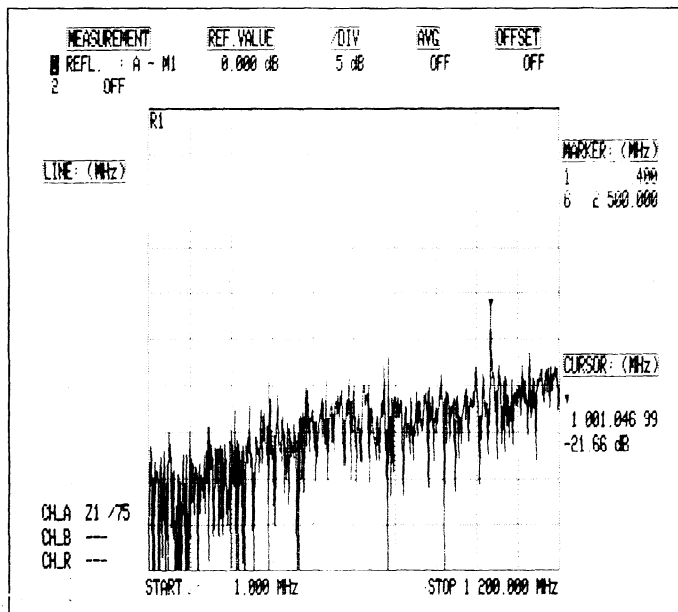


Bild 7. ▶
Rückflußdämpfung des fertigen Kabels bedea TELASS L5



sende Reflexionsspitzen bei bestimmten Frequenzen. Die Scheibenabstände dieser Bambuskabel bzw. die Blockabstände eines Fertigungshubs, sind so gewählt, daß die Reflexionsspitzen außerhalb des genutzten Frequenzbereiches liegen.

Bild 6 zeigt die Rückflußdämpfung eines 75 CATV-Bambuskabels mit einer Reflexionsspitze bei ca. 1000 MHz welche mit einem Störstellenabstand von ca. 132 mm, entsprechend dem acht-fachen Scheibenabstand von 16,5 mm, korreliert. Da

die Anwendung dieses Kabels nur bis max. 960 MHz spezifiziert ist, können somit acht Scheiben auf einen Hub gefertigt werden. Die resultierende relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r aus Isolationsmaterial und Luft beträgt bei diesem Kabel 1,136 entsprechend einer Laufzeit von 88 % Lichtgeschwindigkeit. In Bild 7 ist die Rückflußdämpfung des fertigen Kabels dargestellt.

Beobachtungen über einen Zeitraum von mehreren Jahren ergaben Abweichungen zwischen Vorhersage und gemessener Rückflußdämpfung im Bereich von 3 dB, bezogen auf die gemessenen Reflexionsspitzen. Abhängig von der Kabeldämpfung, welche mit der Frequenz ansteigt und abhängig von der Anzahl der periodischen Störstellen kann die Messung der Rückflußdämpfung an fertigen Kabeln nur begrenzte Längen erfassen. Die Messung der Rückflußdämpfung an Lieferlängen von 1000 m und größer erfaßt daher nur die Rückflußdämpfung an den Kabelenden. Das beschriebene Meßverfahren ermöglicht eine Aussage über die Qualität des Kabels über seine gesamte Länge.

Obwohl das vorgestellte Meßverfahren für koaxiale Kabel entwickelt und beschrieben wurde, läßt es sich sinngemäß während der Produktion der Einzeladern symmetrischer, paarverteilter Kabel, wie sie in der Informationstechnik verstärkt eingesetzt werden, anwenden um die hier geforderte, hohe Qualität zu erreichen.

Literatur

- [1] IEC 1196-1, Radio-frequency cables Part 1: Generic specification General Definitions, requirements and test methods
- [2] Küpfmüller, K. Einführung in die theoretische Elektrotechnik, 12. Auflage, Springer Verlag, Berlin, New York, Tokio
- [3] Erdel, K. Auswirkung periodischer Kabelstörungen auf die Übertragung von Breitbandsignalen, Siemens Forschungs und Entwicklungsbericht, Band 5 (1976), Nr 4. Springer Verlag, Berlin, New York, Tokio
- [4] Meinke/Gundlach, Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin, New York, Tokio
- [5] Hesselmann, N. Digitale Signalverarbeitung, 2. Auflage, Vogel Verlag, Würzburg
- [6] Visser, L. Computer prediction of coaxial cable structural return loss during core extrusion, Proc. Int. Wire & Cable Symposium 1984
- [7] Sladek, K. Berechnung der Rückflußdämpfung an Koaxialkabeln während der Extrusion des Innenleiters. Diplomarbeit, TH-Darmstadt, bedea Berkenhoff & Drebes GmbH, Aßlar 1989
- [8] Griebel, A. On-Line-Messung der Rückflußdämpfung. Diplomarbeit, FH-Gießen-Friedberg, bedea Berkenhoff & Drebes GmbH, 1990
- [9] Weidemann, G. Messung der Rückflußdämpfung an Koaxialkabeln während der Isolation des Innenleiters. Diplomarbeit, TH-Darmstadt, bedea Berkenhoff & Drebes GmbH, Aßlar 1991.
- [10] Mandrich, G. Verbesserung der On-Line-Messung der Rückflußdämpfung während der Fertigung koaxialer Kabel. Diplomarbeit, FH Gießen-Friedberg, bedea Berkenhoff & Drebes GmbH, Aßlar 1995

Autor



Dipl.-Ing. Bernhard Mund ist nach seiner Lehre als Rundfunk- und Fernsehtechniker und dem Studium der Nachrichten- und Mikroprozessortechnik an der FH Gießen-Friedberg seit über 12 Jahren Entwicklungsingenieur bei der bedea Berkenhoff und Drebes GmbH in Aßlar. Weiterhin ist er Obmann der Normengremien UK 412.3, Hochfrequenzkabel und Leitungen der DKE sowie Obmann des NEA 412.3, Hochfrequenzkabel und Leitungen, Hohlleiter der NE. International ist er u.a. Mitglied der entsprechenden Spiegelgremien bei IEC und CENELEC.