Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe

Band: 55 (1977)

Heft: 1

Artikel: Übertragungstechnische Aspekte von Systemen hoher Kapazität auf 2,6/9,5-mm-Koaxialkabeln

Autor: Pfyfferer, Hans Karl

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-874108

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

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

Download PDF: 12.07.2025

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

Übertragungstechnische Aspekte von Systemen hoher Kapazität auf 2,6/9,5-mm-Koaxialkabeln

Hans Karl PFYFFER, Bern

621.315.212.09:621.395.44.09

Zusammenfassung. *Nach einer kurzen Zusammenstellung der wesentlichen elektrischen Charakteristiken des Kabels werden übertragungstechnische Aspekte von Systemen hoher Übertragungskapazität diskutiert. Bei Analogsystemen wird das Schwergewicht auf die Geräuschplanung gelegt, bei Digitalsystemen auf die Fehlerratenplanung. In beiden Fällen wird ein sogenannter Fähigkeitsfaktor definiert, der die vom System gegebenen Anforderungen an die Verstärker beziehungsweise Regeneratoren zusammenfasst und den Einfluss der Variation verschiedener Parameter erkennen lässt. Daneben werden einige weitere Aspekte, wie Nebensprechen, Entzerrung und Jitter, kurz erwähnt, ohne jedoch im Detail behandelt zu werden.*

Aspects techniques de systèmes de capacité élevé pour la transmission sur câbles coaxiaux 2,6/9,5 mm

Résumé. *Après une récapitulation succincte des caractéristiques électriques essentielles du câble, l'auteur discute les aspects techniques de systèmes de capacité de transmission élevée. Pour les systèmes analogiques, il met l'accent principal sur la planification du bruit, pour les systèmes numériques sur la planification du taux d'erreurs. Dans les deux cas, il définit un facteur dit d'aptitude qui réunit les exigences données par le système pour les amplificateurs ou les régénérateurs et permet de déceler l'influence de la variation de différents paramètres. A part cela, il mentionne brièvement quelques autres aspects, tels que la diaphonie, l'égalisation et la gigue, sans toutefois les traiter en détail.*

Aspetti tecnici della trasmissione con sistemi di grandi capacità su cavi coassiali 2,6/9,5 mm

Riassunto. *Dopo una breve panoramica sulle più importanti caratteristiche elettriche del cavo, vengono discussi gli aspetti tecnici della trasmissione di complessi di grande capacità. Nel sistema analogico l'attenzione è riposta prevalentemente nella progettazione del rumore, nella tecnica digitale, invece, in quella del tasso d'errori. In entrambi i casi si definisce un cosiddetto fattore d'attitudine che riassume le esigenze che il sistema pone nei confronti degli amplificatori, rispettivamente dei rigeneratori e permette di identificare l'influsso della variazione di diversi parametri. Oltre a ciò, si fa brevemente accenno ad alcuni aspetti supplementari come la diafonia, l'equalizzazione e lo jitter, senza tuttavia entrare nei dettagli.*

1 Einleitung

Das neue 2,6/9,5-mm-Koaxialkabel ist für den Einsatz von Leitungssystemen hoher Kapazität vorgesehen. Unabhängig von der Art der Signale, die für die Übertragung der Information verwendet werden, können verschiedene allgemeingültige Eigenschaften solcher Systeme festgehalten werden:

- Einsatz unterirdischer Zwischenverstärker beziehungsweise Regeneratoren
- Fernspeisung dieser Zwischenverstärker über die Koaxialtuben
- Notwendigkeit der Eingrenzung fehlerhafter Zwischenverstärker
- Immunität der Zwischenverstärker gegen Zerstörung durch Starkstrom- und Blitzeinwirkungen
- Immunität der Übertragungsqualität gegen externe Beeinflussung (zum Beispiel Bahnströme, elektromagnetische Felder usw.)

In den nachfolgenden Abschnitten sollen einige übertragungstechnische Probleme diskutiert werden, wie sie im Zusammenhang mit der Planung und Verwirklichung von Systemen hoher Kapazität auftreten.

Für den Einsatz kommen zunächst Analogsysteme (Trägerfrequenzsysteme) mit Kapazitäten von 2700 und 10 800 Telefonkanälen und einem Übertragungsfrequenzband von 308...12 435 beziehungsweise von 4332...61 160 kHz in Betracht. Solche Systeme sind heute entwickelt und in Fabrikation. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, auch Systeme höherer Kapazität einzusetzen. Im CCITT[1] existiert eine entsprechende Studienfrage. Ob solche Systeme jedoch zur Entwicklung gelangen und, wenn ja, ob sie auf dem hier im Vordergrund stehenden Kabel eingesetzt werden, ist zurzeit noch ungewiss. Trotzdem sollen einige Aspekte solcher Systeme berücksichtigt werden. Die 12- und 60-MHz-Systeme sind für nominelle Zwischenverstärkerabstände von 4,5 beziehungsweise 1,5 km entwickelt worden. Ein allfälliges weiteres System müsste die Existenz eines solchen Rasters berücksichtigen.

Zu einem späteren Zeitpunkt ist die Einrichtung digitaler Systeme vorgesehen. Die Entwicklung auf dem Gebiete der digitalen Leitungssysteme hoher Kapazität ist heute noch nicht abgeschlossen, jedoch können gewisse Tendenzen festgestellt werden. Verschiedentlich ist schon über 140-Mbit/s- und 560-Mbit/s-Systeme berichtet worden, wobei aber auch andere Übertragungsbitraten studiert werden.

In vielen Fällen muss damit gerechnet werden, dass analoge und digitale Leitungssysteme nebeneinander bestehen müssen, sei es im gleichen Trassee oder sogar im gleichen Kabel. Aus dieser Forderung ergeben sich zwangsläufig gewisse Randbedingungen, die bei der Entwicklung berücksichtigt werden müssen, so zum Beispiel gleiche Zwischenverstärkerstellen. Ausserdem wäre eine mechanische Kompatibilität von analogen und digitalen Zwischenverstärkereinheiten zweifellos von bedeutendem Vorteil.

Die Charakteristiken des neuen Kabels wurden aus den obenerwähnten Gründen soweit als möglich unter Berücksichtigung der Anforderungen der Trägerfrequenzsysteme als auch der Digitalsysteme festgelegt. Die Kriterien und die Messmethoden sind im Falle der Analogübertragung gut bekannt und definiert. Für die Festlegung der für die Übertragung digitaler Signale notwendigen Charakteristiken sind zurzeit verschiedenenorts Studien im Gange. Die an das Kabel gestellten Anforderungen könnten deshalb bei Vorliegen entsprechender Erfahrungswerte noch ergänzt werden müssen. Für gewisse neue zur Diskussion stehende Messmethoden sind bis heute noch keine kommerziell gefertigten Messgeräte erhältlich.

[1] Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique

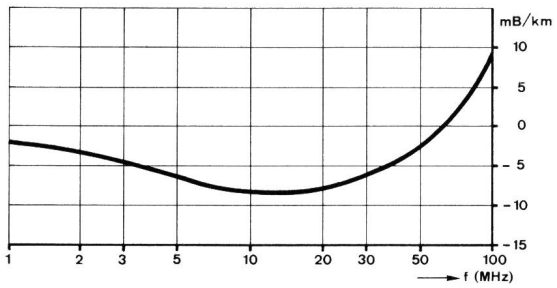

Fig. 1
Abweichung der Betriebsdämpfung vom $\sqrt{f}$-Verlauf

2 Kabeldaten

Die wichtigsten, die Koaxialtube einer Kabelfabrikationslänge von 230 m charakterisierenden Parameter sind die folgenden:

- Dämpfung bei 60 MHz und 10 °C: (18 ± 0,3) dB/km
- Frequenzabhängigkeit der Dämpfung: angenähert durch $\alpha \cdot \sqrt{f}$ gegeben. Eine typische Kurve, die die Abweichung gegenüber dem $\sqrt{f}$-Gesetz darstellt, ist in *Figur 1* wiedergegeben.
- Ausbreitungsgeschwindigkeit: ~ 290 m/µs, gemessen mit 10-ns- und 40-ns-Impulsen
- Impedanz:

$$Z = 74{,}4 \left[1 + \frac{0{,}0123}{\sqrt{f}} \cdot (1 - j) \right] \Omega$$

f in MHz

- Impedanzunterschied an den Spleissstellen: $< 0{,}2\ \Omega$
- Impedanzunregelmässigkeit

  a) gemessen mit 10-ns-Impulsen:

  ≥ 48 dB Impulsechodämpfung für 100% der Messwerte

  ≥ 54 dB Impulsechodämpfung für 95% der Messwerte (die Werte sind in der Dämpfung korrigiert)

  b) gemessen als frequenzabhängige Rückflussdämpfung:

  ≥ 35 dB im Bereich 4... 60 MHz

  ≥ 20 dB im Bereich 4...500 MHz

- Nebensprechen: Nahnebensprechdämpfung > 140 dB für f ≥ 300 kHz
  Grundwert der Fernnebensprechdämpfung:
  > 130 dB für f ≥ 300 kHz bei einer Verstärkerfeldlänge von 1,5 km

3 Trägerfrequenzsysteme

31 Geräuschplanung

Die Geräuschplanung spielt eine wesentliche und ausschlaggebende Rolle bei der Verwirklichung eines breitbandigen Trägerfrequenzsystems. Gemäss den internationalen Empfehlungen des CCITT soll das Totalgeräusch im Telefonkanal, herrührend vom Leitungssystem, 3 pWOp/km nicht überschreiten. Es bestehen Tendenzen, diesen Wert in Zukunft etwas herabzusetzen. Viele moderne Systeme erreichen Werte von 1,5...2 pWOp/km. Für die Durchführung verschiedener Systemstudien sind vom CCITT Bezugsstromkreise definiert worden, die im Falle moderner Koaxialsysteme aus 9 homogenen Abschnitten von je 280 km Länge bestehen (siehe zum Beispiel [2], CCITT-Empfehlung G.332 für das 12-MHz- und G.333 für das 60-MHz-System). Ein solcher homogener Abschnitt wird den nachfolgenden Betrachtungen zugrunde gelegt.

Das Totalgeräusch, verursacht durch ein Koaxialsystem, bezogen auf den Relativpegelpunkt 0 dBr eines Telefonstromkreises, setzt sich im wesentlichen aus drei Anteilen zusammen: thermischem Rauschen, Intermodulationsgeräusch 2. Ordnung und Intermodulationsgeräusch 3. Ordnung. Es wird angenommen, dass für jede Geräuschart auf dem homogenen Abschnitt gleiche leistungsmässige Anteile zulässig seien, nämlich 0,5 pWOp/km oder 140 pWOp (entsprechend –68,5 dBmOp).

Für die auf einem homogenen Abschnitt auftretenden drei Geräuscharten gelten folgende Beziehungen:

$$T_2 = t_2 + 2P - 10 \cdot \log N + K_2 + p_r + 10 \cdot \log R \text{ dBmOp} \quad (1a)$$

$$T_3 = t_3 + 3P - 10 \cdot \log N + K_3 + 2p_r + 20 \cdot \log R \text{ dBmOp} \quad (1b)$$

$$T_N = T_{NO} - p_r + 10 \cdot \log R + S \quad (1c)$$

Wie im *Anhang 1* gezeigt wird, kann aus diesen Beziehungen ein sogenannter *Verstärkerfähigkeitsfaktor A* hergeleitet werden (*Repeater capability factor*, siehe [1]).

$$A = 10 \cdot \log N + 20 \cdot \log R + \frac{41{,}15}{R} \cdot a \cdot \sqrt{N} \text{ dB} \quad (2a)$$

Es gilt aber auch

$$A = T_N - T_{NO} + T_2 - T_{20} = T_N - T_{NO} + \frac{T_3 - T_{30}}{2} \text{ dB} \quad (2b)$$

Dabei bedeuten:

T_2	Totales Intermodulationsgeräusch 2. Ordnung in dBmOp nach 280 km
T_3	Totales Intermodulationsgeräusch 3. Ordnung in dBmOp nach 280 km
t_2; t_3	Verzerrungskoeffizienten des Zwischenverstärkers bei Belastung mit OdBm
$C \cdot \sqrt{N}$	Kabeldämpfung bei 4N kHz über 280 km
a	$= \sqrt{fm/4N}$ mit f_m = maximale verwendete Übertragungsfrequenz
P	Konventionelle Belastung = –15 + 10·log N dBmO
K_2; K_3	Korrekturfaktoren in dB, die die Intermodulations-Geräuschverteilung unter Berücksichtigung der Pre-Emphasis sowie der psophometrischen Bewertung angeben
T_N	= 10·log P_N Grundgeräusch in dBmOp auf 280 km
T_{NO}	= 10·log P_{NO} Grundgeräusch am Verstärkereingang je Kanal in dBmp (T_{NO} = –141,6 + F dBmp)
T_{20}	$= t_2 - 30 + K_2$ dB
T_{30}	$= t_3 - 45 + K_3$ dB
p_r	Relativpegel am Verstärkerausgang in dBr
F	Rauschzahl des Verstärkers in dB
R	Totale Zahl der Zwischenverstärker auf 280 km
S	Verstärkerfelddämpfung bei der höchsten Frequenz f_m
N	Kanalzahl

Der Verstärkerfähigkeitsfaktor stellt einerseits die systembedingten Anforderungen wie zu übertragende Kanalzahl, Anzahl der Zwischenverstärker auf 280 km sowie

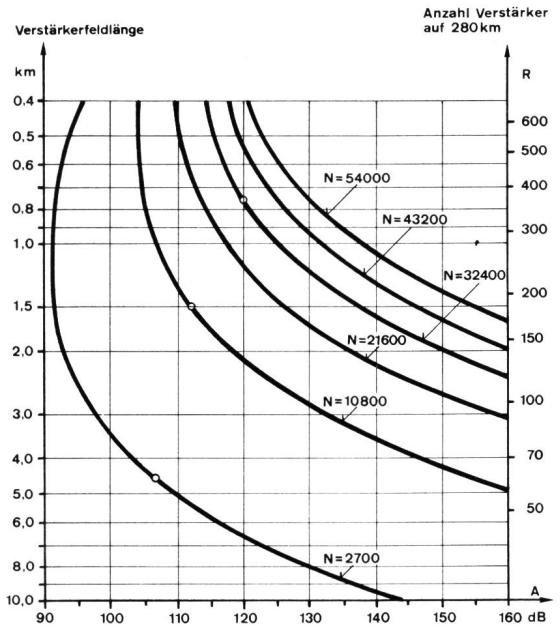

Fig. 2
Verstärkerfähigkeitsfaktor A

die Verstärkerfelddämpfung dar, anderseits werden damit die Anforderungen an den Einzelverstärker, die zur Erfüllung der Globalforderungen nötig sind, ausgedrückt.

In *Figur 2* ist der Ausdruck (2a) grafisch dargestellt, indem die Verstärkerfeldlänge (beziehungsweise die Anzahl Zwischenverstärker) in Abhängigkeit von A, mit der Systemkapazität N als Parameter, aufgetragen wurde.

Für die heute eingesetzten Systeme lassen sich die entsprechenden A-Werte ablesen: Für das 12-MHz-System ist A = 107, und für das 60-MHz-System wird A = 112. Dies bedeutet, dass ein 60-MHz-Verstärker, unter nominellen Bedingungen, in bezug auf Geräusch 5 dB höheren Anforderungen zu genügen hat. (Die technologischen Probleme der Verwirklichung dieser Forderung über ein bedeutend breiteres Frequenzband im Falle des 60-MHz-Verstärkers kommen in diesen Betrachtungen nicht zum Ausdruck.)

Für ein System mit noch grösserer Übertragungskapazität als 10 800 Telefonkanäle müssten die durch die heute gebauten Systeme gegebenen Bedingungen berücksichtigt werden; in erster Linie wäre auf die Verstärkerfeldlängen von 1,5 km beim 60-MHz-System zu achten. So käme für einen Verstärkerabstand von 0,75 km ein 32 400-Kanal-System in Betracht, das eine obere Übertragungsfrequenz von etwa 186 MHz hätte und einen A-Wert von ungefähr 120 erfordern würde. Dies bedeutet, dass praktisch die Nichtlinearitäten 2. Ordnung um 8 dB und jene 3. Ordnung um 16 dB höheren Anforderungen zu genügen hätten, als dies für den 60-MHz-Verstärker erforderlich ist. Hinzu kommt, dass diese Forderungen in einem dreimal breiteren Frequenzband eingehalten werden müssen, was sicher bedeutende technologische Probleme zu lösen erfordert. Anderseits scheint ein Wert von A = 120 dB, zumindest für nicht allzu hohe Frequenzen, heute realisierbar. Bei diesen Überlegungen wird stillschweigend angenommen, dass die Rauschzahl F nicht mehr verbessert werden kann; ebenso dürfte die Pre-Emphasis und somit K_2 und K_3 nicht wesentlich von den heute verwendeten Werten abweichen.

In *Tabelle I* sind die wichtigsten Daten von drei Systemen zusammengefasst.

Tabelle I. Einige Kenngrössen von Trägerfrequenzsystemen

Übertragungsfrequenzband f_m (MHz)	Kanalzahl N	Verstärkerfeldlänge km	A dB	Status	a	S dB	R	S·R dB	p_r dBr
12	2700	4,5	107	realisiert	1,06	36,5	62	2266	–13,6
60	10800	1,5	112	realisiert	1,18	27,1	186	5046	–18,3
186	32400	0,75	120	?	1,20	23,8	373	8888	–18,5

Getroffene Annahmen: F = 5 dB; T_N = —68,5 dBmOp

32 Entzerrung und Temperaturkompensation der Kabeldämpfung

In jedem Zwischenverstärker wird die frequenzabhängige Dämpfung der vorangehenden Koaxialtube ausgeglichen. Die dafür verwendeten Entzerrer müssen möglichst genau an die Kabelcharakteristik angepasst sein. Diese Anpassung basiert jedoch immer auf einem Kompromiss. Sowohl die Eigenschaften des Kabels als auch jene der Entzerrer unterliegen kleinen Exemplarstreuungen. Ein systematischer Entzerrungsfehler je Verstärkerfeld von beispielsweise 0,05 dB wirkt sich beim 60-MHz-System auf einem homogenen Abschnitt des Bezugstromkreises in einem Fehler von beinahe 10 dB aus, der mit Zusatzentzerrern in der Endstelle wieder korrigiert werden muss. In der Praxis muss ein solcher Zusatzentzerrer für jedes System entsprechend seiner Länge eingestellt beziehungsweise dimensioniert werden. Für den Entwickler ist es deshalb wichtig, den Verlauf der Kabeldämpfung in Funktion der Frequenz möglichst genau zu kennen.

Der Einfluss der Temperatur auf die Kabeldämpfung ist angenähert gegeben durch den Koeffizienten ~0,2 %/°C. Im Falle des 60-MHz-Systems bedeutet dies, dass bei einer jährlichen Temperaturschwankung des Kabels von 20°C bei der obersten Übertragungsfrequenz auf 280 km eine Dämpfungsvariation von etwa 200 dB auftritt. Es gibt verschiedene Möglichkeiten der Kompensation dieser Dämpfungsänderungen. Je nachdem werden pilot- und temperaturgeregelte Zwischenverstärker oder solche mit ferngesteuertem Entzerrungsverhalten eingesetzt. Die Auswirkungen der temperaturabhängigen Dämpfungsänderungen müssen bei der detaillierten Geräuschdimensionierung der Zwischenverstärker berücksichtigt werden.

33 Nebensprechen

Für die wirksame Nebensprechdämpfung eines Systems ist sowohl das Verhalten des Kabels als auch der darauf eingesetzten Ausrüstung von Bedeutung. Auf einem homogenen Abschnitt des Bezugsstromkreises seien eine Fern- und eine Nahnebensprechdämpfung von je 80 dB vorausgesetzt.

Im Falle der Fernnebensprechdämpfung muss mit linearer Addition aller einzelnen Komponenten gerechnet werden (entsprechend 20·log R). Für 60-MHz-Systeme ergibt dies, unter Berücksichtigung von gleichen Anteilen von Kabeln und Zwischenverstärkern, für den Grundwert der Nebensprechdämpfung einen erforderlichen Wert von 130 dB je Verstärkerfeld.

Bei der Berechnung der Nahnebensprechdämpfung muss der Pegelunterschied, der numerisch gleich der Verstärkerfelddämpfung ist, in die Rechnung mit einbezogen

werden. Die Addition der Einzelkomponenten muss nach statistischen Gesichtspunkten durchgeführt werden. Unter Annahme einer Rayleigh-Verteilung der einzelnen Komponenten ergibt sich im Falle des 60-MHz-Systems bei einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 5% für die erforderliche Nahnebensprechdämpfung des Kabels eines Verstärkerfeldes ein Wert von 140,5 dB. Die angegebenen Werte entsprechen den massgebenden Empfehlungen des CCITT für das Kabel (G.331).

34 Speisung und damit zusammenhängende Aspekte

Die unterirdischen Zwischenverstärker werden üblicherweise über die Innenleiter der Koaxialtube mit einem konstanten Strom gespeist. Heute werden bei gewissen Systemen kombinierte Innenleiter-/Aussenleiterspeisungen verwirklicht. Die verwendeten Fernspeisegleichströme liegen vielfach in der Grössenordnung von 50...150 mA. Die Reichweite einer Fernspeisestelle wird massgebend durch die zulässige Spannungsbeanspruchung der Koaxialtube und der eingesetzten Ausrüstungen beeinflusst. Dabei müssen gewisse Überspannungserscheinungen, wie sie im Falle von Kurzschlüssen auf Hochspannungsleitungen usw. auftreten können, berücksichtigt werden. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Verwirklichung von Speiseeinrichtungen ist der Personenschutz. Bei den heute eingesetzten Systemen entfallen meistens mehrere Fernspeiseabschnitte auf einen homogenen Abschnitt des Bezugsstromkreises.

Wechselströme, die durch das Erdreich fliessen (Bahnströme usw.), induzieren auf den Kabeln Längsspannungen, die ihrerseits Ströme verursachen, die dem Fernspeisegleichstrom überlagert sind und damit die Übertragungseigenschaften beeinflussen können. Die Isolierung der Koaxialtuben-Aussenleiter gegenüber dem Kabelmantel wirkt sich in bezug auf die Bahnstrombeeinflussung günstig aus im Vergleich zu jenen Fällen, wo die Aussenleiter mit der Erde verbunden sind. Als Dimensionierungsgrundlage für die zulässige Beeinflussung gilt hier die CCITT-Empfehlung G.229, wonach bei einer Längsspannung von 150 V_{eff} je Fernspeiseabschnitt ein Nebenwellenabstand von $\geq$ 57 dB bezüglich irgendeines übertragenen Signales im ganzen Nutzfrequenzband eingehalten werden muss.

35 Impedanzanpassung der Zwischenverstärker an das Kabel

Eine Fehlanpassung der Zwischenverstärkerimpedanz an die Kabelimpedanz kann das Übertragungsverhalten des Systems beeinflussen. Eine kleine Reflexion in jedem Verstärkerfeld kann sich durch Kumulation auf dem 280 km langen homogenen Abschnitt recht beträchtlich auswirken. Das CCITT hat diesbezüglich Empfehlungen herausgegeben, die es gestatten, die von den Fehlanpassungen herrührenden systematisch auftretenden Reflexionen in derart engen Grenzen zu halten, dass die auf 280 km sich ergebenden Dämpfungsverzerrungen weniger als 1 dB betragen. Bei niedrigen Frequenzen, bei denen die Kabeldämpfung niedrige Werte aufweist, kann vorwiegend eine Wechselwirkung der Reflexionen am Verstärkerausgang und am nachfolgenden Verstärkereingang auftreten. Bei hohen Frequenzen kann eine ähnliche Wechselwirkung zwischen dem Verstärker und der nächstgelegenen Spleissstelle auftreten.

Hier soll noch darauf hingewiesen werden, dass die Kabelimpedanz bei Frequenzen oberhalb 100 MHz gewisse Unregelmässigkeiten aufweist (selektive Rückflussdämpfungseinbrüche), deren Auswirkungen bei der Planung eines allfälligen Systems mit einer Bandbreite von beispielsweise 186 MHz genauer untersucht werden müssten.

4 Digitale Systeme

41 Allgemeines

Für die digitalen Koaxialsysteme sind folgende übertragungstechnischen Parameter massgebend:

- Übertragungsbitrate
- Übertragungscode
- Fehlerrate
- Bitfolgeunabhängigkeit der Übertragung
- Jitter

Das zu übertragende Signal muss zudem folgende grundsätzliche Eigenschaften aufweisen: Es muss genügend Taktinformation enthalten, damit der Takt mit genügend kleinem Jitter in den Regeneratoren aus dem Signal gewonnen werden kann. Die notwendige Übertragungsbandbreite soll möglichst klein sein, um die Dämpfung der Regeneratorfelder in realistischen Grössen zu halten. Eine Reduktion der Übertragungsbandbreite kann durch eine Mehrpegelcodierung erreicht werden. Damit werden jedoch die Komplexität der Regeneratorschaltungen und ebenfalls die erforderlichen Störabstände erhöht, um ein bestimmtes Fehlerverhalten des Systems zu erhalten.

Die auf dem 2,048-Mbit/s-Primärmultiplex basierende digitale Hierarchie sieht unter anderem eine Stufe bei etwa 140 Mbit/s vor; die Kapazität, ausgedrückt in 64-kbit/s-Zeitschlitzen beziehungsweise Telefonkanälen, beträgt dabei 1920. Es ist wahrscheinlich, dass Leitungssysteme mit dieser Bitrate eingeführt werden. Die Bitrate eines Systems mit noch grösserer Kapazität ist zurzeit noch nicht festgelegt, sie dürfte voraussichtlich zwischen 400 und 800 Mbit/s liegen. Verschiedene Veröffentlichungen beschreiben Versuchssysteme bei einer Übertragungsrate von 560 Mbit/s, doch können auch andere Werte zurzeit nicht ausgeschlossen werden. Verschiedentlich steht ein dreiwertiges Leitungssignal (4B3T, MS 43 usw.) im Vordergrund der Studien. In anderen Fällen wird die Übertragung mit zweiwertigen und siebenwertigen Signalen untersucht. Welche Art der Signale schliesslich verwendet werden wird, ist zurzeit noch ungewiss.

42 Fehlerratenplanung von Digitalsystemen

Für die Veranschaulichung der für das Fehlerverhalten massgebenden Einflüsse wird vorteilhaft das sogenannte Augendiagramm verwendet. *Figur 3* stellt das Beispiel eines Augendiagrammes dar. Das Augendiagramm ist in der Regel auf den Entscheidungspunkt in der Schaltung bezogen. In der Praxis bestehen nicht ideale Verhältnisse, indem die Entscheidungsschwelle durch Komponententoleranzen, Entzerrungsfehler, Speisungseinflüsse usw. verschoben sein kann. Der Abtastzeitpunkt kann ebenfalls vom Idealfall abweichen (Jitter). Somit ist anstelle der idealen Augenöffnung H nur eine wirkliche Öffnung H' vorhanden. Ist nun dem Nutzsignal eine Störung überlagert, so kann bei $U_x \geq H'$ ein Fehlentscheid auftreten. Als wesentliche Störsignale kommen bei Koaxialsystemen in Be-

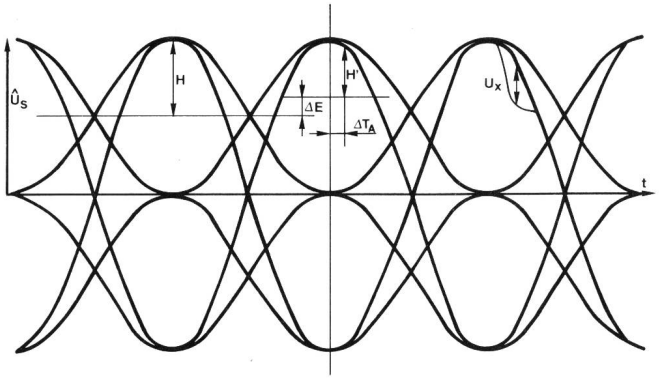

Fig. 3
Augendiagramm eines dreiwertigen Signals

tracht: thermisches Rauschen des Verstärkers und Einflüsse von Reflexionen im Kabel (letztere sind zwar signalabhängig, können aber für diese Betrachtungen wie ein zusätzliches Rauschsignal interpretiert werden). Das thermische Rauschen weist angenähert eine normale Verteilung der Amplitudenmomentanwerte auf. Für die in Betracht kommenden Überschreitungswahrscheinlichkeiten des Verhältnisses Momentanwert/Effektivwert ist die gegenseitige Abhängigkeit sehr ausgeprägt: Je dB Variation des Amplitudenverhältnisses ändert die zugehörige Überschreitungswahrscheinlichkeit um nahezu zwei Grössenordnungen (*Fig. 4*). Somit muss der Wahl des Störabstandes die nötige Beachtung geschenkt werden. Wird dem thermischen Geräusch eine weitere Störung überlagert und soll jenes für das Verhalten des Regenerators massgebend sein, dann muss die zusätzliche Störung wesentlich kleiner als das thermische Geräusch sein.

Die beschriebenen Einflüsse können durch geeignet gewählte Margen bei der Festsetzung des für die geplante Fehlerrate massgebenden Störabstandes berücksichtigt werden: M_H für die Berücksichtigung der Augenschliessung von H auf H' (zum Beispiel etwa 3 dB); M_K für die Berücksichtigung der Störsignale, verursacht durch Reflexionen im Kabel (zum Beispiel etwa 0,5 dB, woraus sich sofort das Verhältnis Nutzsignal/Störsignal für die betreffende Störung bestimmen lässt, nämlich im vorliegenden Fall ungefähr 10 dB mehr als für das thermische Geräusch).

Somit wird unter Annahme einer Fehlerrate beispielsweise $p = 10^{-10}$ (siehe Fig. 4, für ein dreiwertiges Signal $m = 3$)

$$20 \cdot \log (\hat{U}_S/U_N) = 22{,}2 + 3 + 0{,}5 = 25{,}7 \text{ dB}$$

Das durch Reflexionen im Kabel entstehende Geräusch muss somit der Beziehung

$$20 \cdot \log (\hat{U}_S/U_K) = 22{,}2 + 3 + 10 = 35{,}2 \text{ dB}$$

genügen. Die Aspekte im Zusammenhang mit den Reflexionen im Kabel werden Gegenstand einer späteren Publikation sein. Es sei hier lediglich angedeutet, dass selektive Rückflussdämpfungseinbrüche, verursacht durch periodische strukturelle Deformationen im Kabel sowie Impedanzsprünge beim Übergang von der Koaxialtube auf Anschlusskabel, im Zusammenhang mit der nur schwer definierbaren Impedanz der Regeneratoren spezieller Beachtung bedürfen.

Nachdem die das Fehlerverhalten der Regeneratoren bestimmenden Einflüsse beschrieben worden sind, soll nun versucht werden, das Systemverhalten und die Anforderungen an die Regeneratoren in geschlossener Form darzustellen, wie dies im Fall der Analogsysteme durch die Einführung des Verstärkerfähigkeitsfaktors geschehen ist.

Als Systemeinheit soll auch hier in Anlehnung an die Empfehlungen des CCITT ein homogener Abschnitt des digitalen Bezugspfades (Hypothetical Reference Digital Path, siehe [3], Entwurf für neue Empfehlung G.721) betrachtet werden. Die Länge beträgt 280 km, und es seien R Regeneratoren eingesetzt. Die Fehlerrate soll, unabhängig vom zu verwirklichenden System, einen gegebenen Wert p_{280} aufweisen. Ferner sei hier selbstverständlich der Typ des Kabels als gegeben vorausgesetzt.

Unter Annahme normalverteilter Störsignalamplituden gilt für den Störabstand beziehungsweise den Pegel des thermischen Geräusches im Regenerator:

$$20 \cdot \log (\hat{U}_S/U_N) = 4{,}63 + 11{,}42 \cdot \log x + 20 \cdot \log(m-1) + M_H + M_K \text{ dB} \quad (3a)$$

$$\text{wobei } x = \log \frac{2(m-1)}{m} - \log p$$

$$20 \cdot \log (U_N/0{,}274) = P_O + 10 \cdot \log 4 + S + M_S + 10 \cdot \log f_N + F \text{ dBm} \quad (3b)$$

Dabei bedeuten:

$\hat{U}_S$	Signalspannung (Scheitelwert) in V
U_N	Effektivwert der Geräuschspannung in Volt
P_O	Leistung des thermischen Geräusches je kHz Bandbreite, ausgedrückt in dBm (–144 dBm/kHz)
P_S	Leistung der Signalspannung in dBm ($20 \cdot \log (\hat{U}_S/0{,}274)$)
f_N	Nyquistfrequenz in kHz
F	Rauschzahl des Regenerators in dB
S	Dämpfung des Regeneratorfeldes bei f_N (Nominalwert) in dB

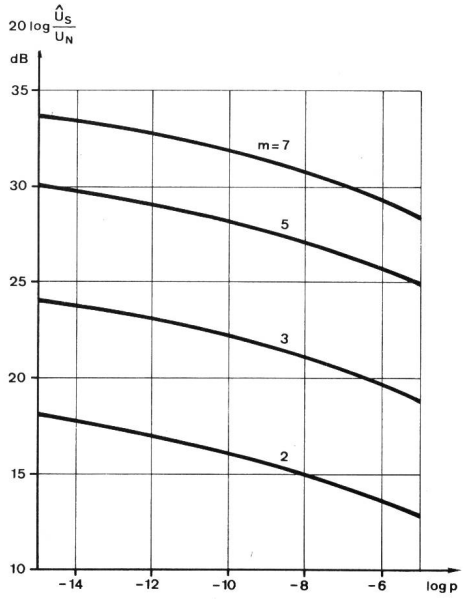

Fig. 4
Störabstand 20 log ($\hat{U}_S/U_N$) in Funktion der Fehlerrate p mit der Signalstufenzahl m als Parameter

m	Anzahl Amplitudenstufen des Signales
p	Fehlerrate des Regenerators
p_{280}	Fehlerrate des Systems auf eine Länge von 280 km
M_H	Marge zur Berücksichtigung der Augenschliessung
M_K	Marge zur Berücksichtigung der Reflexionen im Kabel
M_S	Marge zur Berücksichtigung zusätzlicher Regeneratorfelddämpfung, verursacht durch Temperatureinflüsse und Feldlängentoleranzen usw.
N	Anzahl der zu übertragenden 64 kbit/s Zeitschlitze (entspricht Kapazität in Telefonkanälen)
a'	Verhältnis der Systembitrate dividiert durch N · 64 kbit/s (kann als Bitausnützungsfaktor bezeichnet werden)
b	Faktor zur Berücksichtigung des Einflusses des Übertragungscodes auf die Nyquistfrequenz (zum Beispiel b = 0,75 für den 4B3T-Code, b = 1 für AMI-Code usw.)
R	Anzahl Regeneratorfelder auf 280 km

Eine detailliertere Aufstellung der Zusammenhänge ist im *Anhang 2* enthalten.

Der *Regeneratorfähigkeitsfaktor B* kann nun wie folgt definiert werden:

$$B = 10 \cdot \log(a' \cdot b \cdot N) + \frac{116}{R} \cdot \sqrt{a' \cdot b \cdot N}$$

$$+ 11{,}42 \cdot \log\left[\log R - \log p_{280}\right] - 118{,}3\,\text{dB} \qquad (4a)$$

Anderseits gilt aber auch:

$$B = P_S - F - M_H - M_K - M_S - 20 \cdot \log(m-1) \quad \text{dB} \qquad (4b)$$

Wie aus den beiden Ausdrücken ersichtlich ist, stellt B in (4a) einerseits die durch das System und das Kabel gegebenen Parameter dar, anderseits sind die dafür notwendigen Regeneratoreigenschaften durch (4b) in Zusammenhang gebracht.

Figur 5 enthält einige Kurven, die B in Abhängigkeit der Regeneratorfeldlängen darstellen. Die Anzahl N der zu übertragenden 64 kbit/s-Zeitschlitze ist als Parameter gewählt. Aus den Kurven ist ersichtlich, dass ein 140-Mbit/s-System mit einer Regeneratorfeldlänge von 4,5 km einen Wert von B = 0 dB erfordert. Anderseits verlangt ein 560-Mbit/s-System mit 1,5 km Feldlänge einen Wert von B = –17 dB und ein 700-Mbit/s-System bei gleicher Feldlänge einen Wert von B = –11 dB. In dieser Beziehung stellt somit ein 140-Mbit/s-System höhere Anforderungen. Wie im Falle der Analogsysteme muss jedoch auch hier betont werden, dass die technologischen Aspekte der Verwirklichung entsprechender Schaltungen durch diese reinen Systembetrachtungen nicht berücksichtigt werden.

In *Tabelle II* sind einige Daten zusammengestellt, wie sie aus den behandelten Zusammenhängen abgeleitet werden können.

Tabelle II. Einige Kenngrössen von Digitalsystemen

Übertragungsbitrate Mbit/s	Kanalzahl N	Regeneratorfeldlänge km	B dB	Nominelle Regeneratorfelddämpfung S dB	Signalspannung U_S Volt
140	1920	4,5	0	75,2	1,64
560	7680	1,5	–17	50,5	0,228
700	9600	1,5	–11	56,5	0,46

Dabei wurde von folgenden Annahmen ausgegangen:
$p_{280} = 10^{-8}$, Code: 4B3T (m=3), F = 6 dB, M_H = 3 dB, M_K = 0,5 dB

43 Jitter

Mit Jitter werden die Kurzzeitvariationen der massgebenden zeitlichen Lage eines Digitalsignales bezüglich seiner Sollposition bezeichnet. Es ist offensichtlich, dass ein übertragenes Signal Einflüssen ausgesetzt ist, die zu Jitter führen. Es ist zu unterscheiden zwischen signalabhängigem Jitter und solchem, der vom Signal unabhängig ist. Beim ersteren tritt je nach dem Informationsgehalt des Signals eine Beeinflussung im Taktextraktionskreis des Regenerators auf, bei diesem sind Störsignale, wie thermisches Geräusch, Speisungseinflüsse (zum Beispiel Bahnstrombeeinflussung) usw., massgebend. Die Gesetze der Addition der Jitterkomponenten, die in jedem Regenerator entstehen, sind für die verschiedenen Jitterarten unterschiedlich. In der Literatur sind Jitterprobleme schon mehrmals behandelt worden. Die Art und Weise, wie die Anforderungen an Regeneratoren und ganze Systeme beschrieben werden müssen, sind jedoch Gegenstand weiterer Untersuchungen und Studien. Es sind auch noch keine Richtlinien für den zulässigen Jitter ausgearbeitet worden. Es ist möglich, den Jitter mit speziellen Schaltungen weitgehend zu eliminieren. Die Verwendung solcher Jitterreduzierschaltungen dürfte jedoch auf Spezialfälle beschränkt bleiben.

44 Fernspeisung der Regeneratoren

Die Speisungsprobleme, die im Falle digitaler Leitungssysteme berücksichtigt werden müssen, sind grundsätzlich ähnlicher Natur wie im Falle der Analogsysteme. Die Aus-

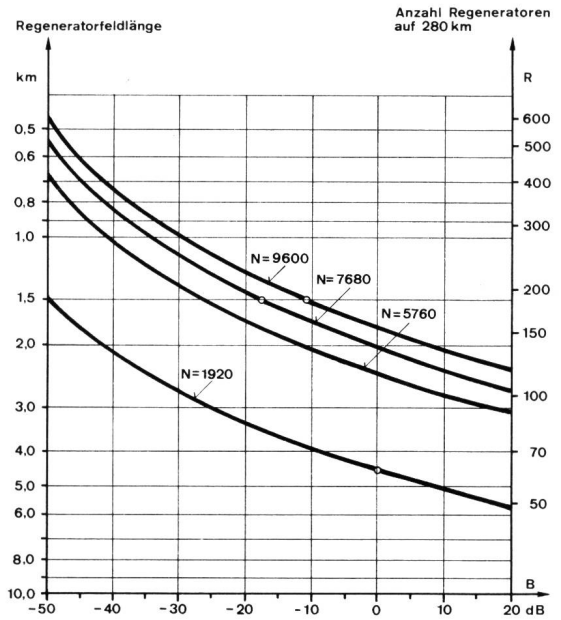

Fig. 5
Regeneratorfähigkeitsfaktor B (Voraussetzungen $p_{280} = 10^{-8}$, m = 3, 4B3T-Code m = 3)

wirkungen der Störbeeinflussungen sind natürlich entsprechend der Eigenschaften der Digitalsysteme anders geartet.

45 Nebensprecheinflüsse

Unter der Voraussetzung, dass die Nahnebensprechdämpfung des Kabels, einschliesslich der nötigen Anschlusskabel, den Wert von 130 dB im ganzen Übertragungsfrequenzband einhält, sind durch Nebensprecheinflüsse keine wesentlichen Probleme zu erwarten. Wird zum Beispiel angenommen, dass 5 Systeme das betrachtete sechste System beeinflussen, dann ergibt sich bei 130 dB Nahnebensprechdämpfung und einem Signalpegelunterschied von 75 dB ein resultierender Störabstand von 48 dB. Dabei wurde eine leistungsmässige Addition der 5 Störkomponenten angenommen. Diese Störbeeinflussung ist genügend unterhalb den andern Störungen, so dass dieser Beitrag in erster Näherung vernachlässigt werden dürfte.

46 Einflüsse unterschiedlicher Regeneratorfelddämpfungen

Die Regeneratorfelddämpfungen entsprechen selbstverständlich kaum je dem nominellen Planungswert. Erstens müssen die Feldlängen den topografischen Gegebenheiten angepasst werden, und zweitens wirken sich die Temperaturschwankungen auf die Dämpfung aus. Um unter allen Bedingungen ein einwandfreies Funktionieren der Regeneratoren und somit des Systems zu gewährleisten, werden die Regeneratoren üblicherweise mit einem automatisch arbeitenden Entzerrer versehen. In vielen Fällen wird heute die Signalamplitude als Regelkriterium verwendet.

5 Schlussbemerkung

In den vorangehenden Abschnitten sind einige an Koaxialsysteme hoher Übertragungskapazität zu stellende Anforderungen diskutiert worden. Speziell in bezug auf Geräusch und Fehlerrate können mit den angegebenen Kurvenscharen Systemvergleiche durchgeführt werden, die gestatten, die Verwirklichungsaussichten verschiedener Systeme aus der Sicht der systemtechnischen Anforderungen abzuschätzen. Weitere Parameter, wie Entzerrung, Nebensprechen, Fernspeisung, Jitter usw., sind kurz diskutiert worden, ohne jedoch auf Details einzutreten. Verschiedene Anforderungen sind anhand von Beispielen erläutert worden. Die technologischen Probleme, die bei der Verwirklichung der Systeme gelöst werden müssen, sowie die Beschreibung realisierter Systeme bildeten jedoch nicht Gegenstand der Betrachtungen.

Anhang 1

Der Verstärkerfähigkeitsfaktor A

Es werden die im Abschnitt 31 definierten Grössen verwendet. Am Ende eines homogenen Abschnittes von 280 km des Bezugsstromkreises treten folgende Geräusche auf:

$$T_2 = t_2 + 2\,P - 10 \cdot \log N + K_2 + p_r + 10 \cdot \log R \text{ dBmOp}$$

$$T_2 = T_{20} + 10 \cdot \log N + 10 \cdot \log R + p_r \text{ dBmOp}$$
$$\text{mit } T_{20} = t_2 - 30 + K_2 \text{ dB}$$

$$T_3 = t_3 - 10 \cdot \log N + K_3 + 2\,p_r + 20 \cdot \log R + 3\,P \text{ dBmOp}$$

$$T_3 = T_{30} + 20 \cdot \log N + 20 \cdot \log R + 2\,p_r \text{ dBmOp}$$
$$\text{mit } T_{30} = t_3 - 45 + K_3 \text{ dB}$$

$$T_N = T_{NO} - p_r + 10 \cdot \log R + S \text{ dBmOp}$$

Aus T_2 oder T_3 kann nun p_r berechnet werden:

$$p_r = T_2 - T_{20} - 10 \cdot \log N - 10 \cdot \log R$$

oder

$$p_r = \frac{T_3 - T_{30}}{2} - 10 \cdot \log N - 10 \cdot \log R$$

Formell, das heisst bezüglich N und R, verhält sich p_r in beiden Fällen gleich; p_r kann nun in T_N eingesetzt werden, und es folgt:

$$T_N = T_{NO} - \left[T_2 - T_{20} - 10 \log N - 10 \log R \right] + S + 10 \log R$$

$$A = T_N - T_{NO} + T_2 - T_{20} = S + 10 \cdot \log N + 20 \cdot \log R \text{ dB}$$

Dieser Ausdruck stellt den Verstärkerfähigkeitsfaktor dar.

$$\text{Ferner ist } T_N - T_{NO} + T_2 - T_{20} = 10 \cdot \log \left[\frac{P_N}{P_{NO}} \cdot \frac{P_2}{P_{20}} \right]$$

P_N und P_2 sind die Geräuschwerte, die vom System über 280 km erfüllt werden müssen, zum Beispiel je 0,5 pW/km für Grundgeräusch und Intermodulationsgeräusch 2. Ordnung; P_{NO} und P_{20} sind die Anforderungen an den Einzelverstärker, um bei bestimmter Wahl von N, R und S die Globalwerte einzuhalten; somit ist ersichtlich, dass A ein Mass für die an den Einzelverstärker zu stellenden Geräuschforderungen darstellt und zum Vergleich verschiedener Systeme verwendet werden kann.

Die Grösse S kann noch etwas anders ausgedrückt werden:

$$S = \frac{aC \cdot \sqrt{N}}{R}$$

C stellt dabei eine vom Kabeltyp abhängige Konstante dar.

Für das 2,6/9,5-mm-Kabel gilt, ausgehend von der nominellen Dämpfung von 18,0 dB/km bei 60 MHz, C = 41,15. Somit wird schliesslich

$$A = 10 \cdot \log N + 20 \cdot \log R + \frac{41{,}15}{R} \cdot a \cdot \sqrt{N} \text{ dB}$$

Anhang 2

Der Regeneratorfähigkeitsfaktor B

Es werden die im Abschnitt 42 definierten Grössen verwendet. Für die Wahrscheinlichkeit p, dass ein Schwellwert $\frac{\hat{U}_s}{(m-l)}$ im Falle eines gaussisch verteilten Rauschsignals mit Effektivwert U_N überschritten wird, gilt

$$p = \frac{(m-1)}{m} \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{\hat{U}_s}{(m-1) \cdot \sqrt{2}\,U_N} \right]$$

Daraus kann folgende angenähert geltende Beziehung abgeleitet werden:

$$20 \cdot \log\left(\frac{\hat{U}_S}{U_N}\right) = P_S - P_N = 4{,}63 + 11{,}42 \cdot \log x$$
$$+ 20 \cdot \log (m-1) \text{ dB}$$
$$\text{wobei } x = \log \frac{2(m-1)}{m \cdot p} \text{ dB}$$
$$\text{sowie } p = \frac{p_{280}}{R}$$

Ferner gilt an der Entscheidungsschwelle für die Leistung des thermischen Geräusches:

$$P_N = P_O + S + 10 \cdot \log f_N + F + 10 \log 4 \text{ dBm}$$

Die Nyquistfrequenz f_N kann durch die Anzahl N der zu übertragenden 64-kbit/s-Zeitschlitze, einen Bit-Ausnützungsfaktor a' (Übertragungsbitrate des Systems dividiert durch N·64 kbit/s) sowie einen den Übertragungscode berücksichtigenden Faktor b, ausgedrückt werden (in b sind die Stufenzahl m des Signals sowie eine allfällige Codierung berücksichtigt. Für die 4B3T- und MS43-Codes ist b = 0,75, für den AMI-Code gilt b = 1).

$$\text{Somit wird } f_N = 1/2 \cdot N \cdot a' \cdot b \cdot 64 \text{ kHz}$$

Die kilometrische Kabeldämpfung kann, basierend auf dem nominellen Wert von 18,0 dB/km bei 60 MHz, ebenfalls durch f_N ausgedrückt werden.

$$A_c = 18 \cdot \sqrt{\frac{f_N}{60\,000}} \text{ oder } 0{,}415 \cdot \sqrt{a' \cdot b \cdot N} \text{ dB/km}$$

Die Regeneratorfelddämpfung S kann nun wie folgt dargestellt werden:

$$S = \frac{116}{R} \cdot \sqrt{a' \cdot b \cdot N} \text{ dB}$$

Dabei ist berücksichtigt, dass die Länge eines Regeneratorfeldes durch 280/R angegeben werden kann.

Durch Einsetzen von P_N, unter Berücksichtigung der verschiedenen Margen, sowie durch Ordnen der Ausdrücke kann nun folgende Darstellung erhalten werden:

$$P_S - F - M_H - M_K - M_S - 20 \cdot \log (m-1) =$$
$$10 \cdot \log (a' \cdot b \cdot N) + \frac{116}{R} \cdot \sqrt{a' \cdot b \cdot N} - 118{,}3$$
$$+ 11{,}42 \cdot \log \left[\log R - \log p_{280}\right]$$

Jede Seite der obigen Gleichung kann nun gleich B gesetzt werden, womit der Regeneratorfähigkeitsfaktor definiert werden kann.

Bibliographie

[1] *CCITT*. Contribution by the Chile Telephone Co. Dokument COM XV-Nr. 10 der Studienperiode 1964/1968, Annex 1, S. 13.
[2] *CCITT*. Fifth Plenary Assembly. 1972. Green Book Volume III.
[3] *CCITT*. Dokument COM Sp.D. Nr. 328 der Studienperiode 1973/1976, S. 91...95.

Die nächste Nummer bringt unter anderem
Vous pourrez lire dans le prochain numéro

L. Praz	Une méthode pour déterminer le prix de revient des communications téléphoniques Eine Methode zur Ermittlung der Kosten von Telefonverbindungen
J. Krapf	Auswirkungen der Tariferhöhungen und der Änderung der Tarifzeiten vom 2. Dezember 1974 auf den Telefonverkehr Effets de la hausse des tarifs et de la modification des périodes tarifaires du 24 décembre 1974 sur le trafic téléphonique
F. Rohrer	Das neue Explosimeter «Gasotrans» Le nouvel explosimètre «Gasotrans»
R. Tausky	Verstärkung von Tragkonstruktionen mit geklebter Armierung