

Ein Modell des Nahnebensprechens an PIMF-Datenkabeln

Martin Backmann, Dr. Christian Pfeiler, Andreas Waßmuth
NK NETWORKS, Nürnberg

Durch die Entwicklung der Datenkabel mit einzelnen Paarschirmen (S/STP, Paar in Metallfolie) von der Kategorie 5 /1/ hin zur Kategorie 6 /2/ rücken bislang unbeachtete Frequenz- und Dynamikbereiche bei der Messung des Nahnebensprechens in den Mittelpunkt der Betrachtung. Es zeigt sich dabei eine Längenabhängigkeit, die bei anderen Datenkabeltypen (UTP, S/UTP) kaum beobachtet werden kann. Insbesondere tritt an Konstruktionen der Kategorie 5 in diesem Dynamikbereich oft ein typisches längenabhängiges Maximum der Nahnebensprechdämpfung bei Frequenzen von einigen 10 MHz auf, wenn die untersuchten Kabellänge im Bereich von 100 m oder kürzer liegt. Dadurch erscheint die Gewährleistung der Nebensprechgrenzwerte in der Tertiärverkabelung, am Link, ohne ein Weiterentwicklung als problematisch.

Es wird ein Wirkungsmechanismus beschrieben, der die Ursachen für diese Meßergebnisse veranschaulicht. Obgleich dabei von einigen Vereinfachungen ausgegangen wird, läßt das Modell doch quantitative Aussagen zu. Für die Konstruktion von PIMF-Datenkabeln ergeben sich daraus entscheidende Auslegungsprinzipien, die auch für zukünftige Weiterentwicklungen bedeutend sind /3/.

Wesentlich für das Nebensprechen von PIMF-Kabeln ist der Kopplungswiderstand des einzelnen PIMF-Elementes. Deshalb werden zunächst anhand eines Modells aus der Literatur die Einflußgrößen für diesen Kopplungswiderstand diskutiert. Darauf aufbauend wird mit bestimmten Annahmen für die Konversion zwischen den Eigenwellen der geschirmten Doppelleitung sowie die Superposition der einzelnen, betrachteten Teilwellen das Kopplungsmodell entwickelt. Die Tragfähigkeit des Modellierungsansatzes wird anhand des Vergleiches der numerischen Auswertung mit Messungen an verschiedenen Kabellängen gezeigt.

1 Kopplungswiderstand von Paaren mit Folienschirm

Zur Messung des Kopplungswiderstandes von paarigen Kabeln wird ein Paar im Gleichtakt gegen den Schirm betrieben. Für die Messung des Kopplungswiderstandes eines PIMF-Elementes kann somit näherungsweise von einer koaxialen Anordnung ausgegangen werden. Besteht der Außenleiter dieser Anordnung aus einer um einen Radius r gewickelten Folie mit der Breite b , der Schlaglänge l und der Leitschichtdicke d mit der Leitfähigkeit σ so gilt nach /4/ für den Kopplungswiderstand

$$Z_k = R_0 \left(\frac{l}{\sin^2(a)} + \frac{j r d}{d^2 \tan^2(a)} \right), \quad (1)$$

mit dem Gleichstromwiderstand

$$R_0 = \frac{\sqrt{l^2 + (2pr)^2}}{l b d k} \quad \text{und dem Steigungswinkel } a = \arctan\left(\frac{l}{2pr}\right) \text{ sowie}$$

$$\text{der Eindringtiefe } d = \frac{l + j}{\sqrt{j \omega \mu_0 k}}.$$

Der Kopplungswiderstand des einzelnen PIMF-Elementes ist bei Kategorie 5-Standardtypen bis zu Frequenzen von $f_0 \approx 1$ MHz konstant und entspricht einem Wert, der etwas größer ist als der Gleichstromwiderstandsbelag. Erst bei sehr großen Schlaglängen liegt etwa der Gleichstromwiderstandsbelag vor. Bei Frequenzen größer als f_0 folgt ein frequenzproportionaler Anstieg, der anschaulich durch die Induktivität des gewickelten Schirmes verursacht wird.

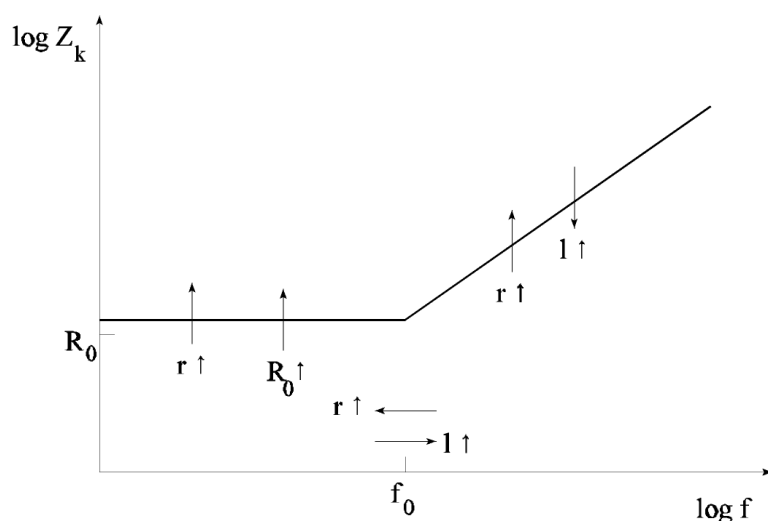


Bild 1 Typischer Frequenzgang des Kopplungswiderstandes eines einzelnen PIMF-Elementes und Wirkungsrichtung der wesentlichen Einflußgrößen

Diese Frequenzgang-Schematik sowie die Auswirkungen von Änderungen der wesentlichen Eingangsgrößen zeigt Bild 1.

Da die Schirmwirkung bei einem kleinen Kopplungswiderstand groß ist, muß versucht werden, das Verhältnis zwischen dem Wert bei der höchsten betrachteten Frequenz und dem Wert bei der niedrigsten betrachteten Frequenz möglichst klein zu halten, was entsprechend Bild 1 und Gleichung (1) durch verschiedene konstruktive Maßnahmen möglich ist.

2 Nebensprechen von PIMF-Kabeln

Das Nebensprechen zwischen zwei PIMF-Elementen erfolgt nach einem mehrstufigen Mechanismus:

- 1) Das beeinflussende Element wird am A-Ende mit einem symmetrischen Signal (Gegentaktsignal) angeregt. Ein Teil dieses Signales konvertiert aufgrund von Unsymmetrien des beeinflussenden Elementes in den Gleichtaktmodus (unsymmetrisches System). Dadurch wird ein Strom in den Paarschirmen hervorgerufen.
- 2) Der Strom bewirkt eine Spannung im Gleichtaktsystem des beeinflussten Elementes. Dieser Beeinflussungsmechanismus wird durch den Kopplungswiderstand des Elementes beschrieben; der Kopplungswiderstand ist genau als Quotient der unsymmetrischen Spannung in einem Koaxialelement und des Schirmstromes definiert.
- 3) Aufgrund von Unsymmetrien des beeinflussten Elementes konvertiert ein Teil des Signales des unsymmetrischen Systems in das symmetrische System des beeinflussten Elementes und wird als Nebensprechen detektiert.

Für die Frequenzabhängigkeit des Nahnebensprechens ist neben dem Frequenzgang des Kopplungswiderstandes zudem die frequenzabhängige Dämpfung der Teilwellen bedeutsam. Ferner ist zu beachten, daß das Gleichtaktssystem eines PIMF-Elementes in der Regel nicht mit dem entsprechenden Wellenwiderstand abgeschlossen ist.

2.1 Modellierung des Nebensprechens

Für die genauere Modellierung werden folgende Vereinfachungen angenommen:

- Die Signalamplituden im symmetrischen und unsymmetrischen System sind unabhängig von der Richtung der Konversion und der Frequenz immer über die Erdunsymmetriedämpfung a_{LCL} (*engl.* longitudinal conversion loss) verbunden.
- Eine Stromverteilung in den Paarschirmen wird nicht berücksichtigt.
- Das unsymmetrische System ist am E-Ende nicht abgeschlossen; die ankommenden Teilwellen werden totalreflektiert.
- Die Überlagerung von Teilwellen ist immer konstruktiv; die Phasenlagen der Teilwellen werden nicht berücksichtigt.
- Der Dämpfungsbelag und die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist im Gleich- und Gegentaktssystem identisch.
- Die Leitungen werden als homogen über die Länge angesehen.

Ferner werden folgende Ausgangsdaten angenommen:

Gleichtaktwellenwiderstand: $Z_g = 30 \Omega$

Ausbreitungsgeschwindigkeit: $v = 0,8 c_0$ (mit $c_0 = 300000$ km/s, Lichtgeschwindigkeit)

Erdunsymmetriedämpfung: $a_{LCL} = -40$ dB

Ausbreitungskonstante: $g = 2,4 \frac{\text{mNp}}{\text{m}} \sqrt{\frac{f}{\text{MHz}}} + j \frac{w}{v}$

Kopplungswiderstand: $Z_k = 0,1 \Omega/\text{m}$ (für $f \leq 1\text{MHz}$) bzw. $0,1e^{2,65 \log(f/\text{MHz})} \Omega/\text{m}$ (für $f \geq 1\text{MHz}$)

Für die Abschätzung des Nahnebensprechens werden nun vier Teilwellen betrachtet (Bild 2):

- 1) Eine Teilwelle, die zunächst in das Gleichtaktsystem konvertiert, dann mittels direktem Nahnebensprechen in das beeinflusste Element übertritt und schließlich in das Gegentaktsystem konvertiert. Nach /4/ gilt für das Nahnebensprechen zwischen zwei koaxialen Elementen:

$$\mathbf{a}_n = 20 \log \frac{Z_k}{4 Z_g |g|}, \quad (2)$$

Damit folgt für die erste Teilwelle eine Dämpfungssumme von:

$$\mathbf{a}_1 = 2 \mathbf{a}_{LCL} + \mathbf{a}_n$$

- 2) Eine Teilwelle, die zunächst in das Gleichtaktsystem konvertiert, bei einem Durchlaufen der Leitung gedämpft und am E-Ende reflektiert wird, mittels Fernnebensprechen in das beeinflusste Element übertritt und dann in das Gegentaktsystem konvertiert.
- 3) Eine Teilwelle, die zunächst in das Gleichtaktsystem konvertiert, mittels Fernnebensprechen in das beeinflusste Element übertritt, am E-Ende reflektiert und bei einem Durchlaufen der Leitung gedämpft wird und dann in das Gegentaktsystem des beeinflussten Elementes konvertiert. Für das Fernnebensprechen gilt nach /4/:

$$\mathbf{a}_f = 20 \log \left(\frac{Z_k l}{2 Z_g} \right) - 20 \log(e) \operatorname{Re}(g) l$$

Die Dämpfungssummen sind für die Teilwellen 2) und 3) identisch:

$$\mathbf{a}_{23} = 2 \mathbf{a}_{LCL} + \mathbf{a}_f - 20 \log(e) \operatorname{Re}(g) l$$

- 4) Eine Teilwelle, die zunächst das beeinflussende Element durchläuft, ins Gleichtaktsystem konvertiert, das E-Ende des beeinflussten Elementes mittels Nahnebensprechen nach Gleichung (2) erreicht und schließlich an das A-Ende des beeinflussten Elementes läuft. Die Dämpfung dieses Pfades ist:

$$\mathbf{a}_4 = \mathbf{a}_n - 2 (\mathbf{a}_{LCL} - 20 \log(e) \operatorname{Re}(g) l)$$

Die Amplituden der Teilwellen werden nun addiert und es ergibt sich folgende resultierende Nahnebensprechdämpfung:

$$\mathbf{a}_{res} = 20 \log \left(10^{\left(\frac{\mathbf{a}_1}{20}\right)} + 2 \cdot 10^{\left(\frac{\mathbf{a}_{23}}{20}\right)} + 10^{\left(\frac{\mathbf{a}_4}{20}\right)} \right), \quad (3)$$

Die Auswertung der Gleichung (3) ist für verschiedene Leitungslängen in Bild 3 dargestellt. Es wird deutlich, daß ein Überschreiten der Cat.6-Grenzkurve /2/ bei kürzeren Leitungslängen möglich ist. Bei größeren Längen verschiebt sich das charakteristische Maximum des Nahnebensprechens zu kleineren Frequenzen hin bei gleichzeitiger Verminderung des Maximalwertes. Wesentliche Einflußgrößen auf das Nahnebensprechen sind die Erdsymmetriedämpfung und des Kopplungswiderstand der PIMF-Elemente. Eine Verminderung der Erdsymmetriedämpfung um 1 dB führt zu einer Verminderung der Nahnebensprechdämpfung um 2 dB. Durch eine Verbesserung des Kopplungswiderstandes der PIMF-Elemente reduzieren sich die Scheitelwerte der Nahnebensprech-Maxima und es ist möglich, die Cat.6-Forderung bei unveränderter Erdsymmetrie zu erfüllen.

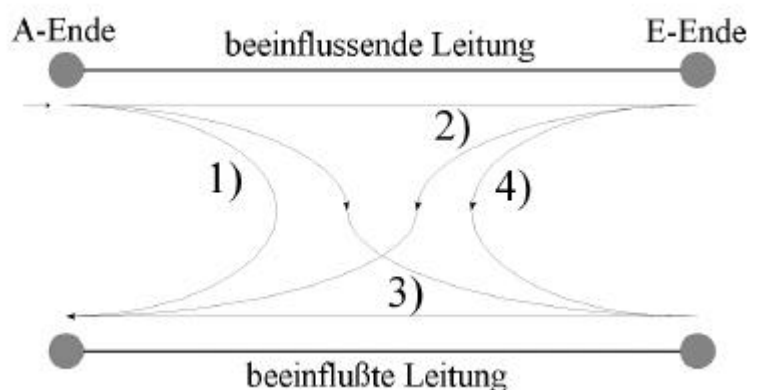


Bild 2 Schematische Darstellung der Beeinflussungspfade des Nahnebensprechmodells

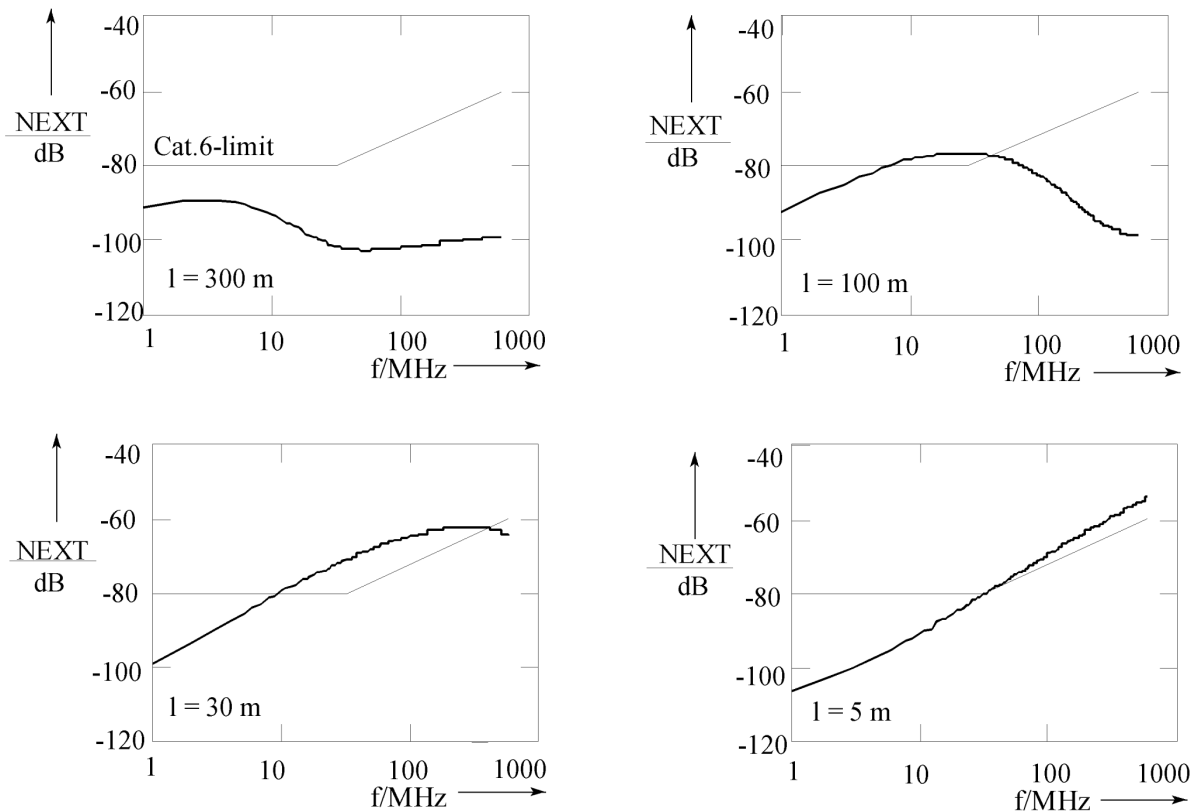


Bild 3 Auswertung des Nahbensprechmodells für verschiedene Leitungslängen

3 Vergleich der Modelle mit Messungen

Bild 4 zeigt die Gegenüberstellung von Rechnung und Messung des Kopplungswiderstandes an einem PIMF-Element. Die Variante 1) entspricht einem Standardaufbau eines Kategorie 5 PIMF-Kabels mit AWG 22-Leiter; die Variante 2) ist eine Modifikation. Eine aussagekräftige Größe ist das Verhältnis zwischen dem Wert des Gleichstromwiderstandes bei kleinen Frequenzen und dem 100 MHz-Wert. Bei der Kategorie 5-Variante des AWG 22-PIMF beträgt dieses Verhältnis etwa 200; bei Kabeltypen, die sicher die Cat.6-Grenzwerte einhalten, sind Werte im Bereich von 20 typisch.

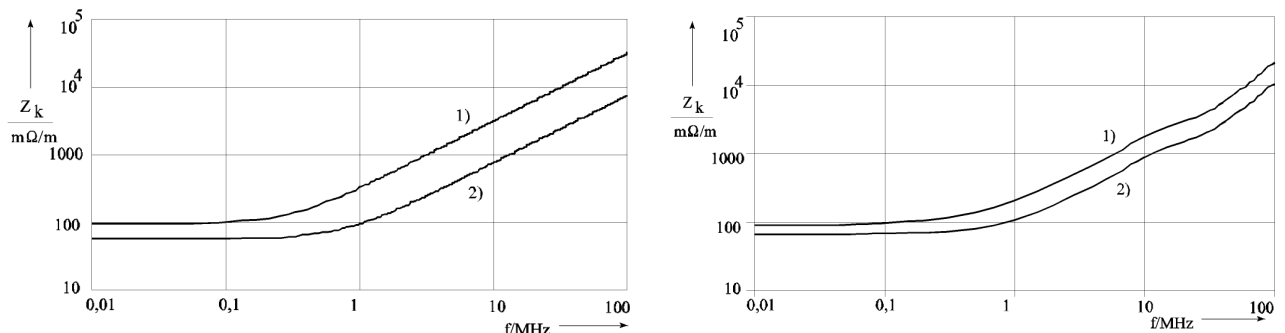


Bild 4 Vergleich von Rechnung (links) und Messung (rechts) des Kopplungswiderstandes von zwei PIMF-Elementen (1: AWG 22 Kategorie 5; 2: Modifikation)

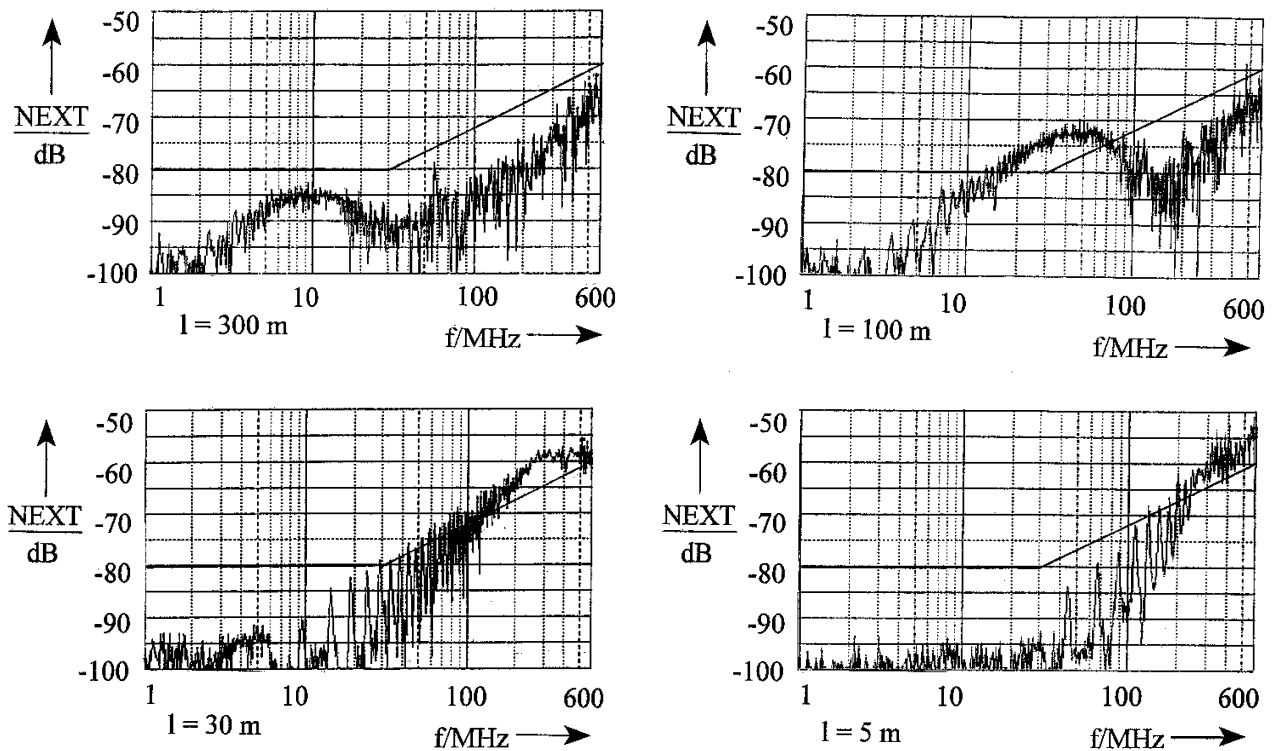


Bild 5 Messung der Nahbensprechdämpfung an unterschiedlichen Längen eines PIMF-Kabels der Kategorie 5

Das Bild 5 zeigt Messungen des Nahbensprechens an einem PIMF-Kabel der Kategorie 5 bei verschiedenen Kabellängen. Der Vergleich zu Bild 3 zeigt tendenziell eine gute Übereinstimmung. Es wird allerdings deutlich, daß noch weitere Effekte eine Rolle spielen; bei den größeren Längen steigen die Kurven bei größeren Frequenzen im Gegensatz zu Bild 3 wieder an. Dies ist auf den direkten Durchgriff elektrischer oder magnetischer Felder an Schirminhomogenitäten, möglicherweise auch im Bereich der Anschlüsse an die Baluns, zurückzuführen.

Bei kürzeren Längen zeigen sich deutlich Effekte von Leitungsresonanzen. Dies wird im Modell nicht berücksichtigt. Es zeigt aber, daß den Abschlüssen von Gleich- und Gegentaktwellen der beteiligten Paare große Bedeutung zukommt.

4 Schlußfolgerungen für den Aufbau von Datenkabeln der Kategorie 6

Das vorgestellte Modell ermöglicht eine verbesserte Auslegung von PIMF-Datenkabeln. Es basiert auf einem Kopplungsmodell, das die Konversion zwischen Gegen- und Gleichtaktmodus und den Kopplungswiderstand des foliengeschirmten Paares sowie die Theorie des Nebensprechens zwischen coaxialen Leitungen berücksichtigt. Damit veranschaulicht das Modell zudem unerwartete Unterschiede zwischen Nebensprechmessungen an Produktions- und typischen Installationslängen.

Bild 6 zeigt eine Nebensprechmessung an einem solchen PIMF-Kabel (NK NETWORKS UC 600 SS 22 4P). Die Anforderungen der Kategorie 6 werden mit einer großen Sicherheit erfüllt; positive ACR-Werte sind unter Berücksichtigung der beschriebenen Effekte und der daraus folgenden Design-Regeln bis weit oberhalb von 600 MHz möglich.

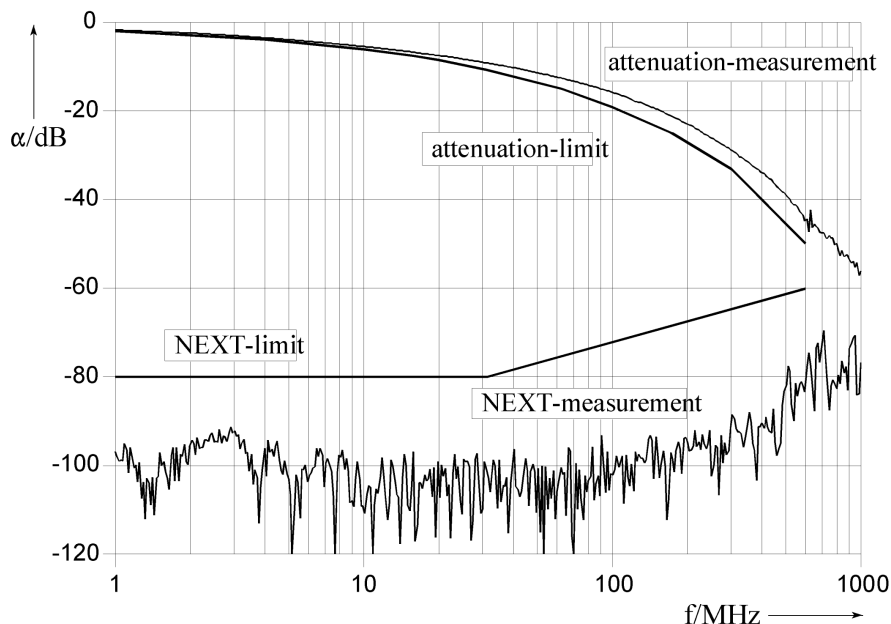


Bild 6 Nahbensprechdämpfung und Betriebsdämpfung des Kategorie 6-Kabels UC600 SS22 4P (NK Networks), Länge der Kabelprobe $l = 90$ m

Literatur

- /1/ --- ISO/IEC 11801:1995: Information technology - Generic cabling for customer premises.
- /2/ --- E DIN 44312-5:1996-08: Anwendungsneutrale Verkabelungssysteme Teil 5: Verkabelungsstreckenklasse E.
- /3/ Waßmuth, A. Quo vadis Kupferkabel? Zukunft der symmetrischen Datenübertragungskabel. telekom praxis, Heft 1/1996, S. 28-32
- /4/ Kaden, H. Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik. Springer-Verlag, 1959

Anschrift der Autoren:

NK Networks GmbH
 Wohlauer Straße 15
 D-90475 Nürnberg
 Telefon: +49 911 8337 176
 Fax: +49 911 8337 206
 Email: cpfeiler@nknetworks.com
<http://www.nknetworks.com>