

# Verbesserung der xDSL-Performance durch das Kabeldesign

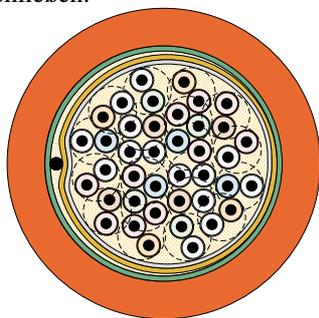
Werner Henkel, Tomas Nordström, ftw., Wien<sup>1</sup>  
Werner Lenger, nkt cables, Kapfenberg

## Kurzfassung

Auf der Grundlage der Anforderungen moderner xDSL-Übertragungstechnik wird dargestellt, welche Möglichkeiten das Kabeldesign bezüglich der Performance-Verbesserung eröffnet. Neben der Beschreibung der prinzipiellen Einflussfaktoren des Kabeldesigns wird die Mess-Methodik zusammen mit der Modellbildung erläutert, die schließlich über eine Simulation zu xDSL-Performance-Abschätzungen führt, die es dann erlauben, das Kabeldesign zu beurteilen.

## 1 Einleitung

Seit Entwicklung des ISDN werden zunehmend höherwertige Systeme wie HDSL (High bitrate Digital Subscriber Line), ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line), SDSL (Symmetric Single-pair high rate Digital Subscriber Line), VDSL (Very high bit rate Digital Subscriber Line) auf Teilnehmeranschlussleitungen eingesetzt. Dabei werden die xDSL-Systeme entsprechend der vorhandenen Kabelinfrastruktur optimiert. Dieser Beitrag zeigt nun, dass Kabelhersteller umgekehrt auch initiativ werden können, neue Kabel stärker den Erfordernissen der hochratigen Übertragungstechnik anzupassen. Dabei genügen oft geringe Modifikationen im Kabelaufbau, um die Übertragungs- und Nebensprecheigenschaften signifikant zu verändern. Im folgenden Abschnitt werden die Einflussfaktoren im Kabeldesign erläutert, mit denen sich die Übertragungs- und Nebensprecheigenschaften beeinflussen lassen. Danach folgt ein Abschnitt über zentrale Messungen und deren Auswertung. Es schließt sich eine Darstellung möglicher Modellierung der Kabeleigenschaften an, die dann schließlich die Grundlage einer Performancesimulation bildet, deren Resultate, von einer kurzen Zusammenfassung abgesehen, diesen Beitrag beschließen.



**Bild 1** Beispiel eines Kabelaufbaus

## 2 Einflussmöglichkeiten durch das Kabeldesign

Vom Kabelaufbau her haben sich historisch vier verschiedene Strukturen herauskristallisiert. Diese unterscheiden sich einmal dadurch, ob man Doppeladern (Paare) separat oder zwei Doppeladern als Sternvierer als eine Einheit verwendet. Im weiteren Kabelaufbau unterscheidet man lagen- oder bündelverseilte Anordnungen. Dies resultiert in den Kombinationsmöglichkeiten

1. Paar- und Lagenverseilung,
2. Paar- und Bündelverseilung (Bild 1),
3. Sternvierer mit Lagenverseilung
4. Sternvierer mit Bündelverseilung

Meist haben sich Betreiber auf eine dieser Strukturen festgelegt (wobei auch Mixturen, wie lagenverseilte Bündel, vorkommen.). Damit sind Kabelhersteller kaum mehr frei in ihrer Wahl, auch wenn die Kombination 2 wohl die besten Hochfrequenzeigenschaften aufweist. Neben dem prinzipiellen Kabelaufbau spielt der Leiterdurchmesser, der Aderdurchmesser (inklusive Isoliermaterial), das Isoliermaterial, der Schäumungsgrad und das Füllmaterial eine wesentliche Rolle. Hinzu kommt die Auswahl der Schlaglängen, oder genauer, die Schlaglängenverhältnisse der Paare zueinander. Diese Einflussfaktoren haben die folgenden Auswirkungen:

Leiterdurchmesser	beeinflusst insbesondere $R'$ und $L'$ ; die Dämpfung sinkt mit steigendem Durchmesser durch Verringerung von $R'$ . $L'$ sinkt mit steigendem Durchmesser, was natürlich auch
-------------------	--

<sup>1</sup> E-mail-Kontakte: Werner.Henkel@ieee.org, Tomas.Nordstrom@ftw.at, Werner.Lenger@nktcables.com

	einen entsprechenden Einfluss auf den Wellenwiderstand und die Ausbreitungskonstante hat; auch das Nebensprechverhalten verbessert sich mit steigendem Durchmesser
Füll- und Isoliermaterial	beeinflusst insbesondere den Kapazitätsbelag $C'$ und damit den Wellenwiderstand und die Ausbreitungskonstante
Stärke des Isoliermaterials	beeinflusst die Beläge $C'$ und $L'$ , $C'$ fällt mit der Dicke des Isoliermaterials, $L'$ steigt hingegen, da sich der Abstand der beiden Leiter zueinander vergrößert
Schlaglänge	je kürzer die Schlaglänge, desto größer die Dämpfung und desto günstiger die Nebensprecheigenschaften; Schlaglängen sollten sich bei nahe gelegenen Paaren unterscheiden
Verseilungsart	Bzgl. des Nebensprechens erzielt man mit Zufallsverseilung innerhalb von Bündeln günstige Eigenschaften.

$G'$  kann bei üblichen Isoliermaterialien meist vernachlässigt werden.

Aus dem Gesagten wird klar, dass ein Kompromiss zu suchen ist, der einmal den Wellenwiderstand näherungsweise erhält, die Dämpfung nicht wesentlich erhöht, jedoch die NEXT/FEXT-Kopplungen deutlich verringert. Bei kürzerer Schlaglänge die Dämpfung zu erhalten, ist beispielsweise durch geringfügig dickere Leiter erreichbar, aber auch durch Wahl eines anderen Füllmaterials. Günstigere Kopplungseigenschaften sind bei Zufallsverseilung und kürzere und unterschiedliche Schlaglängen gegeben. Bei diesen Modifikationen ist natürlich immer zu berücksichtigen, dass der Preis nicht wesentlich steigen sollte. Dadurch wird beispielsweise die Verwendung von deutlich dickeren Leitern beschränkt (Kupferpreis) oder auch manche Füllmaterialien kommen erst gar nicht in Betracht, obwohl sie sich von ihren Eigenschaften her besonders anbieten würden. Einzelne abgeschirmte Doppeladern hätten natürlich sehr viel günstigere Eigenschaften, bleiben jedoch aus Preisgründen den eigentlichen Datenkabeln vorbehalten.

Bislang wurden paar- und bündelverseilte Kabel und auch lagenverseilte mit Sternviererstruktur entsprechend modifiziert. Dabei zeigte es sich, dass mit eigentlich geringen Modifikationen, die entsprechend oben Gesagtem optimal aufeinander abgestimmt sein

müssen, erhebliche Performance-Gewinne für Hochratenmodems erzielt werden können.

### 3 Messungen der Übertragungs- und Nebensprecheigenschaften

Die übertragungstechnischen Eigenschaften eines mehrpaarigen Kabels aus symmetrischen Doppeladern ist einmal durch die Übertragungsfunktionen, aber auch durch die Kopplungen zwischen Doppeladern und, damit verbunden, ihre Symmetrieeigenschaften bestimmt. Hier dargestellt werden Messungen der Übertragungsparameter und des Nah- und Fernnebensprechens, als NEXT (Near-End Crosstalk) und FEXT (Far-End Crosstalk) bezeichnet. Die Übertragungseigenschaften (Spannung in Abhängigkeit der Leitungslänge  $l$ ) bei idealem Abschluss mit dem Wellenwiderstand sind durch

$$\hat{u}_2 = \hat{u}_1 e^{-\gamma l} = \hat{u}_1 e^{-(\alpha + j\beta)l}$$

gegeben, wobei  $\gamma = \alpha + j\beta$  zusammen mit dem Wellenwiderstand  $Z_w$  die sogenannten sekundären Leitungsparameter bilden. Daraus berechnen sich die primären Leitungsparameter, die die Leitungsbeläge darstellen, unter Zuhilfenahme von

$$Z_w = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$$

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')}$$

als

$$R' = \operatorname{Re}\{\gamma \cdot Z_w\}$$

$$L' = 1/\omega \cdot \operatorname{Im}\{\gamma \cdot Z_w\}$$

$$G' = \operatorname{Re}\{\gamma / Z_w\}$$

$$C' = 1/\omega \cdot \operatorname{Im}\{\gamma / Z_w\}$$

Die primären Parameter (Leitungsbeläge) erweisen sich als numerisch etwas kritischer. Für Performance-Aussagen eignen sich die sekundären Parameter auch mehr, so dass wir hier auf die Darstellung von Ergebnissen bzgl. der primären Parameter verzichten wollen.

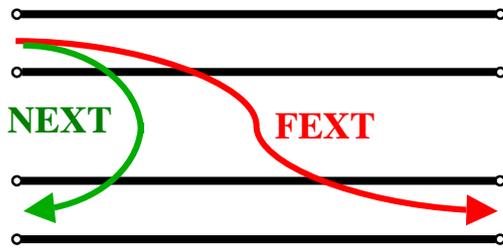
Eine Möglichkeit der Bestimmung der sekundären Leitungsparameter ist durch Messungen der Eingangsimpedanzen (oder Reflexionsfaktoren  $S_{11}$  bzw.  $S_{22}$ ) bei Kurzschluss und Leerlauf am gegenüberliegenden Ende gegeben. Diese ergeben sich wie folgt:

$$\gamma l = \operatorname{atanh}(\sqrt{Z_k / Z_l} \cdot e^{jm\pi}) + jm\pi$$

$$Z_w = \sqrt{Z_k \cdot Z_l} \cdot e^{jm\pi}$$

Hier sind neben dem Hauptwert der Wurzeln und der atanh-Funktion auch deren zusätzliche Lösungen mit angegeben. Diese sind insbesondere zu berücksichtigen, wenn man sich ebenfalls für die Phase  $\beta$  der Ausbreitungskonstante  $\gamma$  interessiert. Die Auswahl der richtigen Lösung erweist sich dabei als nicht triviales Problem, dem auch so manche kommerzielle Messausrüstung nicht gewachsen zu sein scheint.

Als Messgeräte eignen sich Impedanzanalysatoren oder Netzwerkanalysatoren mit Reflexionsfaktormessung. Selbst bei Impedanzanalysatoren ist die Verwendung eines Symmetrierübertragers anzuraten, auch wenn die Messeingänge symmetrische Eigenschaften zu haben scheinen.



**Bild 2** Nebensprechen

Bei Messungen der Nahnebensprecheigenschaften (NEXT) wird meist die Längenabhängigkeit vernachlässigt. Dies ist tolerierbar bei Kabellängen von über 100 m. Auch unsere eigenen Messungen verwenden üblicherweise diese Näherung. Somit ist NEXT eine vergleichsweise simple Messung der Übertragungsfunktion zwischen zwei Adernpaaren auf der gleichen Seite bei näherungsweise abgeschlossenem Abschluss mit dem Wellenwiderstand auf der gegenüberliegenden Seite. Die Messung erfolgt über Symmetrierübertrager, die gleichzeitig die Wellenwiderstandsanpassung gewährleisten. Für die NEXT-Messung genügt damit nahezu jeder handelsübliche Netzwerkanalysator.

Das für NEXT Gesagte trifft im Prinzip auch auf FEXT zu, nur ist hier die Übertragungsfunktion zwischen zwei Doppeladern an gegenüberliegenden Enden zu messen. Wichtig ist auch, dass man versucht, die Längenabhängigkeit zu berücksichtigen und auch gleichzeitig die Übertragungsfunktion, die mit (aufgeteilt auf beide Leiterpaare) durchlaufen wird, herauszurechnen. Man erhält damit das sogenannte Equal-Level FEXT. Die Längenabhängigkeit wird dabei i.allg. mit einer linearen Zunahme bzgl. der Leistungsüberkopplung zugrundegelegt, was anschaulich

naheliegender ist und sich auch als praktisch realistisch herausgestellt hat. Die Bestimmung des Equal-Level Fext ist gegeben durch

$$N_{EL-FEXT}(f) = \underbrace{N_{FEXT}(f)}_{\text{gemessen}} \cdot \sqrt{1 \text{ km} / l} \cdot 10^{+\alpha(f)l/20} \cdot e^{+j\beta(f)l},$$

wobei der Dämpfungsbelag  $\alpha(f)$  in dB/km zu sehen ist und die Länge  $l$  in km gemessen wird.

Die Kabeldämpfung, NEXT- und FEXT-Übertragungsfunktionen zusammen mit einer Anordnung von Fremdsystemen, die als NEXT- oder FEXT-Störer wirken, sind die Grundlage der weiter unten dargestellten Performanceanalyse.

## 4 Modellierung der Kabeleigenschaften

### 4.1 Übertragungsfunktion

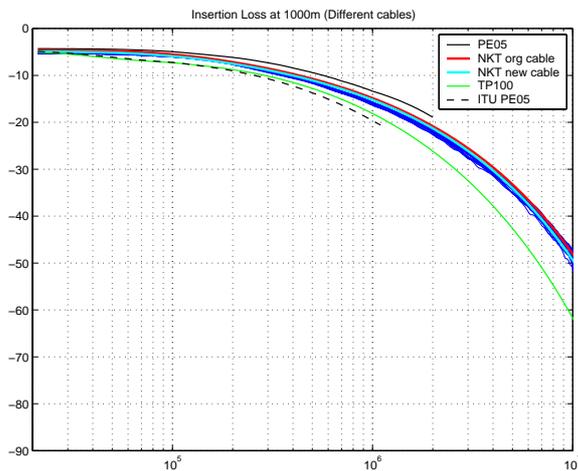
Zur Modellierung der primären Leitungsparameter wurde das sogenannte MAR-Modell [2] ausgewählt, das den Vorteil besitzt, dass Betrag und Phase die erforderlichen Hilbert-Beziehungen aufweisen. Dies wiederum führt zu Impulsantworten, die, im Gegensatz zu anderen Modellen, keine akasalen Vorschwinger besitzen. Die formale Beschreibung des MAR-Modells ist

$$Z_S = j\omega L_\infty + R_0 \left( 0.25 + 0.75 \sqrt{1 + as(s+b)/(x+c)} \right)$$

$$Y_P = j\omega C_{1\text{MHz}} \cdot (j \cdot f_{\text{MHz}})^{-2\delta/\pi}, \quad s = j \cdot f / (447.6 \cdot R_0),$$

wobei  $Z_S$  die Längsimpedanz und  $Y_P$  die Paralleladmittanz,  $L_\infty$  den Induktivitätsbelag bei höheren Frequenzen,  $R_0$  den DC-Widerstand,  $a$  den sogenannten Proximity-Faktor und  $b, c$  Formfaktoren des Skin-Effekts kennzeichnen.

In Bild 3 sind die beiden Kabeldesigns mit einigen weiteren ähnlichen Kabeln verglichen. PE05 ist eines der 0,5 mm-SDSL/HDSL-Testkabel und basiert auf den Spezifikationen [3-5]. TP100 ist ein Kabel, das üblicherweise für VDSL-Simulationen verwendet wird (BT\_dwug [1]). ITU\_PE05 ist in ITU G.996.1 [6] spezifiziert. Der Unterschied zwischen dem ursprünglichen Kabel und dem Neudesign ist kaum zu erkennen und beträgt nur ca. 1 dB. Dies bedeutet, dass das Neudesign eine geringfügig höhere Dämpfung aufweist. Dafür erzielt man deutlich bessere Eigenschaften bei NEXT und FEXT.



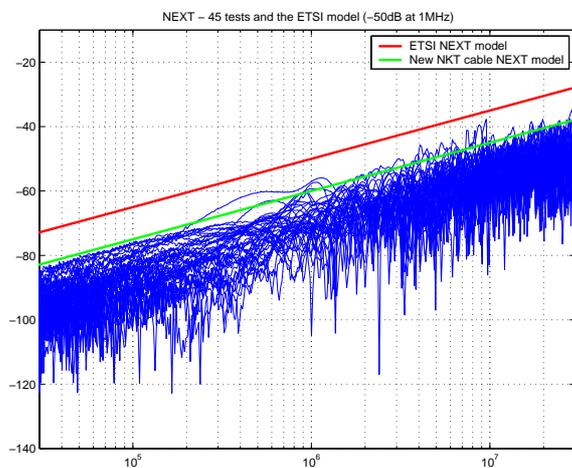
**Bild 3** Vergleich der Kabeldämpfungen bei einer Länge von 1 km

## 4.2 NEXT

NEXT wird modelliert durch

$$|H_{NEXT}(f)|^2 = 10^{\frac{K_{NEXT}}{20}} \cdot \left(\frac{f}{10^6}\right)^{1.5},$$

wobei  $K_{NEXT}$  die Kopplung bei 1 MHz (bei ETSI -50 dB) bezeichnet.  $K_{NEXT}$  gibt dabei den 99 %-Wert an.



**Bild 4** NEXT-Vergleich

In Bild 4 wurde eine ETSI-Referenz mit eingezeichnet, die auch gleichzeitig sehr gut das ursprüngliche Kabeldesign wiedergibt. Man erkennt die deutliche Verbesserung bzgl. der NEXT-Dämpfung, die um annähernd 10 dB höher liegt.

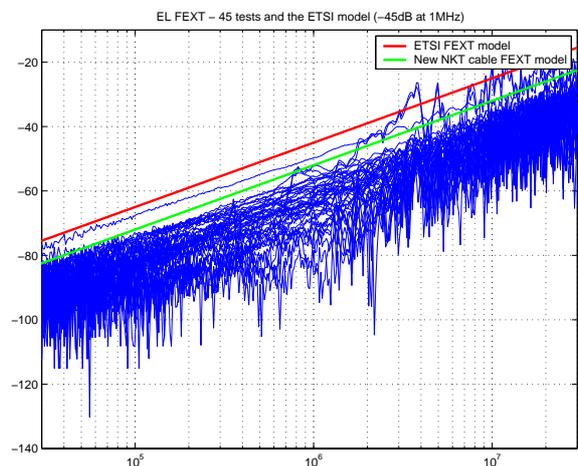
## 4.3 FEXT

FEXT wird modelliert durch [1]

$$|H_{FEXT}(f)|^2 = 10^{\frac{K_{FEXT}}{20}} \cdot \left(\frac{f}{10^6}\right)^2 \cdot l \cdot |H_{cable}(f)|^2,$$

wobei  $K_{FEXT}$  die Kopplung bei 1 MHz (bei ETSI -45 dB; 99 %-Wert) bezeichnet.  $l$  ist wieder die Kabellänge und  $|H_{cable}(f)|^2$  ist die Kabelübertragungsfunktion.

Wie beim NEXT-Vergleich wurde auch in Bild 5 eine ETSI-Referenz mit eingezeichnet, die auch gleichzeitig sehr gut das ursprüngliche Kabeldesign wiedergibt. Ein Großteil der gemessenen FEXT-Funktionen und auch das resultierende Modell zeigt einen ähnlich hohen Gewinn wie bei NEXT. Warum einzelne wenige Kurven hier etwas abweichende Eigenschaften zeigten, müsste durch erneute Messungen nochmals untersucht werden.



**Bild 5** FEXT-Vergleich

## 5 Performancevergleiche

Nach Modellierung der Kabeleigenschaften wurde das von allen führenden Standardisierungsgremien als Referenz akzeptierte Simulationsprogramm [7] verwendet, um Aussagen über die Abhängigkeiten zwischen möglichen Datenraten und Reichweiten bei ADSL zu gewinnen. Das Störfeld wurde durch Störmodell A von ITU-T [6] mit 24 Eigenstörern festgelegt. Bild 6 zeigt deutliche Performance-Gewinne beim neuen Kabeldesign, die sich besonders drastisch bei hohen Übertragungsraten auswirken.

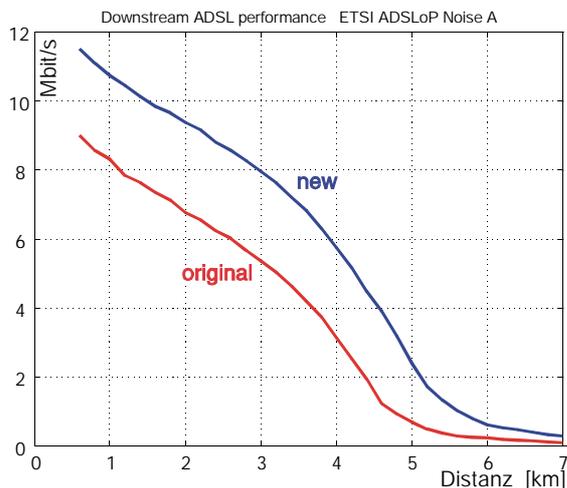
Es sollte besonders hervorgehoben werden, dass die angegebenen Leistungsdaten sich auf die 99 %-Schlechtestwerte bei NEXT/FEXT beziehen. Beim Vergleich mit Angaben anderer Hersteller sollte man

hierauf achten, da dort oft Mittelwerte dieser Nebensprechfunktionen zugrunde gelegt werden. Die folgende Tabelle zeigt die Reichweitengewinne an drei Beispielen:

Rate Down/Up	Reichweite ursprünglich	Reichweite neues Design
512/64 kbit/s	<b>5180</b>	<b>6278</b>
6400/256 kbit/s	<b>2299</b>	<b>3759</b>
8192/512 kbit/s	<b>1040</b>	<b>2840</b>

## 6 Zusammenfassung

Ausgehend von den Grundlagen der Kabelkonstruktion, der Messtechnik und Modellierung wurde gezeigt, dass durch die Kabelkonstruktion, auch ohne extreme Schirmungsmaßnahmen, deutliche Performancegewinne erzielbar sind. Beispielsweise ergibt sich bei 6,4 Mbit/s-ADSL eine Reichweitensteigerung von 2300 m auf 3760 m, eine Steigerung um über 60 %.



**Bild 6** Performance-Vergleiche zwischen neuentwickeltem und ursprünglichem Kabel

## 7 Literatur

- [1] van den Brink, R., Cable reference models for simulating metallic access networks, ETSI/STC TM6 970p02r3, 1998.
- [2] Musson, J. (Marconi S.p.A.), Maximum Likelihood Estimation of the Primary Parameters of Twisted Pair Cables ETSI/STC TM6, Madrid, Jan. 26-30, 1998 TD 8 (981t08a1)
- [3] ETSI-Dokument TS 101 135 (HDSL)
- [4] van den Brink, R., Extending the specification of SDSL testloops beyond 500 kHz, ETSI/STC TM6, Helsinki, 002t18, 2000.

- [5] ETSI Document TM6(98)08-r5, Transmission and Multiplexing (TM); Access transmission systems on metal access cables; Symmetrical single pair high bit rate Digital Subscriber Line (SDSL); Part 1: Functional Requirements, Dez. 1999, SDSL System requirements, most recent version from ETSI TM6 group.
- [6] ITU, Test procedures for Digital subscriber line (DSL) transceivers, ITU G.996.1 (Draft), Editor M. Tzannes, Okt. 1999.
- [7] Nordström T., Bengtsson, D., ftw. xDSL simulation tool, Version 2.0, 2000. Version 2.2 erhältlich unter <<http://www.xdsl.ftw.at/xdslsimu/>>.