

**Modell für Nebensprechstörungen
auf xDSL-Leitungen und dessen
praktische Umsetzung**

Alfred Voglgsang



Lehrstuhl für Integrierte Schaltungen
der Technischen Universität München

Modell für Nebensprechstörungen auf xDSL-Leitungen und dessen praktische Umsetzung

Alfred Voglsang

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der
Technischen Universität München des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. techn. P. Russer

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. I. Ruge, em.
2. Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. St. Lindenmeier
3. Univ.-Prof. Dr. sc. techn. A. Herkersdorf

Die Dissertation wurde am 17.09.2003 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 17.05.2004 angenom-
men.



Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Ingolf Ruge, der mir die Möglichkeit zur Arbeit auf dem Gebiet der xDSL-Technik gab. Durch seine Förderung hat er wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Stefan Lindenmeier danke ich für die Übernahme des Zweitreferats und die äußerst wertvollen Anregungen.

Herrn Dr.-Ing. Rudi Knorr bin ich für die Unterstützung während der Entstehung dieser Arbeit an der Fraunhofer Einrichtung für Systeme der Kommunikationstechnik zu großem Dank verpflichtet.

Ausdrücklich möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Helmut Steckenbiller bedanken, der mir stets als wertvoller Gesprächspartner zur Verfügung stand und mich während der Entstehung dieser Arbeit sehr unterstützte.

Herrn Dipl.-Ing. Holger Hutzelmann, Herrn Dipl.-Ing. Mathias Leibiger und Herrn Dipl.-Ing. Arnold Plankl danke ich für die Diskussionen bei der Klärung fachlicher Details sowie für die Durchsicht des Manuskripts.

Bedanken möchte ich mich zudem bei allen Mitarbeitern der Fraunhofer Einrichtung für Systeme der Kommunikationstechnik für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die kollegiale Zusammenarbeit.

München, im September 2003

Alfred Voglsang

Kurzfassung

Die Arbeit untersucht und analysiert die auf Telefonanschlussleitungen auftretenden Nebensprechstörungen. Für die realistische Simulation dieser Störeffekte für Tests von xDSL-Systemen und zu Analysezwecken wird ein verbessertes Nebensprechmodell entwickelt und dessen hardwareeffiziente Implementierung untersucht.

Unter dem Begriff „xDSL“ (Digital Subscriber Line) werden digitale Übertragungstechnologien zusammengefasst, mit denen Summendatenraten von mehreren Mbit/s über die Kupferzweidrahtleitungen des Telefonanschlussnetzes möglich sind. Neben den aus der Umgebung auf die Telefonanschlussleitungen eingekoppelten Störungen, beeinträchtigen die zwischen den Kupferzweidrahtleitungen auftretenden Nebensprechstörungen (Übersprechstörungen) die Datenrate und Reichweite der darüber betriebenen xDSL-Verbindungen. Nebensprechstörungen sind auf die fehlende Abschirmung der Zweidrahtleitungen zurückzuführen und nehmen mit der Anzahl der parallel an einer Telefonanschlussleitung betriebenen Übertragungssysteme zu.

Um Endkunden einen xDSL-Dienst in der dafür vorgesehenen Dienstgüte (Quality of Service) sicher zur Verfügung stellen zu können, wird die Datenrate und Reichweite von xDSL-Systemen (xDSL-Modems beim Teilnehmer beziehungsweise Line Cards in der Vermittlungsstelle) unter Störeinflüssen vorab im Labor getestet. Bei den xDSL-Systemtests generieren Störsignalgeneratoren Nebensprechstörungen nach den standardisierten Modellen von ETSI TM6 und ANSI T1E1. Darüber hinaus werden diese standardisierten Nebensprechmodelle zur Netzplanung eingesetzt. Die xDSL-Systemtests sollen gewährleisten, dass die an einer Telefonanschlussleitung betriebenen Übertragungssysteme durch weitere xDSL-Systeme nicht beeinträchtigt werden. Problematisch in diesem Zusammenhang ist, dass die auf den realen Telefonanschlussleitungen messbaren Nebensprechstörungen teilweise von den simulierten Störungen der ETSI- und ANSI-Nebensprechmodelle abweichen. Durch diese Simulationsungenauigkeiten der standardisierten Nebensprechmodelle sind die im Labor ermittelten Datenraten und Reichweiten eines xDSL-Systems auf die realen Verhältnisse nur eingeschränkt übertragbar. Ferner führen Unzulänglichkeiten bei der Simulation von Nebensprechstörungen zu ineffizient beschalteten Telefonanschlussleitungen.

Diese Problematik stellt die Motivation für diese Arbeit dar. Es sollen bestehende Nebensprechmodelle untersucht beziehungsweise neue Modelle entwickelt werden, die eine realistische Reproduktion der auf den Telefonanschlussleitungen messbaren Nebensprechstörungen ermöglichen. Eine geringe Komplexität für eine kostengünstige Implementierung, sowie die automatische Adaption des zu entwickelnden Modells auf die realen Nebensprechverhältnisse im laufenden Betrieb der Telefonanschlussleitungen, stellen die wesentlichen Randbedingungen für das neue Nebensprechmodell dar. Das Modell soll bei Labortests und zur Netzplanung gleichermaßen einsetzbar sein.

Die auf den Telefonanschlussleitungen messbaren Nebensprechstörungen sind vor allem vom Aufbau der Leitungen und den daran parallel betriebenen Übertragungssystemen abhängig. Zur Festlegung des physikalischen Umfeldes für die zu untersuchenden Nebensprechmodelle, wird deshalb die Struktur des Telekommunikationsnetzes und die darin eingesetzten Leitungen analysiert. Neben Übersprechstörungen treten Impuls- und Funkstörungen auf Telefonanschlussleitungen auf, die in einem Überblick betrach-

tet werden.

Nebensprechstörungen werden nach Nah- und Fernnebensprechstörungen differenziert. Übertragungssysteme die Nahnebensprechstörungen verursachen befinden sich am gleichen Kabelende, wie das dadurch gestörte xDSL-System. Fernnebensprechstörungen treten durch Systeme am gegenüberliegenden Kabelende auf. Die Parameter der standardisierten Nebensprechmodelle wurden nach Messungen an realen Kabelbündeln in der Weise definiert, dass 99 Prozent der untersuchten Leitungen kleiner oder maximal die mit den Modellen simulierten Nebensprechstörungen aufweisen. Dabei gehen die Standardnebensprechmodelle von vereinfachenden Annahmen hinsichtlich der physikalischen Gegebenheiten auf Telefonanschlussleitungen aus.

Die Abweichungen realer Leitungen von den idealisierten Annahmen werden in der Arbeit analytisch und messtechnisch untersucht. Dazu wird die Abhängigkeit der Nebensprechstörungen von der geometrischen Lage der störenden Übertragungssysteme in Telefonanschlussleitungen analysiert. Des Weiteren wird die Simulationsgenauigkeit der Standardnebensprechmodelle mittels exemplarischer Messungen an realen Leitungen verifiziert. Um Aussagen über die Größenordnung von parallel auftretenden Nah- und Fernnebensprechstörungen treffen zu können, werden Messungen an realen Telefonanschlussleitungen durchgeführt.

Basierend auf den physikalischen Untersuchungen wird ein neues Nebensprechmodell entwickelt, welches die auf Telefonanschlussleitungen auftretenden Nebensprecheffekte für die jeweilige Leitung individuell simuliert und reproduziert. Simulationsungenauigkeiten, die aus der Betrachtung des allgemeinen „Ein Prozent Worst-Case Falles“ der Standardnebensprechmodelle resultieren, werden durch die individuelle Simulation der im Einzelnen vorhandenen Nebensprechstörungen vermieden. Die von äquivalenten Nebensprechmodellen im Zeitbereich verwendeten Faltungsoperationen werden durch die Modellierung im Frequenzbereich mittels einfacher zu implementierende Multiplikationen ersetzt. Als Eingangsgrößen verwendet das neu entwickelte Nebensprechmodell die auf Telefonanschlussleitungen gemessenen Sende- und Störleistungsdichtespektren. Dabei adaptiert sich das vorgestellte Modell im laufenden Betrieb der Telefonanschlussleitungen auf die vorhandenen Nebensprechstörungen, so dass ein Abschalten der Sendeanlagen oder kostenaufwendige Messungen unnötig sind.

Für den Einsatz des entwickelten Nebensprechmodells bei xDSL-Systemtests und zur Netzplanung werden die Implementierungsaspekte im Detail untersucht. Es wird eine hardwareeffiziente Messschaltung auf Systemebene konzipiert, mittels der die zur Modellierung nötigen Spektren gemessen werden können. Als Messprinzipien wird das „Fast-Fourier-Prinzip“ und das „Heterodyn-Prinzip“ (Überlagerungsprinzip) betrachtet.

Durch den Einsatz des neu entwickelten Nebensprechmodells in einem flexiblen Stör-signalgenerator¹ werden xDSL-Systeme im Labor realitätsnah getestet und optimiert. Ferner ist das entwickelte Modell zur Analyse von Nebensprecheffekten einsetzbar. Durch Verwendung des vorgestellten Nebensprechmodells kann die bestehende Kabelinfrastruktur des Telekommunikationsnetzes hinsichtlich der auftretenden Störungen in einer optimierten Weise beschaltet werden.

¹Die individuelle Reproduktion der auf einer Telefonanschlussleitung messbaren Nebensprechstörungen stellt die Flexibilität des Stör-signalgenerators dar.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	iv
Kurzfassung	vii
Inhaltsverzeichnis	ix
Symbolverzeichnis	xvii
1 Einleitung	1
1.1 Test von xDSL-Systemen	4
1.2 Technische Einordnung und Struktur der Arbeit	7
2 Das Telekommunikationsnetz	9
2.1 Netzstruktur	9
2.2 Störungen für xDSL-Systeme	12
2.3 Aktuelle Störsignalgeneratoren	14
2.4 Zusammenfassung	15
3 Nebensprechen auf xDSL-Leitungen	17
3.1 Aufbau von Telefonanschlussleitungen	17
3.2 Nahnebensprechen (NEXT)	20
3.2.1 Nahnebensprechmodell für einen Einzelstörer	21
3.2.2 NEXT-Modelle für mehrere NEXT-Störer	26
3.2.3 Untersuchung der Standard-Nahnebensprechmodelle	37
3.3 Fernnebensprechen (FEXT)	54
3.3.1 Fernnebensprechmodell für Einzelstörer	55
3.3.2 FEXT-Modelle für mehrere FEXT-Störer	57
3.3.3 FEXT-Messungen	60
3.4 Zusammenfassung	67
4 Verbessertes Nahnebensprechmodell	69
4.1 Einführung	69
4.2 Multivariantes Regressionsmodell	70
4.3 Nicht lineares Regressionsmodell	77
4.4 Lineares Regressionsmodell	81
4.5 Simulationsergebnisse	84
4.6 Diskussion und Bewertung des modifizierten Nahnebensprechmodells	91
4.7 Zusammenfassung	93

5	Systemimplementierung und Einsatzbereiche des verbesserten Nebensprechmodells	95
5.1	Einführung	95
5.2	Messsystem	96
5.2.1	Messschaltung nach dem FFT-Prinzip	96
5.2.2	Messschaltung nach dem Heterodyn-Prinzip	97
5.3	Einsatzszenario	105
5.3.1	Flexibler Störsignalgenerator	106
5.3.2	Analyse von Nebensprechstörungen	106
5.4	Zusammenfassung	107
6	Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick	109
A	Implementierte xDSL-Störmodelle	117
B	Leistungsdichtespektren	119
B.1	ISDN-Leistungsdichtespektrum	119
B.2	HDSL-Leistungsdichtespektrum	119
B.3	Downstream ADSL-Leistungsdichtespektrum	120
B.4	Upstream ADSL-Leistungsdichtespektrum	121
C	Leitungscharakteristik	123

Abbildungsverzeichnis

1.1	Bandbreiten der Zugangstechnologien	3
1.2	Zuwachs an xDSL-Anschlüssen im Jahr 2002	3
1.3	Blockschaltbild des Messaufbaus für die Untersuchung der Standardkonformität von xDSL-Systemen im Labor	4
2.1	Struktur des Telekommunikationsnetzes	10
2.2	Struktur des deutschen Zugangsnetzes	11
2.3	Störungen für xDSL-Systeme	12
3.1	Prinzip der Vierer- und Paarverseilung im Querschnitt	18
3.2	50-paariges, viererverseiltes Telefonanschlusskabel	18
3.3	Induktive und kapazitive Kopplungen zweier Leitungspaare	19
3.4	Prinzip des Nahnebensprechens zwischen zwei Kupferdoppeladern	21
3.5	Zweiter-Ersatzschaltbild eines differentiellen Leitungsstücks	22
3.6	NEXT-Ersatzschaltbild bei N störenden Übertragungssystemen im Kabelbündel	27
3.7	NEXT-Kopplungsfunktion nach ANSI T1.413 in Abhängigkeit von der Störeranzahl N und der Frequenz f	30
3.8	Spezifiziertes Leistungsdichteprofil für (fremd-)induzierte Störungen (alien noise) auf der Seite des Endkunden (NT)	33
3.9	Standardisierte Leistungsdichteprofile für (fremd-)induzierte NEXT-Störungen (alien noise) auf der Seite der Vermittlungsstelle (LT)	34
3.10	Nahnebensprechübertragungsfunktion nach Unger für $N = 1, 10, 20$ und 49 Störer	36
3.11	NEXT-Übertragungsfunktionen nach ANSI T1.413 und Unger für $N = 10$ und 49 Störer	36
3.12	Testnetz zur Untersuchung von Nebensprecheffekten und dem Verhalten von xDSL-Systemen in realen Kabelbündeln	37
3.13	Leitungssegmente des Testnetzes	38
3.14	Messaufbau zur Bestimmung der NEXT-Kopplungsfunktionen	39
3.15	NEXT-Kopplungsfunktionen im ersten Grundbündel bei einer Leitungslänge von 300 m	40
3.16	Relative Häufigkeit der Betragsdifferenz zwischen den im gleichen und in benachbarten Sternvierern gemessenen Nahnebensprechkopplungsfunktionen über der Frequenz	41

3.17	Relative Häufigkeit der mittleren Betragsdifferenz zwischen den im gleichen und in benachbarten Sternvierern gemessenen Nahnebensprechkopplungsfunktionen bei einer Leitungslänge von 300 m und einem Leiterdurchmesser von 0,4 mm	41
3.18	Gemessene NEXT-Kopplungsfunktion in störrarmer Umgebung in Relation zur Messung im Labor	43
3.19	$ H_{sum}(f) ^2$ in Relation zur gemessenen Funktion $ H_{NEXT,21}(f) ^2$	45
3.20	NEXT-Kopplungen zwischen dem ersten und zweiten Grundbündel	46
3.21	Power-Sum NEXT-Dämpfungen in einem Grundbündel bei einer Leitungslänge von 300 m	47
3.22	Approximierte Power-Sum NEXT-Dämpfungen in Relation zur NEXT-Dämpfung des ETSI Nahnebensprechmodells bei einer Leitungslänge von 300 m	48
3.23	Nebensprechstörung auf einer Doppelader bei 50% Belegungsichte und ohne SHDSL-System im Grundbündel	50
3.24	Nebensprechleistungsichte in Abhängigkeit der Belegungsichte von SHDSL-Systemen	51
3.25	Prinzip des Fernnebensprechens zwischen zwei Kupferdoppeladern	54
3.26	Systemtheoretisches Blockschaltbild des Fernnebensprechens auf ungeschirmten Kupferdoppeladern	57
3.27	Messaufbau zur Bestimmung der FEXT-Kopplungsfunktionen eines Kabelbündels	61
3.28	FEXT-Kopplungsfunktionen im ersten Grundbündel bei einer Leitungslänge von 2550 m	62
3.29	Abhängigkeit der FEXT-Kopplungsfunktion $ H_{FEXT,21}(f) ^2$ von der Leitungslänge	63
3.30	Längenabhängigkeit der FEXT-Kopplungsfunktion $ H_{FEXT,21}(f) ^2$ bei Leitungslängen von 3800 m bis 6300 m	64
3.31	Nahnebensprechkopplungen bei einer Leitungslänge von 300 m bis 2550 m	65
3.32	Nah- und Fernnebensprechdämpfungen bei einer Leitungslänge von $l = 4300$ m	66
3.33	Gegenüberstellung des Worst-Case Falles von NEXT und FEXT bei einer Leitungslänge von $l = 4300$ m	67
4.1	Blockschaltbild des entwickelten Nahnebensprechmodells im Frequenzbereich für ein gestörtes Leitungspaar	70
4.2	Gemessene und simulierte Nebensprechstörleistungsichte bei vier SHDSL-Systemen in einem Grundbündel	74
4.3	Gemessener und approximierter quadratischer Betrag von $H_{21}(f)$	75
4.4	Gemessener und approximierter quadratischer Betrag von $H_{41}(f)$	75
4.5	Gemessene Sendeleistungsdichten von SHDSL-Systemen in einem Grundbündel	78
4.6	Häufigkeit der approximierten Steigungen pro Dekade über der Frequenz bei 490 untersuchten Nahnebensprechbeziehungen	79
4.7	Häufigkeit der approximierten Steigungen pro Dekade über der Frequenz bei 1000 untersuchten Nahnebensprechbeziehungen	80
4.8	Gemessene und geschätzte NEXT-Kopplungsfunktion $ H_{21}(f) ^2$	85
4.9	Gemessene und geschätzte NEXT-Kopplungsfunktion $ H_{41}(f) ^2$	86

4.10	Gemessene und geschätzte NEXT-Kopplungsfunktion $ H_{91}(f) ^2$	86
4.11	Gemessene und berechnete NEXT-Kopplungsfunktion $ H_{21}(f) ^2$ in Relation zur ETSI-Kopplungsfunktion	88
4.12	Gemessene und berechnete NEXT-Kopplungsfunktion $ H_{91}(f) ^2$ in Relation zur ETSI-Kopplungsfunktion	88
4.13	Nahnebensprechstörleistung auf der Referenzleitung mit dem ETSI- und dem entwickelten Nahnebensprechmodell	89
4.14	Häufigkeit der Kreuzkorrelationskoeffizienten der Approximation in Relation zum Nahnebensprechmodell nach ETSI	90
5.1	FFT-Analysator zur Messung der Signal- und Nahnebensprechstörspetren	97
5.2	Messschaltung für das entwickelte Nebensprechmodell nach dem Überlagerungsprinzip (Heterodyn-Prinzip)	98
5.3	Anwendung des Prinzips der hohen Zwischenfrequenz für die Messschaltung des modifizierten Nahnebensprechmodells	100
5.4	Prinzip des Hüllkurvendetektors	102
5.5	ZF-Signalverarbeitung und Speicherstruktur	103
5.6	Anwendungsszenario für das entwickelte Nebensprechmodell	105

Tabellenverzeichnis

1.1	Digital Subscriber Line-Technologien im Überblick	2
3.1	NEXT-Kopplungsfunktion des Unger-Modells für $f = 20$ kHz	35
3.2	Geradengleichungen der approximierten Power-Sum NEXT-Dämpfungen und mittlere Abweichungen vom ETSI Nahnebensprechmodell	49
3.3	Betrag von $ H_{NEXT,21}(f) ^2$ und $ H_{FEXT,21}(f) ^2$ bei $f = 1$ MHz	65
4.1	Parameter der standardisierten Sendespektren von SHDSL-Systemen nach dem ITU-T Standard G.991.2 Annex B	73
4.2	Berechnete Kopplungskonstanten und Korrelationskoeffizienten	87
5.1	Bandbreiten der im deutschen Anschlussnetz betriebenen Analog-, ISDN-, ADSL-, HDSL-, SHDSL-Systeme	99
A.1	In Störsignalgeneratoren implementierte xDSL-Störmodelle	117

Symbolverzeichnis

Abkürzungen

ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
ADSL.lite	Universal Asymmetric Digital Subscriber Line
A-D-Wandler	Analog-Digital-Wandler
AM	Amplituden Modulation
ANSI	American National Standards Institute
BER	Bit Error Rate, Bitfehlerhäufigkeit
BERT	Bit Error Rate Tester
BVSt	Bereichsvermittlungsstelle
CO	Central Office; Vermittlungsstelle
CPE	Customer Premises Equipment (Endgerät beim Anwender)
DA	(Kupfer-)Doppelader
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DSP	Digitaler Signalprozessor
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EVz	Endverzweiger
EWSD	Elektronisches Wählsystem Digital
FEXT	Far-End Crosstalk, Fernnebensprechen
FFT	Fast Fourier-Transformation
FIFO	First In First Out
FSAN	Full Service Access Network
FTTH	Fiber To The Home
HDB3	Ternärer (3-stufiger) Leitungscode
HDSL	High bit rate Digital Subscriber Line
HVt	Hauptverteiler

ISDN	Integrated Services Digital Network
ITU	International Telecommunications Union
KVz	Kabelverzweiger
LT	Line Termination
LWL	Lichtwellenleiter
NEXT	Near-End Crosstalk, Nahnebensprechen
NT	Network Termination
OAsl	Ortsanschlussleitung(en)
OVSt	Ortsvermittlungsstelle
PBO	Power back off
PLL	Phase-Locked Loop
POTS	Plain Old Telephones
PSD	Power Spectral Density
PS-Modell	Ein Prozent Worst-Case Power-Sum Modell
SHDSL	Symmetric high bit rate Digital Subscriber Line
S-Parameter	Streuparameter
TDM	Time Division Multiplex
TK-Netz	Telekommunikations-, Fernmeldenetz
VDSL	Very high bit rate Digital Subscriber Line
xDSL	Digital Subscriber Line Technologie

Symbole

Variablen mit römischen Buchstaben

A	Anzahl der Frequenz-Messpunkte
$B_{3\text{dB}}$	3dB-Bandbreite
$B_{60\text{dB}}$	60dB-Bandbreite
$B_{R,ZF}$	Äquivalente Rauschbandbreite des ZF-Filters

C_{ij}	parasitäre Kapazität zwischen den Leitungspaaren i und j
f	Frequenz
f_0	ETSI-Normierungsfrequenz von 1 MHz
f_{3dB}	3dB-Grenzfrequenz des Ein-/Ausgangsfilters eines xDSL-Systems
f_j	Frequenz-Messpunkt
f_{int}	Intersection frequency
f_E	Signalfrequenz am Eingang der Messschaltung
$f_{E,max}$	maximale Eingangsfrequenz der Messschaltung
$f_{E,min}$	minimale Eingangsfrequenz der Messschaltung
f_{LO}	Lokaloszillatorfrequenz
$f_{LO,min}$	minimale Lokaloszillatorfrequenz
$f_{LO,max}$	maximale Lokaloszillatorfrequenz
f_{ZF}	Zwischenfrequenz
H	Kopplungsmatrix
$H_i(f)$	individuelle Nahnebensprechkopplung
$H_{FEXT,ij}(f)$	Fernebensprechübertragungsfunktion
$ H_{FEXT,ij}(f) ^2$	Fernebensprechkopplungsfunktion
$ \overline{H}_{FEXT}(f) ^2$	gemittelte FEXT-Kopplungsfunktion
$H_{NEXT,ij}(f)$	Nahnebensprechübertragungsfunktion
$ H_{NEXT,ij}(f) ^2$	Nahnebensprechkopplungsfunktion
$ \overline{H}_{NEXT}(f) ^2$	gemittelte NEXT-Kopplungsfunktion
$H_{ZF}(f)$	Spannungsübertragungsfunktion des Zwischenfrequenzfilters
I_i	Strom auf der Zweidrahtleitung i
K_{NEXT}	Kopplungskonstante ANSI-/ETSI-Modell
K_{FEXT}	FEXT-Kopplungskonstante ANSI-/ETSI-Modell
k_f	Fernebensprechkopplungskonstante
\overline{k}_f	gemittelte Fernnebensprechkopplungskonstante
k_i	individuelle Kopplungskonstante
k_n	Nahnebensprechkopplungskonstante
\overline{k}_n	gemittelte Nahnebensprechkopplungskonstante
k	Kopplungsvektor
$\hat{\mathbf{k}}$	geschätzter Kopplungsvektor
L	induktiver Leitungsbelag

L_0	Bezugsleitungslänge des ETSI-Nebensprechmodells
L_{ij}	Induktivität zwischen den Leitungspaaren i und j
l	Leitungslänge
N	Anzahl der Nebensprechstörer im Kabelbündel
R	Ohmscher Leitungsbelag
$U_A(t)$	Ausgangsspannung des Hüllkurvendetektors im Zeitbereich
$U_{NEXT,i}(f, l)$	Nahnebensprechspannung auf dem Adernpaar i
U_{p_i}	Signalspannung auf dem Leitungspaar i
$U_{ZF}(t)$	Eingangsspannung des Hüllkurvendetektors im Zeitbereich
S	Signalmatrix
$S_i(f)$	störende Sendeleistungsdichte auf dem Leitungspaar i
$S_{FEXT,i}(f)$	Fernebensprechstörleistungsdichte auf dem Leitungspaar i
S_m	gemessenes Leistungsdichtespektrum
$S_{NEXT,i}(f)$	Nahnebensprechstörleistungsdichte auf dem Leitungspaar i
$S_{Störer,i}(f)$	Störspektrum auf dem Leitungspaar i
$S_{XS}^{K_n}(f)$	selbstinduzierte Sendeleistungsdichte
$S_{XA}^{K_n}(f)$	fremdinduzierte Sendeleistungsdichte
$s_{T0}(f, l)$	Übertragungsfunktion der Zweidrahtleitung nach ETSI
$T_i(f, x)$	Spannungs-Transferfunktion des Leitungspaares i
x_i	individueller Exponent
$X_{ij}(f, x)$	Nebensprechkopplung zwischen den Leitungspaaren i und j
$XA.C.A$	fremdinduzierte Nebensprechstörumgebung A, Vermittlungsstelle
$XA.C.B$	fremdinduzierte Nebensprechstörumgebung B, Vermittlungsstelle
$XA.C.C$	fremdinduzierte Nebensprechstörumgebung C, Vermittlungsstelle
$XA.R.A$	fremdinduzierte Nebensprechstörumgebung A, Kundenseite
$XA.R.B$	fremdinduzierte Nebensprechstörumgebung B, Kundenseite
$XA.R.C$	fremdinduzierte Nebensprechstörumgebung C, Kundenseite
Z_i	Eingangsimpedanz eines xDSL-Systems auf dem Leitungspaar i
Z_L	Lastimpedanz

Variablen mit griechischen Buchstaben

$\alpha(f)$	Leitungsdämpfung
$\beta(f)$	Phasendrehung
ϵ_j	Approximationsfehler, (Residuum)
ϵ'	Fehlervektor
$\gamma(f)$	Ausbreitungskonstante
ρ	Korrelationskoeffizient

1 Einleitung

Wissen kommt im gesellschaftlichen Produktionsprozess eine wichtige Rolle zu. Nach dem Philosophen André Gorz ist Wissen die entscheidende Produktionskraft die dazu bestimmt ist, „einfache manuelle Arbeit als auch Finanz- und Sachkapital zu subalternen Produktivkräften herabzusetzen“ [1]. Der Zugang zu diesem Wissen wird der heutigen Informationsgesellschaft unter anderem durch den Einsatz von Breitbandtechnologien ermöglicht. Dabei werden unter dem Begriff „Breitband“ nach der Definition der Deutschen Breitbandinitiative die Summe aller Technologien zusammengefasst, deren Einsatz die Übermittlung datenintensiver Medien- und Kommunikationsangebote in einer für die jeweilige Anwendung angemessenen Geschwindigkeit gestatten [2]. Die sich aus diesen Technologien ergebenden Möglichkeiten sind für Unternehmen unverzichtbar wenn es darum geht, auf den globalen Märkten präsent zu sein. Aber auch für private Nutzer ergibt sich aus der Breitbandkommunikation ein weites Feld von Anwendungen. Das elektronische Einkaufen (e-Business), Kommunikation und Unterhaltung stellen nur einige Einsatzszenarien dafür dar.

Sind in Ballungsräumen breitbandige Internetzugänge weitestgehend gegeben, so sind in strukturschwachen Räumen die Zugänge zur Breitbandkommunikation weiter auszubauen [2]. Für die Breitbandkommunikation stehen aus technischer Sicht prinzipiell

- Funk (Richtfunk, Mobilfunk)
- Satellitenkommunikation
- Glasfaser (Lichtwellenleiter, LWL)
- Drahtgebundene Übertragungswege

als Infrastruktur zur Verfügung. Die drahtlosen Teilnehmeranschlussleitungen (Wireless Local Loop, WLL) mittels Funktechnik sind eine Alternative zu den leitungsgebundenen Übertragungswegen. Bei der Verwendung von Richtfunk muss allerdings zwischen Quelle und Senke eine Sichtverbindung bestehen.

Satelliten werden für die Breitbandkommunikation vor allem an Orten genutzt, an denen auf Grund ihrer geographischen Lage über leitungsgebundene Datenwege keine schnelle Internetverbindung zur Verfügung gestellt werden kann. Dabei werden zurzeit allerdings nur die Daten zum Kunden via Satellit übertragen. Das Senden der Daten vom Kunden erfolgt weiterhin über einen herkömmlichen ISDN- oder analogen Telefonanschluss [11].

Werden Großkunden und Unternehmen vorwiegend über Glasfaserverbindungen angeschlossen, so ist die Anbindung von Privatkunden über Lichtwellenleiter (Fiber To The Home, FTTH) aus wirtschaftlichen Aspekten derzeit uneffizient [56]. Auf Grund

der flächendeckenden und kostengünstigen Verfügbarkeit, nutzen private Endkunden das Telefonanschlussnetz aus Kupferdoppeladern zur Breitbandkommunikation. Die ITU-T (International Telecommunication Union) geht davon aus, dass weltweit knapp eine Milliarde Telefonanschlussleitungen aus Kupfer im Einsatz sind [5]. Nach Expertenangaben können ca. 60 bis 80 Prozent dieser Leitungen für die Breitbandkommunikation genutzt werden [7], [6]. Soll über die Kupferleitungen eine schnelle Verbindung ins Internet realisiert werden, so ist ISDN mit 64 kbit/s pro B-Kanal (Bearer Channel) als Zugangstechnologie nicht mehr aktueller Stand der Technik. Durch den Einsatz der xDSL-Technik (Digital Subscriber Line) können Datenraten von mehreren Mbit/s über das Zugangsnetz erreicht werden [56]. Unter dem (Ober-)Begriff „xDSL“ werden verschiedene digitale Übertragungstechnologien zusammengefasst, die in einem Überblick in Tabelle 1.1 dargestellt sind.

xDSL-Technologie	Downstream (max. Nettorate)	Upstream (max. Nettorate)	Reichweite	Hauptanwendung
HDSL (High bit rate DSL)	784 kbit/s pro Doppelader	784 kbit/s pro Doppelader	5 km ohne Regeneratoren	Business: T1/E1, WAN
SHDSL (Symmetric HDSL)	192 kbit/s- 2312 kbit/s	192 kbit/s- 2312 kbit/s	3 bis 9 km (je nach Bitrate)	Business: T1/E1 WAN, LAN, Video- konferenzen, E-Com.
ADSL (Asymmetric DSL)	8 Mbit/s	640 kbit/s	2.5 km - 5 km (je nach Bitrate)	Privat+ Business: remote LAN, Video- konferenzen, VoDSL
ADSL.lite (G.lite, Universal DSL, Consumer DSL)	1.5 Mbit/s	640 kbit/s	2.5 km - 7.6 km (je nach Bitrate)	Privat: interaktives Internet, Video-On-Demand
VDSL (Very high bit rate - DSL)	bis 52 Mbit/s	bis 25 Mbit/s	300 m - 1.5 km (je nach Bitrate)	Business: LAN Erweiterung, Videokonf., VoDSL

Tabelle 1.1: Digital Subscriber Line-Technologien im Überblick

Nach Tabelle 1.1 besitzen die xDSL-Techniken zum Teil unterschiedliche (asymmetrische) Datenraten vom und zum Endkunden¹. In Abbildung 1.1 sind die mittels der xDSL-Technik erreichbaren Bandbreiten in Relation zu anderen Zugangstechnologien dargestellt.

¹In der xDSL-Fachliteratur wird mit „Downstream“ die Datenübertragung von der Vermittlungsstelle zum Endkunden und mit „Upstream“ der Datentransfer in Richtung vom Kunden zur Vermittlungsstelle bezeichnet.

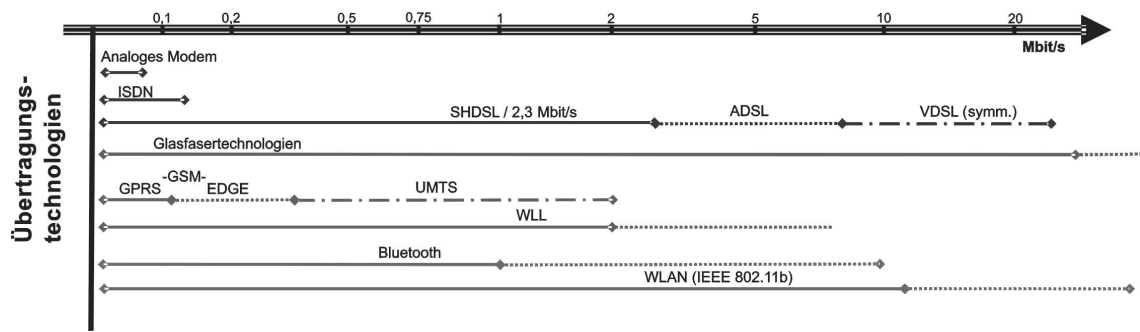


Abbildung 1.1: Bandbreiten der Zugangstechnologien

Mittels der xDSL-Technik können die Kupferleitungen bandbreiteneffizienter als mit analogen Übertragungsverfahren genutzt werden. Dazu werden bei den xDSL-Technologien teilweise verschiedene Kodierungs- und Übertragungsverfahren eingesetzt. Die xDSL-Grundlagenliteratur, wie beispielsweise [32], [55], beschreibt die diversen xDSL-Technologien im Detail.

Nach einer im März 2003 vom DSL-Forum veröffentlichten Studie nutzen gegenwärtig weltweit 35,9 Millionen Anwender die xDSL-Technik [3]. Die Zahl an xDSL-Anschlüssen nahm allein im Jahr 2002 um 90,8 Prozent zu, wobei Japan momentan das Land mit den größten xDSL-Wachstumsraten ist. In Deutschland konnte 2002 ein Anstieg um 1,37 Millionen xDSL-Anschlüsse verzeichnet werden (siehe Abbildung 1.2).

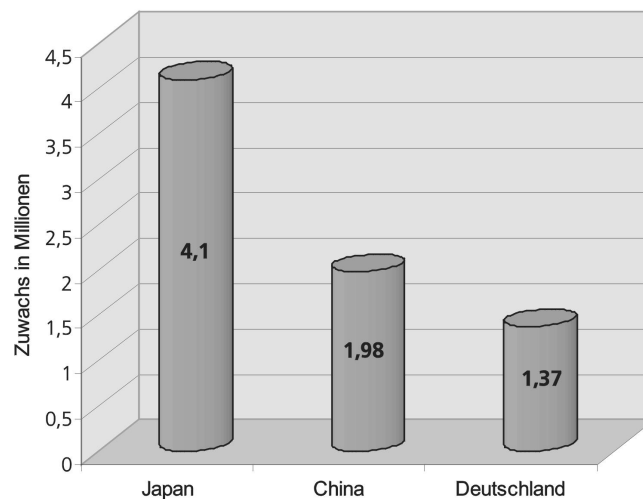


Abbildung 1.2: Zuwachs an xDSL-Anschlüssen im Jahr 2002

Die zunehmenden xDSL-Anschlusszahlen und die Koexistenz unterschiedlicher Übertragungstechnologien im Telefonanschlussnetz stellen hohe Anforderungen an die Netzinfrastruktur und die Leistungsfähigkeit der xDSL-Systeme (xDSL-Modem bzw. Line Card in einem DSLAM). Zukünftig wird nicht nur die Präsenz eines Internetanschlusses

ses, sondern auch dessen Qualität über die Teilnahme von Endkunden an der Informationsgesellschaft entscheiden [2].

Die Datenrate und Reichweite einer xDSL-Verbindung wird durch die Eignung der Anschlussleitung in Verbindung mit der Leistungsfähigkeit des verwendeten xDSL-Systems bestimmt [32], [56]. Um die sichere Kommunikation von Endgeräten unterschiedlicher Hersteller mit einem DSLAM in der geforderten Güte zu gewährleisten, definiert der Netzbetreiber entsprechende Richtlinien. Die 1TR112 (ehemals U-R2) der Deutschen Telekom AG (DTAG) beschreibt die Voraussetzungen, die ein ADSL-System für den Einsatz im Anschlussnetz der DTAG zu erfüllen hat. Die Interoperabilität verschiedener xDSL-Systeme und die Einhaltung der geforderten physikalischen Grenzwerte wird in den Entwicklungslabors der Systemhersteller, der Netzbetreiber oder in unabhängigen Labors (Independent Testing Laboratories, ITLs) geprüft. Für diese Untersuchungen wurden von den Standardisierungsorganisationen ETSI TM6, ANSI T1E1, ITU-T und dem Industriekonsortium DSL-Forum Szenarien für den Test von xDSL-Systemen definiert [43].

1.1 Test von xDSL-Systemen

Die auf physikalischer Schicht (physical layer) durchzuführenden Labortests von xDSL-Systemen erfolgen nach dem in Abbildung 1.3 dargestellten Prinzip [20], [43]. Die Leitungssimulatoren bilden die Übertragungseigenschaften (Leitungsdämpfung, Impedanz, etc.) der in den xDSL-Standards definierten Testleitungen nach. Die in realen Kabelbündeln auftretenden Störungen wie Hintergrundrauschen, Nebensprechen und Impulsstörungen werden im Labor durch Störsignalgeneratoren reproduziert (siehe Abschnitt 2.3). Standardkonforme xDSL-Systeme dürfen innerhalb der vorgeschriebenen Störumgebungen auf definierten Testleitungen eine festgelegte maximale Bitfehlergrenze nicht überschreiten [27], [43].

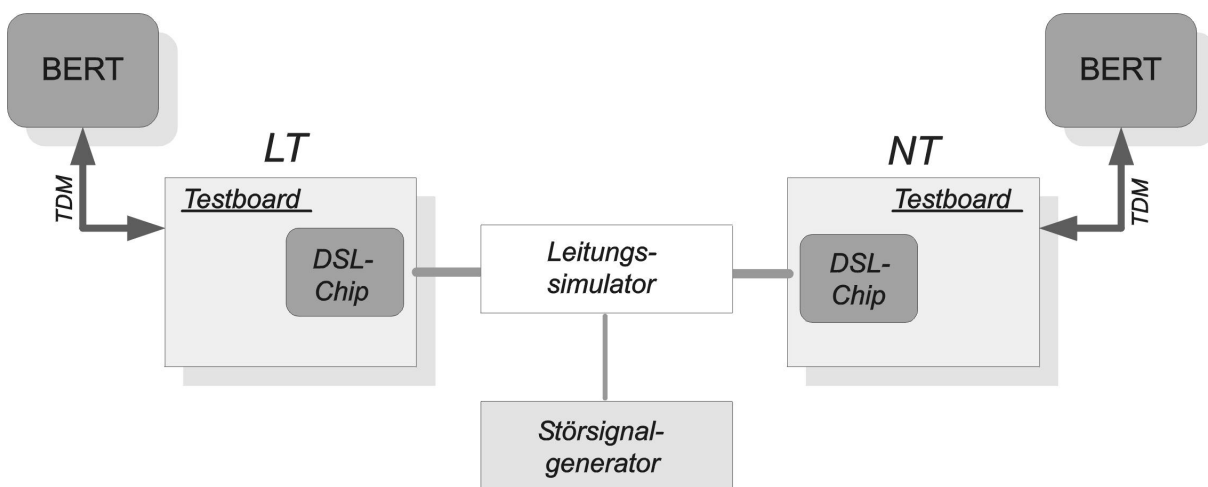


Abbildung 1.3: Blockschaltbild des Messaufbaus für die Untersuchung der Standardkonformität von xDSL-Systemen im Labor

Zur Messung der sich bei der Übertragung einstellenden Bitfehlerrate wird mittels eines Bit-Error-Rate-Testers (BERT) ein serieller Datenstrom eingespeist und am gegenüberliegenden Ende der Übertragungsstrecke bitweise analysiert.

Die zurzeit angebotenen Störsignalgeneratoren für Standardkonformitätstests von xDSL-Systemen reproduzieren Nebensprechstörungen nach den von ANSI T1E1, ETSI TM6 und ITU-T definierten Nebensprechmodellen. Die Standardnebensprechmodelle basieren auf dem „ein Prozent Worst-case Power-Sum Modell“ (siehe Kapitel 3). Dieses Modell geht von der Annahme aus, dass 99 Prozent der real verlegten Bündelkabel kleinere oder maximal die mit dem Modell simulierte Nebensprechstörungen aufweisen. Wie Forschungsergebnisse zeigen, weisen reale Kabelbündel zum Teil kleinere Nebensprechstörungen als mit dem PS-Modell simuliert auf [29], [30]. Darüber hinaus ist die Kopplungskonstante, als ein Parameter des PS-Modells, für europäische Kabel von ETSI noch nicht endgültig festgelegt². Ferner nimmt das PS-Modell an, dass an einem Großteil der Zweidrahtleitungen eines Bündelkabels Übertragungssysteme betrieben werden. Innerhalb realer Telefonbündelkabel wird gegenwärtig allerdings nur ein Teil der Zweidrahtleitungen genutzt. Trotz eines Korrekturterms für nur teilweise mit Systemen belegte Bündelkabel, kann es zu Abweichungen zwischen der durch das PS-Modell simulierten und der tatsächlich messbaren Nebensprechstörung kommen [38].

Die Diskrepanz zwischen den realen und den mit einem Störsignalgenerator simulierten Nebensprechstörungen führt zu dem Problem, dass ein einzelner xDSL-Transceiver-Chip oder ein komplettes xDSL-System in einer von der Realität abweichenden Umgebung getestet wird. Unter den tatsächlichen Störbedingungen würde das xDSL-System bei konstanter Bitfehlerrate beispielsweise eine größere Reichweite oder eine höhere Datenrate erreichen, als im Labor. Für Chip- und Systemhersteller ist jedoch die Leistungsfähigkeit der Transceiver-Bausteine, und der damit realisierten xDSL-Systeme, bei realitätsnahen Nebensprechstörungen von Interesse. Die zu pessimistische Reproduktion von Nebensprechstörungen verursacht bei der Optimierung von xDSL-Transceiver-Chips und xDSL-Systemen einen zusätzlichen Entwicklungsaufwand.

Die in einem Kabelbündel des Anschlussnetzes auftretenden Nebensprecheffekte sind, neben den beschriebenen Systemtests, auch für Netzbetreiber und Anbieter von Breitbandzugängen von Interesse. Bei der Netzplanung und der Installation neuer Kommunikationssysteme müssen im Vorfeld die im Kabelbündel auftretenden Nebensprechstörungen abgeschätzt werden. Basiert diese Abschätzung auf dem unter Umständen zu pessimistischen PS-Modell, wird von einer niedrigeren Datenrate und Reichweite ausgegangen, als diese unter den realen Störbedingungen möglich wären. Darüber hinaus können Simulationsungenauigkeiten bei der Netzplanung zu einer ineffizienten Beschaltung der bestehenden Kabelressourcen führen.

Eine Alternative zur simulativen Abschätzung der Nebensprechstörungen stellt die

²In den xDSL-Standards von ETSI sind die Nebensprech-Kopplungskonstanten des PS-Modells unter dem Status *under study*

Messung der zwischen den Doppeladernpaaren auftretenden Nebensprechbeziehungen dar. Die auf einer Zweidrahtleitung auftretende Nebensprechstörung (Störsignal) kann nur im laufenden Betrieb des Telefonbündelkabels gemessen werden [70]. Bei mehrpaarigen Kabelbündeln sind diese Messungen aufwendig, kostenintensiv und nur vom jeweiligen Netzbetreiber durchführbar. Ein alternativer Dienstleister, der im Rahmen der Neuregulierung des Anschlussnetzes ein Kabelbündel parallel mit anderen Dienstleistern nutzt, kann aufgrund des fehlenden Zugangs zum Anschlussnetz die Messungen der Nebensprechstörungen nicht durchführen. In diesem Fall sind alternative Dienstleister auf die Kooperation und die Aussagen des Netzbetreibers angewiesen. Aus Sicht des alternativen Dienstleisters wäre es wünschenswert, selbstständig Abschätzungen der erreichbaren Transferqualität über die jeweils angemieteten Übertragungsleitungen anstellen zu können [12]. Aus der Kenntnis der auf einer Kupferdoppelader vorherrschenden Störungen ist die einem Kunden über diese Leitung anbietbare Datenrate abschätzbar.

Um die im Anschlussnetz auftretenden Nebensprechstörungen möglichst exakt reproduzieren und analysieren zu können ist ein, im Vergleich zum bisherigen ein Prozent Worst-Case Power-Sum Modell der xDSL-Standards, optimiertes Nebensprechmodell notwendig. Für den praktischen und effizienten Einsatz des modifizierten Modells müssen die folgenden Randbedingungen eingehalten werden:

- Selbstständige Bestimmung der individuellen Nebensprecheffekte im laufenden Betrieb des Telefonanschlusskabels (Telefonkabelbündels) ohne Personaleinsatz vor Ort
- Berücksichtigung der spezifisch unterschiedlichen physikalischen und geometrischen Kabeleigenschaften und Einflussfaktoren, die für die Nebensprecheffekte verantwortlich sind
- Automatische Messung der individuellen Nebensprechstörungen an einem Kabelende („single side tests“)
- Spezifische Charakterisierung und Reproduktion der Nebensprechstörungen realer Telefonkabelbündel für Test- und Analysezwecke
- Niedrige Komplexität für eine kostengünstige Realisierung des entwickelten Nebensprechmodells.

Für eine einfache und damit kostengünstige Implementierung muss das Nebensprechmodell idealerweise von niedriger mathematischer Komplexität sein. In diesem Fall können die Modellparameter mit einem geringen Rechenaufwand automatisch bestimmt werden.

1.2 Technische Einordnung und Struktur der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, die auf Telefonanschlussleitungen auftretenden Nebensprechstörungen und die Simulationsgenauigkeit der standardisierten Nebensprechmodelle zu untersuchen. Für die realistische Reproduktion von Nebensprechstörungen ist ein verbessertes Nebensprechmodell von niedriger Komplexität zu entwickeln. Ferner sind die Implementierungsaspekte des entwickelten Modells zu betrachten.

Zur Definition des Einsatzszenarios für die zu untersuchenden Nebensprechmodelle, wird in Kapitel 2.1 die Struktur des in Deutschland realisierten Telekommunikationsnetzes diskutiert. Dabei wird besonders der Aufbau des Zugangs- oder Telefonanschlussnetzes betrachtet, in dem xDSL-Systeme eingesetzt werden. Die Datenrate einer xDSL-Verbindung wird unter anderem durch die auf den Kupferkabeln des Telefonanschlussnetzes auftretenden Störungen beeinflusst. Die für den Einsatz von xDSL-Systemen relevanten Störeffekte und deren Ursachen werden in diesem Kapitel erläutert. Die technischen Möglichkeiten der bei xDSL-Systemtests eingesetzten Störsignalgeneratoren werden am Ende dieses Kapitels dargestellt.

Den Schwerpunkt des dritten Kapitels bildet die Untersuchung der in Kabelbündeln des Telefonanschlussnetzes auftretenden Nebensprechstörungen und deren Modellierung durch die Nebensprechmodelle der xDSL-Standards von ETSI TM6, ANSI T1E1 und ITU-T. Bei der Analyse und der Simulation werden Nebensprechstörungen nach Nah- und Fernnebensprechstörungen differenziert. Die Nah- und Fernnebensprechmodelle der xDSL-Standards für einen einzelnen wie auch für den Fall von mehreren Nebensprechstörern im Kabelbündel werden abgeleitet und durch Messungen in einem Testnetz analysiert. In diesem Testnetz wurde die typische Struktur des deutschen Telefonanschlussnetzes mit dessen Vermittlungseinrichtungen und typischen Kabelbündeln nachgebildet. Die Ortsabhängigkeit der in einem Grundbündel auftretenden Nahnebensprechkopplungen wird ebenso untersucht, wie die Nahnebensprechkopplungen zwischen benachbarten Grundbündeln. Die gemessenen Nahnebensprechbeziehungen werden in Relation zu den Standardnebensprechmodellen gesetzt und die sich ergebenden Abweichungen diskutiert. Neben der Untersuchung der Nahnebensprechkopplungen werden die auf den Zweidrahtleitungen induzierten Störspektren in Abhängigkeit von den im Kabelbündel vorhandenen Übertragungssystemen messtechnisch untersucht und im Hinblick der für den praktischen Einsatz von xDSL-Systemen relevanten Aspekte beleuchtet.

Die in Telefonanschlussleitungen auftretenden Fernnebensprechstörungen sind von der Leitungslänge der Zweidrahtleitungen abhängig. Diese Längenabhängigkeit wird durch Messungen analysiert. Die qualitative Gegenüberstellung und Diskussion der in einem Kabelbündel auftretenden Nah- und Fernnebensprechkopplungen schließt das dritte Kapitel ab.

Im vierten Kapitel wird ein gegenüber den bisherigen Standardmodellen modifiziertes Modell zur Analyse und Reproduktion von Nebensprechstörungen für xDSL-Kanäle vorgeschlagen. Basierend auf systemtheoretischen Betrachtungen wird der Ansatz für

das im Frequenzbereich arbeitende Modell entwickelt. Die Untersuchungsergebnisse und theoretischen Betrachtungen der vorangegangenen Kapitel werden dabei für die Entwicklung des Modells genutzt.

Es wird gezeigt, wie mit dem in diesem Kapitel vorgeschlagenen Nebensprechmodell die individuellen Nebensprechkopplungsfunktionen eines mehrpaarigen Kabelbündels approximiert werden können. Zur Bestimmung der Modellparameter werden Messungen an realen Kabelbündeln herangezogen. Mittels der Messergebnisse und der mit dem hier vorgeschlagenen Nebensprechmodell bestimmten Nebensprechkopplungen sind die in einem Kabelbündel auftretenden Nebensprechstörungen für xDSL-Systemtests individuell reproduzierbar, was an Simulationsbeispielen gezeigt wird. Der Vergleich des hier vorgeschlagenen Nebensprechmodells mit einem bereits vorhandenen im Zeitbereich arbeitenden Verfahren wird am Ende dieses Kapitels behandelt.

Kapitel 5 beschreibt ein mögliches Systemkonzept für die Realisierung einer Schaltung zur Messung der auf den Zweidrahtleitungen eines Kabelbündels auftretenden Sende- und Nebensprechspektren. Die mit dieser Schaltung erhaltenen Messergebnisse werden von dem modifizierten Nebensprechmodell genutzt, um die zwischen den Zweidrahtleitungen eines Kabelbündels auftretenden Nebensprechkopplungen analytisch zu bestimmen. Die möglichen Einsatzszenarien des entwickelten Nebensprechmodells und der spezifizierten Messschaltung werden am Kapitelende diskutiert.

Die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit und ein Ausblick auf weiterführende Arbeiten sind in Kapitel 6 dargestellt.

2 Das Telekommunikationsnetz

In diesem Kapitel wird die Struktur des in Deutschland realisierten Telekommunikationsnetzes (TK-Netz) beschrieben. In Abschnitt 2.2 werden die im TK-Netz auftretenden Störungen für xDSL-Systeme betrachtet. Störsignalgeneratoren, mit denen diese Störungen bei xDSL-Systemtests im Labor reproduziert werden, sind im Abschnitt 2.3 dargestellt. Die wesentlichen Inhalte dieses Kapitels fasst Abschnitt 2.4 zusammen.

2.1 Netzstruktur

Das Telekommunikationsnetz ermöglicht den Nachrichtenaustausch zwischen den daran angeschlossenen Endteilnehmern. Die Aufgabe dieses Netzes besteht in der Vermittlung und dem Transport von Nachrichten [76]. Die Nachrichtenvermittlung zwischen den Quellen und den Senken erfolgt durch die im Telekommunikationsnetz eingesetzte Vermittlungstechnik. Der Transport der Nachrichten wird durch die Übertragungstechnik realisiert.

Das heutige Telekommunikationsnetz ist aus dem Übertragungs-, Vermittlungs- und Zugangsnetz aufgebaut [59]. Abbildung 2.1 zeigt die Struktur des Telekommunikationsnetzes der BRD mit dessen Vermittlungseinrichtungen und (Übertragungs-)Leitungen. Über das dargestellte Netz findet der Transport von Daten und Sprache über gezielte Informationswege statt. Das jeweilige (Teil-)Netz umfasst die Übertragungswege und die Vermittlungseinrichtungen.

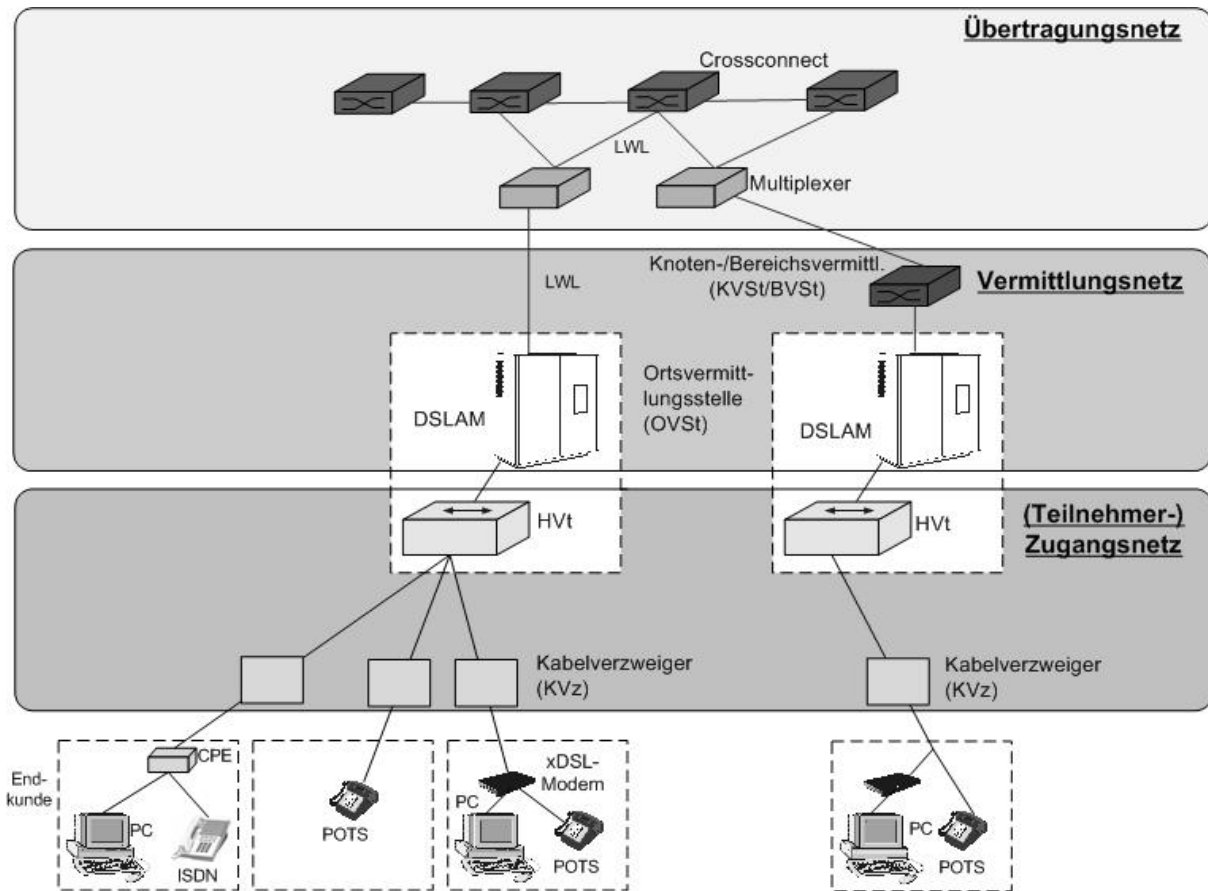


Abbildung 2.1: Struktur des Telekommunikationsnetzes

Die Ortsvermittlungsstellen (OVSt) sind über Verbindungskabel (Trunks) mit den Knoten- bzw. Bereichsvermittlungsstellen (KVSt/BVSt, Backbone) verbunden. Diese Vermittlungsstellen stellen mit den Verbindungskabeln das Vermittlungsnetz dar. Eine Verbindung ist im Vermittlungsnetz nur für die Dauer des Informationstransports aktiv, wobei der Verbindungsaufbau automatisch erfolgt [60]. Über welche Übertragungsstrecken eine bestimmte Verbindung aufgebaut wird, ist von der Auslastung der Kabel und deren Verfügbarkeit abhängig.

Das Übertragungsnetz dient dem Informationstransport zwischen den Vermittlungsstellen. Multiplexer und Crossconnects werden als Vermittlungseinrichtungen im Übertragungsnetz eingesetzt. Mehrere Verkehrsströme werden von Multiplexern zu einem gemeinsamen Datenstrom zusammengefasst bzw. es wird der Datenstrom am Ziel in die einzelnen Verkehrsströme aufgeteilt. Durch das Multiplexen der Datenströme werden die Übertragungswege besser ausgenutzt [76]. Die Crossconnects lenken die Verkehrsströme im Übertragungsnetz. Die Verbindungswege des Übertragungsnetzes bestehen aus Lichtwellenleitern (LWL) oder Richtfunkstrecken [55], [60].

Die Endteilnehmer sind über das Zugangsnetz mit der Ortsvermittlung des Vermittlungsnetzes verbunden. Das Zugangsnetz bekommt durch den Beschluss des „Entbündelten Zugang zum Teilnehmeranschluss“ der europäischen Union besondere Bedeu-

tung [77]. Infolge dieses Beschlusses können alternative Dienstanbieter die Leitungen bis zu den Endkunden (last mile) von den Netzbetreibern mieten [60]. Das Zugangnetz wird dadurch von verschiedenen Dienstanbietern parallel genutzt. Im Detail ist die Struktur des Zugangnetzes in Abbildung 2.2 dargestellt [56].

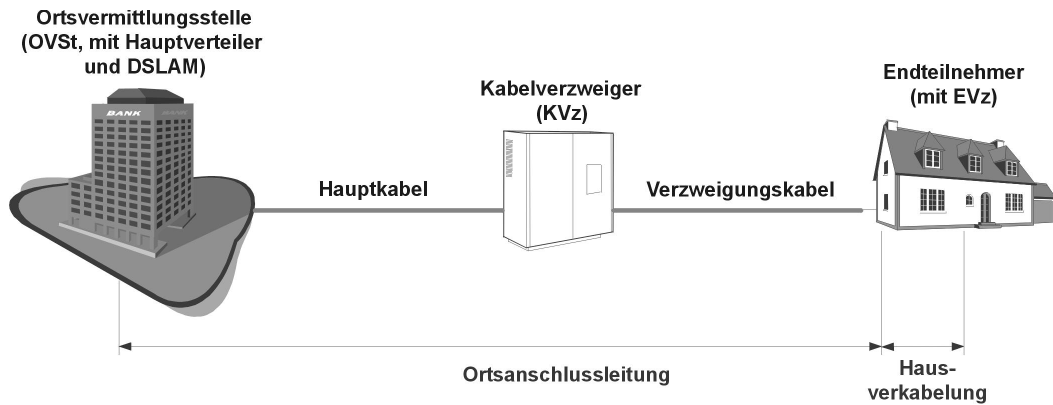


Abbildung 2.2: Struktur des deutschen Zugangnetzes

Der an einem Endverzweiger (EVz) angeschlossene (End-)Teilnehmer ist über das Verzweigungskabel mit dem Kabelverzweiger (KVz) verbunden. Die Verzweigungskabel bestehen aus ca. 30 verdrehten Kupferdoppeladern mit 0,35 mm, 0,40 mm bis 0,80 mm Aderndurchmesser [56]. Die mittlere Leitungslänge der Verzweigungskabel beträgt ca. 300 m. Die charakteristische Impedanz der von der deutschen Telekom AG eingesetzten Kabel ist 135Ω [59].

Die Hauptkabel verbinden die einzelnen Kabelverzweiger mit dem Hauptverteiler (HVt). Diese Kabel bestehen im Mittel aus ca. 490 Kupferdoppeladern der Leitungslänge von ca. 1700 m [57]. Der Hauptverteiler befindet sich in der Ortsvermittlungsstelle (OVSt) oder in deren Nähe. Das Netz zwischen den Hauptverteilern und den Endverzweigern wird als Zugangs- oder Anschlussnetz (Accessnetz) bezeichnet. Die Verzweigungskabel und Hauptkabel bilden zusammen die Ortsanschlussleitungen (OAsl). Die Entfernung zwischen den Endverzweigern und den Hauptverteilern ist im deutschen Anschlussnetz bei 90 Prozent der Anschlüsse kürzer als 3,7 km [56]. Die Leitungslänge zwischen dem Kabel- und dem Endverzweiger ist dabei geringer als 1 km [59]. Nur ca. 10 Prozent der deutschen Anschlussleitungen weisen eine Leitungslänge von 0,5 km und weniger auf.

Das bestehende Anschlussnetz aus symmetrischen Kupferkabeln ist physikalisch in der Lage, breitbandigere Dienste als analoge Sprachsignale zu übertragen [32]. Im Falle von ADSL und SHDSL befindet sich der DSLAM in der Vermittlungsstelle. In einem DSLAM sind mehrere Line Cards auf Baugruppen integriert, die die Gegenstellen zu den xDSL-Modems bei den Endkunden darstellen. Der DSLAM setzt die Datenströme zwischen den Kupferkabeln des Teilnehmerzugangnetzes und den Glasfasern des Übertragungsnetzes ineinander um.

In modernen TK-Netzen werden symmetrische Kupferkabel lediglich zwischen der Ortsvermittlungsstelle und dem Endverzweiger eines privaten Endkunden eingesetzt [60]. Die Reichweite und die Datenrate einer xDSL-Verbindung ist von der Leistungsfähigkeit der eingesetzten xDSL-Systeme und den auf den verwendeten Kupferdoppeladern auftretenden Störungen abhängig [70]. Diese Störungen sind in einem Überblick im folgenden Abschnitt dargestellt.

2.2 Störungen für xDSL-Systeme

Die einzelnen Zweidrahtleitungen (Leitungspaare, Doppeladernpaare) des Zugangsnetzes werden durch Verseilung zu Kabelbündeln zusammengefasst¹. Diese Leitungen wurden ursprünglich für die Übertragung analoger Sprachsignale mit einer Bandbreite von 300 Hz bis 3,4 kHz konzipiert. Die physikalischen Eigenschaften der Kupferzweidrahtleitungen im Zugangsnetz erlauben jedoch prinzipiell eine Übertragung von Signalen mit Grenzfrequenzen über 1 MHz [56]. Allerdings muss bei der Übertragung höherfrequenter Signale über die Anschlussleitungen beachtet werden, dass die Leitungscharakteristik (Dämpfung, Leitungsimpedanz, etc.) frequenzabhängig ist und die übertragenen Signale durch verschiedene physikalische Effekte gestört werden. Die auftretenden Nebensprech-, Rundfunk- und Impulsstörungen sind auf die fehlende Abschirmung der Adernpaare zurückzuführen [32]. Abbildung 2.3 gibt einen Überblick hinsichtlich der auf den Leitungen des Anschlussnetzes potentiell auftretenden Störungen.

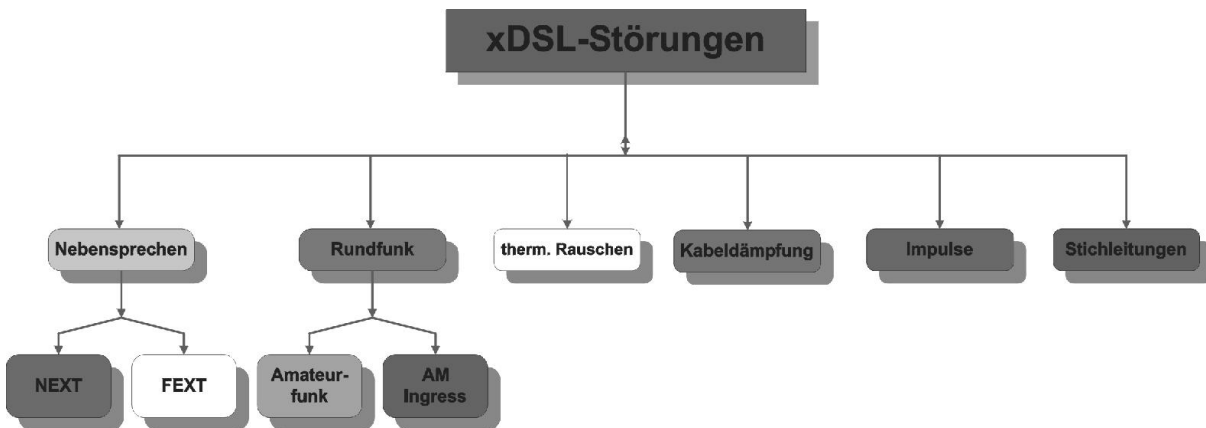


Abbildung 2.3: Störungen für xDSL-Systeme

¹Der Aufbau von Kabelbündeln und die unterschiedlichen Verseiltechniken sind in Kapitel 3 und in [55] beschrieben.

Das sich auf einer Kupferdoppelader ausbreitende Sendesignal wird in der Leistung um die vorhandene Kabeldämpfung reduziert. Diese Dämpfung führt zu einer Verringerung des Signal-Rauschleistungsverhältnisses am Empfängereingang. Im ungünstigsten Fall kann keine DSL-Verbindung aufgebaut werden, oder das ursprüngliche Signal kann nicht fehlerfrei rekonstruiert werden. Die Kabeldämpfung wird durch den Leitungsquerschnitt, den elektrischen Leitwert des verwendeten Materials und durch die Kabellänge bestimmt.

Im Anschlussnetz können nicht reflexionsfrei abgeschlossene Stichleitungen auftreten [32]. Die an nicht abgeschlossenen Stichleitungen reflektierten Signale (Echos) überlagern sich den auf den Leitungen ausbreitenden Sendesignalen. Am Empfänger liegt in diesem Fall das ursprünglich gesendete und von Signalechos überlagerte Signal an. Die fehlerfreie Signalrekonstruktion am Empfänger wird dadurch erschwert.

Die symmetrischen Kupferdoppeladern der Anschlussleitungen sind miteinander verdreht. Das auf A. G. Bell zurückgehende Prinzip des Verdrehens von Adernpaaren (twisted pair) führt im Idealfall dazu, dass keine elektromagnetischen Felder von einer Kupferdoppelader abgestrahlt oder darauf eingekoppelt werden. Fertigungstoleranzen bei der Kabelherstellung führen aber dazu, dass Kupferkabel Unsymmetrien im Kabelaufbau besitzen können [32]. Mit steigender Kabelunsymmetrie können in zunehmenden Maße die von Radio- und Amateurfunksendern stammenden Funkwellen auf den Doppeladernpaaren einen Ladungsfluss gegen Erde induzieren [78]. Mit anwachsender Frequenz überlagern sich die eingekoppelten Funkwellen dem xDSL-Signal, wodurch die Qualität des Übertragungskanal abnimmt.

Störimpulse auf den Telefonleitungen werden durch elektrische Einrichtungen erzeugt, die in der Umgebung der Leitungen betrieben werden. Das Klingeln eines Telefonapparats, der an einer Zweidrahtleitung im gleichen Grundbündel angeschlossen ist, kann zu Impulsstörungen führen. Die Einkopplung der Impulsstörungen kann auf den unsymmetrischen Kabelaufbau zurückgeführt werden [32].

Die einzelnen Kupferdoppeladern eines Kabelbündels sind in Folge der sich auf ihnen ausbreitenden elektrischen Signale von elektromagnetischen Feldern umgeben [48]. Parasitäre physikalische Effekte im Kabelbündel und die fehlende Abschirmung der Kupferdoppeladern sind die Ursachen dafür, dass die stromführenden Zweidrahtleitungen Störströme bzw. Störspannungen auf den benachbarten Leitungspaaren induzieren (siehe Kapitel 3). Dieser Effekt wird als Nebensprechen oder Nebensprechstörung bezeichnet. Die in einem Kabelbündel auftretenden Nebensprecheffekte werden aus Sicht des gestörten xDSL-Transceivers nach Nahnebensprechen (NEXT, Near End Crosstalk) am gleichen Kabelende und Fernnebensprechen am entgegengesetzten Kabelende (FEXT, Far End Crosstalk) unterschieden (siehe Kapitel 3).

Nebensprechstörungen können durch xDSL-Systeme unterschiedlicher Technologie, die wiederum von verschiedenen Diensteanbietern betrieben werden, verursacht werden. Die Einhaltung der in den xDSL-Standards von ANSI T1E1, ETSI TM6 und ITU-T festgelegten Grenzwerte der Sendeleistungsdichten, wie auch die Richtlinien des so genannten „spektralen Managements“, stellen eine Grundvoraussetzung für den Parallel-

betrieb von xDSL-Systemen dar [20]. Allerdings geben die Standards keine Hinweise darüber, wie mehrpaarige Kabelbündel zu beschalten sind, damit die auftretenden Nebensprechstörungen möglichst wenig die Leistungsfähigkeit der parallel betriebenen xDSL-Verbindungen beeinflussen. Infolgedessen, dass die auf einer Kupferdoppellader des Anschlussnetzes erreichbare Datenrate und die Anzahl der xDSL-Systeme, die parallel an einem Kabelbündel betrieben werden können, von den im Kabelbündel auftretenden Nebensprechstörungen beeinflusst werden [14], [32], [40], wird in Kapitel 3 die auf den Anschlussleitungen auftretenden Nebensprechstörungen untersucht.

2.3 Aktuelle Störsignalgeneratoren

Die beschriebenen Störungen im TK-Netz werden bei xDSL-Systemtests im Labor durch Störsignalgeneratoren reproduziert. In einigen der derzeit auf dem Markt angebotenen Leitungssimulatoren ist ein Störsignalgenerator implementiert. Der eigentliche Leitungssimulator bildet die Leitungsimpedanz und die Kabeldämpfung nach. Der integrierte Störsignalgenerator generiert die im Kabelbündel auftretenden Störungen für xDSL-Systeme.

Mit relativ einfachen Störsignalgeneratoren kann nur das Nahnebensprechen zwischen zwei Leitungspaaren

- im selben Sternvierer
- in verschiedenen Sternvierern
- innerhalb von 20 Leitungspaaren

simuliert werden [16] (siehe Abbildung 3.2). Das Nahnebensprechen zwischen Leitungspaaren in verschiedenen Kabelbündeln wird nicht unterstützt. Eine individuelle Änderung des Nebensprechspektrums ist bei einfachen Störsignalgeneratoren nicht möglich.

Die als eigenständiges Gerät ausgeführten Störsignalgeneratoren arbeiten in Kombination mit einem Leitungssimulator. Die für Standardkonformitätstests einsetzbaren Störsignalgeneratoren erzeugen Nebensprech- und Impulsstörungen nach den Störmodellen der Standardisierungsorganisationen ANSI, ETSI und ITU (siehe Anhang A). Die spezielle Störumgebung für Tests von ADSL-, HDSL- oder SHDSL-Systemen wird in einigen Geräten mit voneinander unabhängigen Störsignalgeneratormodulen erzeugt. Spezielle Steckkarten erlauben die Generierung von Rechteckimpulsen, Sägezahnspannungen und Sinussignalen verschiedener Frequenz. Die Amplituden der erzeugten Signale können an den Geräten vom Anwender individuell gewählt werden [17].

Komplexe Störsignalgeneratoren reproduzieren breitbandiges Rauschen, Nebensprechen und transiente Störungen realer Telefonanschlussleitungen für Tests von ADSL-, SHDSL-, HDSL-, HDSL2- und ISDN-Systemen². Die jeweiligen Störungen werden

²Komplexe Störsignalgeneratoren können als eigenständige Geräte oder als Teil eines Leitungssimulators ausgeführt sein.

nach den von ANSI T1E1, ETSI TM6 und ITU-T standardisierten Störmodellen generiert. Darüber hinaus können vom Anwender definierte Störspektren erzeugt werden. Die Generatoren verfügen dazu über die diskreten Störsignalgeneratoren:

- Generator für weißes Rauschen
- niederfrequente (bis 500 kHz) NEXT-Signalgeneratoren
- hochfrequente (2.0 MHz) NEXT-Signalgeneratoren
- Shaped Noise Generator
- Metallisches und longitudinales Rauschen
- Generator für Impulsstörungen.

Diese diskreten Störsignalgeneratoren können voneinander unabhängig konfiguriert und die jeweils ausgegebenen Störsignale zu einem Summensignal addiert werden. Die Nebensprechstörungen werden mit einer minimalen Leistungsdichte von -130 dBm/Hz generiert [18]. Der Impuls-Störgenerator erzeugt neben den verschiedenen Störimpulsen des ANSI-Standards T1.413 [25] den so genannten Cook-Impuls [74], [75].

Anhang A dieser Arbeit gibt einen Überblick darüber, welche Standard-Störmodelle von den auf dem Markt angebotenen Störsignalgeneratoren im Detail unterstützt werden.

2.4 Zusammenfassung

xDSL-Systeme nutzen die Anschlussleitungen im Zugangsnetz, um Endkunden Breitbanddienste von mehreren Mbit/s zur Verfügung zu stellen. In diesem Kapitel wurde ein Überblick über das in Deutschland realisierte Telekommunikationsnetz gegeben. Dabei wurden die Teilbereiche Übertragungs-, Vermittlungs- und Zugangsnetz des Telekommunikationsnetzes in ihrer Struktur und mit ihren Übertragungs- und Vermittlungseinrichtungen beschrieben.

Das Zugangsnetz (Telefonanschlussnetz) ist aus verdrehten Kupferkabeln aufgebaut. Die Datenrate und Reichweite einer xDSL-Verbindung wird durch die Leistungsfähigkeit der eingesetzten xDSL-Systeme in Kombination mit der Übertragungsqualität der verwendeten Kupferdoppeladern bestimmt. Die Qualität der Kupferleitungen, und damit die Leistungsfähigkeit der darüber betriebenen xDSL-Verbindungen, wird durch die in den Kabelbündeln auftretenden Störungen reduziert. Zu diesen Störungen zählen Signalechos, Rundfunk-, Impuls- und Nebensprechstörungen ebenso, wie die auf den Leitungen vorhandene Kabeldämpfung.

Die Leistungsfähigkeit von xDSL-Systemen wird vor dem praktischen Einsatz hinsichtlich der in Kabelbündeln auftretenden Störungen im Labor getestet. Die auf den Kupferkabeln des Anschlussnetzes auftretenden Störungen werden in diesen Tests von

Störsignalgeneratoren reproduziert. In einem weiteren Abschnitt wurden die technischen Möglichkeiten von einfachen und aufwendig realisierten Störsignalgeneratoren diskutiert.

3 Nebensprechen auf xDSL-Leitungen

In diesem Kapitel werden die auf den Anschlussleitungen des Zugangsnetzes auftretenden Nebensprechstörungen messtechnisch und analytisch untersucht. Abschnitt 3.1 beschreibt den Aufbau der im Zugangsnetz eingesetzten Telefonanschlussleitungen. In den Abschnitten 3.2.1 und 3.2.2 werden die in den xDSL-Standards von ETSI TM6 und ANSI T1E1 definierten Nahnebensprechmodelle analysiert. Die Simulationsgenauigkeit dieser Modelle wird in Abschnitt 3.2.3 verifiziert. Fernnebensprechstörungen und deren Modellierung in den xDSL-Standards werden in den Abschnitten 3.3.1 und 3.3.2 diskutiert. Die messtechnische Untersuchung der auf den Kupferzweidrahtleitungen auftretenden Fernnebensprechstörungen und die quantitative Gegenüberstellung von Nah- und Fernnebensprechstörungen erfolgt in Abschnitt 3.3.3. Die wesentlichen Ergebnisse dieses Kapitels sind in Abschnitt 3.4 zusammengefasst.

3.1 Aufbau von Telefonanschlussleitungen

Die Telefonanschlussleitungen sind aus verdrehten und ungeschirmten Kupferzweidrahtleitungen aufgebaut [56]. Infolge der fehlenden Schirmung können elektromagnetische Felder aus der Umgebung der Zweidrahtleitungen Störsignale auf den Leitungen induzieren (siehe Kapitel 2.2). Die Kupferadern sind gleichwertig ausgeführt, so dass die daraus hergestellten Leitungen im Idealfall als symmetrisch betrachtet werden können.

Bei den in Europa eingesetzten Telefonanschlussleitungen (Telefonkabelbündel) werden üblicherweise zwei Leitungspaare zu einem „Sternvierer“ verdreht (verseilt) [55], [79]. Das Prinzip der (Stern-)Viererverseilung zeigt Abbildung 3.1.a).

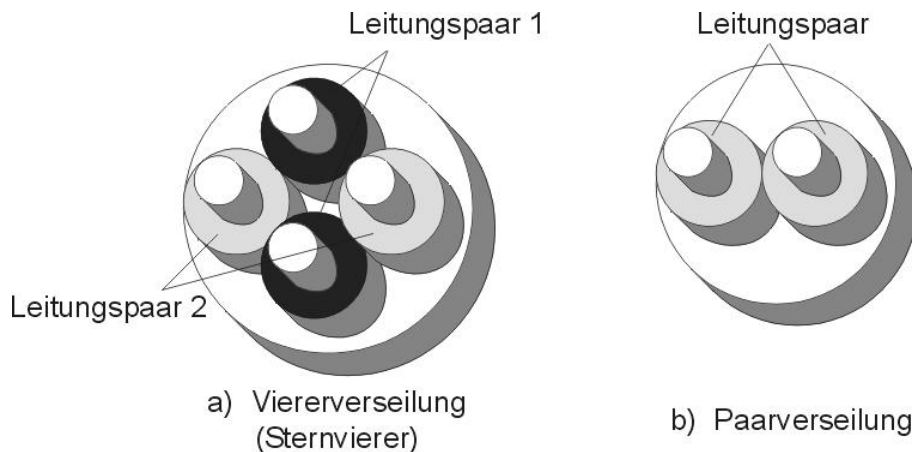


Abbildung 3.1: Prinzip der Vier- und Paarverseilung im Querschnitt

Die Telefonanschlussleitungen innerhalb der USA sind aus paarverseilten Zweidrahtleitungen aufgebaut. Bei dieser Verseilungsart werden zwei Kupferadern nach dem in Abbildung 3.1.b) dargestellten Prinzip zusammengefasst. Die Viererverseilung ermöglicht gegenüber der Paarverseilung eine bessere Platzausnutzung. Durch die Nähe der Zweidrahtleitungen können bei Viererverseilungen aber höhere Nebensprechstörungen als bei paarverseilten Leitungen auftreten [55].

Die viererverseilten Doppeladernpaare werden in Grundbündeln von beispielsweise 25, 50 oder 100 Doppeladernpaaren zusammengefasst [79]. Abbildung 3.2 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines 50-paarigen, viererverseilten Telefonanschlusskabels.

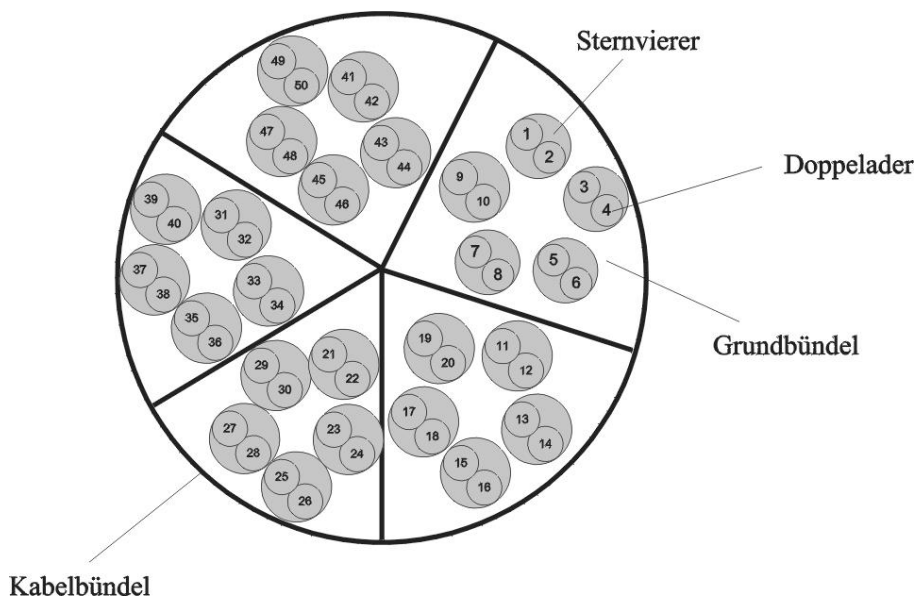


Abbildung 3.2: 50-paariges, viererverseiltes Telefonanschlusskabel

Die sich auf den Doppeladern eines Kabelbündels ausbreitenden Sendesignale sind von elektromagnetischen Feldern umgeben [48]. Aufgrund der zwischen den Zweidrahtleitungen vorhandenen parasitären kapazitiven und induktiven Kopplungen (siehe Abbildung 3.3), induzieren die elektromagnetischen Felder auf benachbarten Adernpaaren Störströme bzw. Störspannungen [32], [45]. Dieser Effekt wird als Nebensprechen (Übersprechen) bezeichnet. Die induzierten Nebensprechstörungen überlagern sich dem bedämpften und verzerrten (Empfangs-)Signal am Empfängereingang, wodurch die fehlerfreie Rekonstruktion des ursprünglich gesendeten Signals erschwert wird.

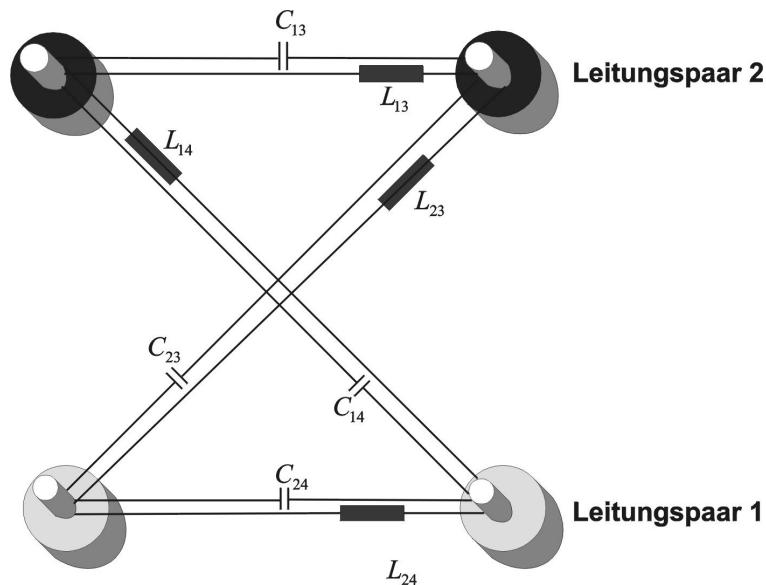


Abbildung 3.3: Induktive und kapazitive Kopplungen zweier Leitungspaare

Die Verdrillungsart und der Abstand zwischen den Leitungspaaren beeinflussen die zwischen den Leitungspaaren vorhandenen parasitären Kopplungen [32], [78]. Das auf A. G. Bell zurückgehende Prinzip des Verdrillens von Leitungspaaren reduziert im Mittel die elektromagnetischen Kopplungen. Die Nebensprecheffekte zwischen den Übertragungssystemen im Kabelbündel nehmen dadurch ab, so dass im Idealfall keine elektromagnetischen Felder abgestrahlt werden [33].

Stärker verdrillte Zweidrahtleitungen weisen ein geringeres Nebensprechverhalten auf, neigen aber zu erhöhten Signallaufzeiten [37]. Die Kupferdoppeladern eines Kabelbündels können durch Fertigungstoleranzen unterschiedliche Leitungsbeläge R , L , C und G besitzen, wodurch die induktiven und kapazitiven Kopplungen zwischen den Leitungspaaren voneinander abweichen [29]. Als Folge dieser Abweichungen heben sich die elektromagnetischen Felder gegenseitig nicht mehr vollständig auf, so dass die Nebensprechstörungen im Kabelbündel zunehmen.

Die auftretenden Nebensprechstörungen werden nach

- Nahnebensprechen (Near-End crosstalk, NEXT)
- Fernnebensprechen (Far-End crosstalk, FEXT)

differenziert. Im Fall von Nahnebensprechen besitzen die störenden Sendesignale auf den benachbarten Zweidrahtleitungen die entgegengesetzte Ausbreitungsrichtung, wie das gestörte Empfangssignal auf der dadurch beeinträchtigten Doppelader¹. Nahnebensprechen tritt demnach bei „Gegenrichtungsverkehr“ der Signale auf². Fernnebensprechen entsteht durch Signale mit gleicher Ausbreitungsrichtung. Nebensprechstörungen wirken sich besonders dann negativ aus, wenn ein parallel an einem Kabelbündel betriebenes System in einem Frequenzbereich sendet, in dem ein anderes Übertragungssystem Nutzsignale empfängt [56].

Die innerhalb der in Abbildung 3.2 dargestellten Telefonanschlussleitung auftretenden Nebensprechstörungen werden nach Übersprecheffekten

- im gleichen Sternvierer
- zwischen Sternvierern im einem Grundbündel
- zwischen benachbarten Grundbündeln
- zwischen nicht benachbarten Grundbündeln

unterschieden [55].

Das Signalrauschleistungsverhältnis am Empfänger wird durch die auftretenden Nebensprechstörungen reduziert, so dass Übertragungsfehler auftreten können. Die Wahrscheinlichkeit für Übertragungsfehler kann bei einer gleichbleibenden Störumgebung durch Reduzierung der Datenrate oder der Leitungslänge vermindert werden. Auf Grund dieses Einflusses von Nebensprechstörungen auf die Reichweite und die Datenrate einer xDSL-Verbindung [33], [70], [80], werden die auf den Telefonanschlussleitungen auftretenden Nebensprechstörungen im Folgenden detailliert analysiert. Die für realitätsnahe xDSL-Systemtests im Labor und für die Abschätzung der Übertragungsqualität von Telefonanschlussleitungen relevante Simulationengenauigkeit der Standard-Nebensprechmodelle, ist von besonderem Interesse für die Untersuchungen.

3.2 Nahnebensprechen (NEXT)

Abbildung 3.4 zeigt das Prinzip des Nahnebensprechens zwischen zwei Doppeladern eines (mehrpaarigen) Kabelbündels. Z_1 und Z_2 repräsentieren die Eingangsimpedanzen der an den Zweidrahtleitungen angeschlossenen xDSL-Systeme. In dem dargestellten Beispiel generiert das Sendesignal der Spannung $U_{p2}(f)$ die Nahnebensprechstörung der Spannung $U_{NEXT,1}(f, l)$ auf dem Leitungspaar eins.

¹Verwendet das störende xDSL-System das gleiche xDSL-Prinzip wie das gestörte xDSL-System, wird die Störung als „self-NEXT“ bezeichnet.

²Die „Gegenrichtung“ bezieht sich auf die unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen des störenden und des dadurch gestörten Signals.

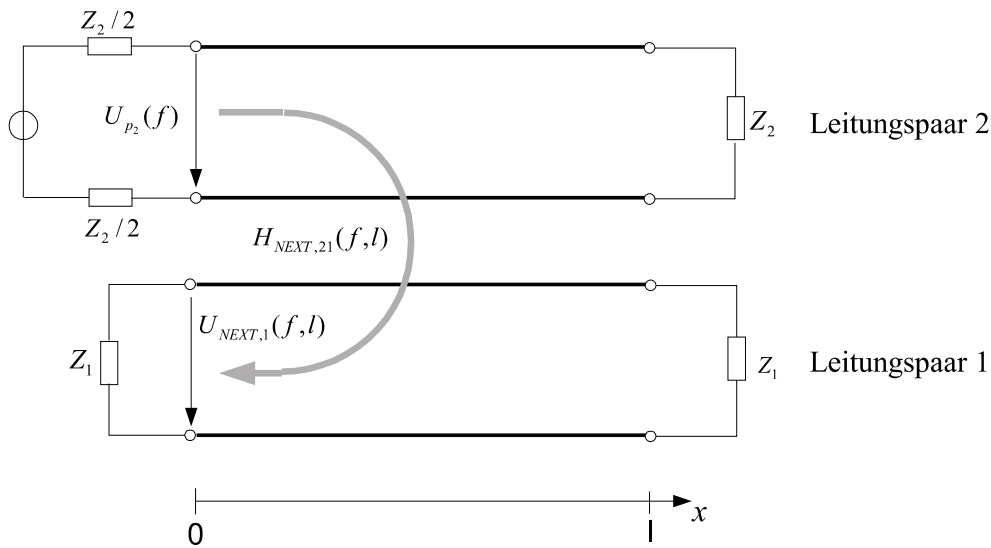


Abbildung 3.4: Prinzip des Nahbensprechens zwischen zwei Kupferdoppeladern

Die Nebensprechübertragungsfunktion (NEXT-Übertragungsfunktion) $H_{NEXT,21}(f, l)$ beschreibt den Energietransfer von der Kupferdoppelader eins auf das Leitungspaar zwei³. Die NEXT-Übertragungsfunktionen sind frequenz- und ortsabhängig [32], [55]. Fertigungstoleranzen bei der Kabelherstellung führen dazu, dass die NEXT-Übertragungsfunktionen über die einzelnen Leitungspaarkombinationen eines Kabelbündels örtlich variieren [36]. Die in Abbildung 3.4 dargestellten Doppeladernpaare sind mit ihrer charakteristischen Impedanz abgeschlossen, so dass im Idealfall keine Signalreflexionen auftreten. Die charakteristische Impedanz beträgt für die in Europa verlegten Telefonbündelkabel 135Ω [24], [27], [28]. Für die Abschätzung von Nebensprechstörungen bei der Netzplanung und die Reproduktion bei xDSL-Systemtests werden diese Störungen durch die in den folgenden Abschnitten diskutierten Nebensprechmodelle modelliert.

3.2.1 Nahbensprechmodell für einen Einzelstörer

Die folgende Ableitung des Nahbensprechmodells für den Fall eines Störers im Kabelbündel basiert auf Abbildung 3.4. Die induzierte Spannung $U_{NEXT,1}(f, x)$ der Nahbensprechstörung am Kabelanfang $x = 0$ lautet im Frequenzbereich [32], [37] - [40]

$$U_{NEXT,1}(f, x = 0) = j2\pi f \cdot U_{p2}(f) \cdot \int_0^l X_{21}(f, x) \cdot T_2(f, x) \cdot T_1(f, x) \, dx. \quad (3.1)$$

Der Faktor $j2\pi f$ stellt im Frequenzbereich die entsprechende Ableitung des Induktionsstromes im Zeitbereich dar⁴. Die orts- und frequenzabhängige Funktion $X_{21}(f, x)$

³ $H_{NEXT,xy}$ repräsentiert allgemein die Nahbensprechübertragungsfunktion von der Kupferzweidrahtleitung x auf die dadurch beeinträchtigte Kupferdoppelader y .

⁴Die allgemeine Induktionsgleichung lautet im Zeitbereich $u_{ind}(t) = L \cdot di(t)/dt$.

beschreibt die Unsymmetrie der betrachteten Kupferzweidrahtleitungen durch Nahnebensprechen.

Die Kupferdoppeladernpaare des Kabelbündels werden nach der allgemeinen Leitungstheorie durch eine Serienschaltung aus differentiellen Leitungsstücken der Länge dx modelliert [61]. Die Nahnebensprechstörung am Leitungsanfang (Ort des Transceivers) $U_{NEXT,1}(f, x = 0)$ berechnet sich aus der Integration der auf den Leitungsstücken der (differentiellen) Länge dx induzierten (differentiellen) Teilspannungen. Die Funktionen $T_1(f, x)$ und $T_2(f, x)$ repräsentieren in Gleichung (3.1) die Spannungstransferfunktionen (Spannungsübertragungsfunktionen) der betrachteten Leitungspaare eins und zwei. Die Spannung der Nahnebensprechstörung am Ort $x = 0$ auf dem Leitungspaar zwei berechnet sich aus der Multiplikation der Spannung $U_{p2}(f)$ mit der Spannungstransferfunktion $T_2(f, x)$. Über jedes Teilleitungsstück der Länge dx wird gemäß der Funktion $X_{21}(f, x)$ eine Spannung auf die Zweidrahtleitung eins induziert. Die über die gesamte Leitungslänge l auf dem Leitungspaar eins induzierte Spannung wird durch die Multiplikation mit der Spannungstransferfunktion $T_1(f, x)$ des Leitungspaares eins an den Eingang $x = 0$ der Kupferdoppelader transferiert.

Mit Gleichung (3.1) kann die Fourier-Transformierte der induzierten Nahnebensprechspannung für verschiedene Sendesignalspannungen $U_{p2}(f)$ (Störspannungen) und unterschiedliche Funktionen $X_{21}(f, x)$ berechnet werden. Ferner kann durch Anwendung von Gleichung (3.1) die Charakteristik des Störspektrums auf Kupferzweidrahtleitungen für verschiedene Störimpulse berechnet werden [37].

Zur Bestimmung der Spannungstransferfunktionen $T_1(f, x)$ und $T_2(f, x)$ werden die Leitungspaare als Zweitore betrachtet (siehe Abbildung 3.5).

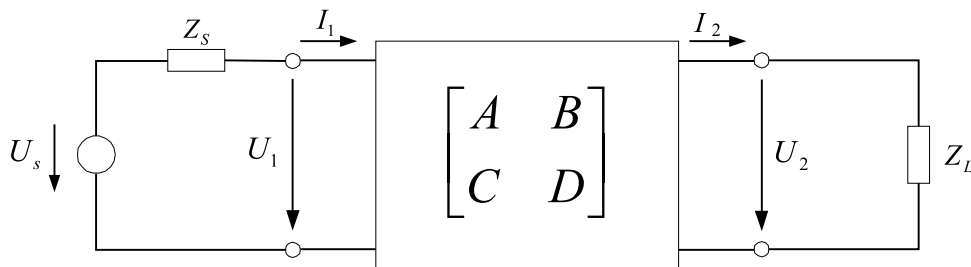


Abbildung 3.5: Zweitoren-Ersatzschaltbild eines differentiellen Leitungsstücks

Die Torströme I_1, I_2 und die Torspannungen U_1, U_2 hängen von der Ein- bzw. Ausgangsimpedanz des Zweitores, den externen Widerständen Z_S (Quellenimpedanz) und der Lastimpedanz Z_L ab⁵. Zwischen der Quellenspannung U_s , der Spannung U_L am Verbraucher und den Strömen I_1 und I_2 gilt der Zusammenhang [61], [62].

⁵Für eine einfachere Notation wird hier die Frequenzabhängigkeit der elektrischen Größen nicht explizit angegeben.

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \Phi \cdot \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad \text{mit:} \quad \Phi = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}. \quad (3.2)$$

Aus Gleichung (3.2) folgt für die Spannungstransferfunktion des Leitungspaares i

$$T_i(f) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{U_2}{A \cdot U_2 + B \cdot I_2}. \quad (3.3)$$

Mit der Voraussetzung $Z_2 = Z_L$ ergibt sich für die Spannungstransferfunktionen

$$T_i(f) = \frac{1}{A + B/Z_2} = \frac{Z_L}{A \cdot Z_L + B}. \quad (3.4)$$

Unter der Voraussetzung, dass die Ströme und Spannungen einen sinusförmigen Verlauf aufweisen und die Leitungen über die gesamte Leitungslänge l homogen und reflexionsfrei abgeschlossen sind, folgt aus Gleichung (3.4) nach mathematischen Umformungen für die Spannungstransferfunktion am Ort x auf der Kupferdoppelader

$$T_i(f, x) = \frac{Z_L}{\cosh(\gamma x) \cdot Z_L + Z_0 \sinh(\gamma l)} = \exp[-\gamma(f) x] \quad . \quad (3.5)$$

Gleichung (3.5) geht von der vereinfachenden Annahme aus, dass die primären Leitungsparameter und die daraus resultierenden Spannungstransferfunktionen der betrachteten Zweidrahtleitungen identisch sind. Die Ausbreitungskonstante $\gamma(f)$ einer Kupferdoppelader ist durch den Ausdruck

$$\gamma(f) = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha(f) + j\beta(f) \quad . \quad (3.6)$$

gegeben [61], [62]. R beschreibt den ohmschen Leitungsbelag, L den Induktions-, G den Admittanz- und C den Kapazitätsbelag der Kupferzweidrahtleitung. $\alpha(f)$ charakterisiert die Leitungsdämpfung und $\beta(f)$ die Phasendrehung auf der betrachteten Zweidrahtleitung.

Aus den Gleichungen (3.3), (3.5) und (3.6) ergibt sich für die induzierte Spannung der Nahbensprechstörung auf der Kupferdoppelader eins [37]

$$U_{NEXT,1}(f, x = 0) = j2\pi f \cdot U_{p2}(f) \cdot \int_0^l X_{21}(f, x) \cdot \exp[-2\gamma(f)] dx \quad . \quad (3.7)$$

Aus der allgemeinen Definition der Übertragungsfunktion [65]

$$H(f) = \frac{U_2(f)}{U_1(f)} \quad (3.8)$$

folgt für die NEXT-Übertragungsfunktion am Kabelanfang

$$H_{NEXT,21}(f, x = 0) = \frac{U_{NEXT,1}(f, x = 0)}{U_{p2}(f)} \quad (3.9)$$

$$= j2\pi f \cdot \int_0^l X_{21}(f, x) \cdot \exp[-2\gamma(f)x] dx. \quad (3.10)$$

Der Exponentialterm in Gleichung (3.7) klingt mit zunehmender Leitungslänge ab. Nahnebensprechstörungen werden gemäß der obigen Gleichung maßgeblich von Leitungsabschnitten am Kabelanfang bestimmt.

Nach [32] und [37] kann in einer ersten Näherung davon ausgegangen werden, dass die in Kabelbündeln durch Nahnebensprechen verursachten Unsymmetrien frequenzunabhängig sind. Aus dieser vereinfachenden Annahme ergibt sich

$$X_{21}(f, x) \approx X_{21}(x). \quad (3.11)$$

Mit der Näherung (3.11) folgt für die Spannung der Nahnebensprechstörung auf der Kupferdoppelader eins im Frequenzbereich

$$U_{NEXT,1}(f, x = 0) = j2\pi f \cdot U_{p2}(f) \cdot \int_0^l X_{21}(x) \cdot \exp[-2\gamma(f)x] dx. \quad (3.12)$$

Das Signal $U_{p2}(f)$ ist nicht für jeden Zeitpunkt $-\infty < t < \infty$ exakt vorhersagbar, so dass es sich bei $U_{p2}(f)$ um ein statistisches Signal handelt. $U_{NEXT,1}(f, x = 0)$ ist nach Gleichung (3.12) von $U_{p2}(f)$ abhängig und stellt dementsprechend ein statistisches Signal dar. Statistische Signale werden im Zeitbereich durch ihre Autokorrelationsfunktion beziehungsweise im Frequenzbereich durch ihr Leistungsdichtespektrum beschrieben [64], [69]. Das Leistungsdichtespektrum der Nahnebensprechstörung auf der Doppelader eins kann mittels der Gleichung

$$S_{NEXT,1}(f) = H_{NEXT,21}(f) \cdot H_{NEXT,21}(f)^* \cdot S_{Störer,2}(f) \quad (3.13)$$

$$= |H_{NEXT,21}(f)|^2 \cdot S_{Störer,2}(f) \quad (3.14)$$

berechnet werden⁶. Für den mittleren quadratischen Betrag der Übertragungsfunktion (Leistungsübertragungsfunktion) $|H_{NEXT,21}(f)|^2$ ergibt sich aus den Gleichungen (3.9) und (3.11)

$$|H_{NEXT,21}(f)|^2 = 4\pi^2 f^2 \cdot \int_0^l \int_0^l \text{Cov}\{X_{21}(x), X_{21}(y)\} \exp[-2\gamma(f)x] \exp[-2\gamma(f)^*y] dx dy. \quad (3.15)$$

Für die Kovarianz der Funktion $X_{21}(x)$ folgt nach [39], [40]

⁶ $H_{NEXT,21}(f)^*$ entspricht der konjugiertkomplexen Nahnebensprechübertragungsfunktion zwischen den Doppeladern eins und zwei.

$$\text{Cov}\{X_{21}(x)X_{21}(y)\} = \text{E}\{(x - \text{E}\{x\})(y - \text{E}\{y\})\} \quad (3.16)$$

$$= k_n \cdot \delta(x - y). \quad (3.17)$$

$\text{E}\{\cdot\}$ stellt in obiger Gleichung den Erwartungswert dar. Die NEXT-Kopplungskonstante k_n skaliert die δ -Funktion. Die Zufallsvariable k_n kann über die einzelnen Nahbensprechkombinationen innerhalb des mehrpaarigen Kabelbündels variieren [39], [40]. Aus Gleichung (3.17) ergibt sich für die Leistungsübertragungsfunktion des Nahbensprechens (NEXT-Kopplungsfunktion) am Ort des gestörten Transceivers

$$|H_{NEXT,21}(f)|^2 = 4\pi^2 f^2 \int_0^l \int_0^l k_n \delta(x - y) \exp[-2\gamma(f)x] \exp[-2\gamma(f)^*y] dx dy. \quad (3.18)$$

Unter der Voraussetzung $x = y$ berechnet sich die NEXT-Kopplungsfunktion am Leitungsanfang

$$|H_{NEXT,21}(f)|^2 = 4\pi^2 f^2 \cdot k_n \int_0^l \exp[-4\alpha(f)x] dx \quad (3.19)$$

$$= \frac{\pi^2 f^2}{\alpha(f)} \cdot k_n \cdot [1 - \exp(-4\alpha(f)l)]. \quad (3.20)$$

Für Leitungslängen $l \gg 1$ strebt die Exponentialfunktion in Gleichung (3.20) gegen Null und kann im Weiteren in einer ersten Näherung vernachlässigt werden [37], [55], [56]. Damit folgt für die NEXT-Kopplungsfunktion

$$|H_{NEXT,21}(f)|^2 \approx \frac{\pi^2}{\alpha(f)} \cdot k_n \cdot f^2. \quad (3.21)$$

Nach Gleichung (3.6) gilt für die Kabeldämpfung [37]

$$\alpha(f) \approx \sqrt{\pi f RC} = \zeta \cdot f^{1/2} \quad (3.22)$$

mit:

$$\zeta = \sqrt{\pi RC} \quad . \quad (3.23)$$

Mit der Leitungsdämpfung $\alpha(f)$ aus Gleichung (3.22) ergibt sich näherungsweise für die NEXT-Kopplungsfunktion zwischen den hier betrachteten Kupferdoppeladern

$$|H_{NEXT,21}(f)|^2 \approx \frac{\pi^2}{\zeta} \cdot k_n \cdot f^{3/2}. \quad (3.24)$$

Für die Leistungsdichte des Nahbensprechsignals (Nahbensprechleistungsdichte) auf dem ersten Leitungspaar folgt mit Gleichung (3.24)

$$S_{NEXT,1}(f) \approx \frac{\pi^2}{\zeta} \cdot k_n \cdot f^{3/2} \cdot S_{Störer,2}(f). \quad (3.25)$$

Die Gleichung (3.25) stellt das Nahnebensprechmodell für den Fall eines einzelnen (Nahnebensprech-)Störers im Kabelbündel dar. Der Mittelwert der Nahnebensprechleistung ist proportional zu $f^{3/2}$, so dass mit steigender Frequenz $S_{NEXT,1}(f)$ mit 15 dB pro Dekade auf der logarithmisch skalierten Frequenzachse zunimmt. Andere kompliziertere Nahnebensprechmodelle (NEXT-Modelle) geben für den Exponenten einen Bereich von 1,3 bis 1,7 an, und beziehen sich dabei auf Messungen und empirische Ableitungen [32]. Das Nahnebensprechmodell nach Gleichung (3.25) basiert auf den vereinfachenden Annahmen, dass alle Adernpaare im Kabelbündel die gleiche Leitungslänge l und identische Leitungscharakteristiken besitzen.

3.2.2 NEXT-Modelle für mehrere NEXT-Störer

In einem realen Kabelbündel werden die auf einer Kupferzweidrahtleitung messbaren Nebensprechstörungen von mehreren (verschiedenen) Sendesignalen verursacht. In welchem Ausmaß das Sendesignal auf einem Leitungspaar zu der Nahnebensprechstörung auf einer benachbarten Doppelader beiträgt, hängt von dem eingesetzten Übertragungsverfahren des störenden Systems und den jeweiligen Nahnebensprechkopplungen ab.

Die in den xDSL-Standards von ETSI TM 6 und ANSI T1E1 definierten Nahnebensprechmodelle gehen von folgenden vereinfachenden Näherungen aus [32], [37], [44], [46]:

1. Die Sendesignale auf den Zweidrahtleitungen im Kabelbündel sind voneinander statistisch unabhängig. Diese Voraussetzung ist nach den Untersuchungen von R. van den Brink erfüllt [42].
2. Alle xDSL-Systeme die parallel an einem Kabelbündel betrieben werden besitzen ein identisches Sendeleistungsdichtespektrum.
3. Sämtliche Doppeladern im Kabelbündel weisen die gleichen Leitungsbeläge R , L , C , G und die übereinstimmende Leitungslänge auf.

In der Praxis werden xDSL-Systeme parallel mit analogen und digitalen Sprachdiensten in einem gemeinsam genutzten Kabelbündel betrieben. Ebenso werden unterschiedliche xDSL-Technologien gleichzeitig in einem Kabel eingesetzt. Die verschiedenen Dienste besitzen voneinander divergierende Sendeleistungsdichtespektren, so dass die zweite Näherung in der Realität nur eingeschränkt gültig ist.

Fertigungstoleranzen bei der Kabelherstellung und der Aufbau einer Kabelstrecke zu einem Endkunden aus Teilleitungsstücken mit unterschiedlichen charakteristischen elektrischen Eigenschaften führen dazu, dass reale Anschlussleitungen von der Modellannahme drei abweichen. Zur Begrenzung der mathematischen Komplexität bei der Modellierung von Nahnebensprechstörungen wird zunächst von den oben getroffenen vereinfachenden Näherungen ausgegangen [37].

Das Leistungsdichtespektrum der Nahbensprechstörung $S_{NEXT}(f)$ auf einer Kupferdoppelader i ist die Summe über die N (Teil-)Nahbensprechstörsignale j ($j \in \{1, N\}$) (Power-Sum) [37], [42]⁷. Für die allgemeine Leistungsübertragungsfunktion der Nahbensprechstörung bei N vorhandenen (Einzel-)Störern im Kabelbündel gilt äquivalent zu Gleichung (3.20)

$$|H_{NEXT,i}(f, l)|^2 = \frac{\pi^2 f^2}{\alpha(f)} \cdot [1 - \exp(-4\alpha(f)l)] \cdot \sum_{j=1}^N k_{n_j} \quad \text{für } i \neq j \quad (3.26)$$

Die in Gleichung (3.26) definierte „Power-Sum Transfer Function“ $|H_{NEXT,i}(f, l)|^2$ beschreibt die Gesamtkopplung zwischen den störenden Sendesignalen auf den Zweidrahtleitungen j ($j \in \{1, N\}, j \neq i$) und der daraus resultierenden Nahbensprechstörung auf der Kupferdoppelader i (Referenzleitung). Bei N im Kabelbündel vorhandenen Nebensprechstörern berechnet sich die auf die Referenzleitung i bezogene Power-Sum Transferfunktion $|H_{NEXT,i}(f, l)|^2$ aus den einzelnen NEXT-Kopplungsfunktionen $|H_{NEXT,ij}(f)|^2$ nach [42]

$$|H_{NEXT,i}(f, l)|^2 = \sum_{j=1}^N |H_{NEXT,ij}(f)|^2 \quad \text{mit: } i \neq j. \quad (3.27)$$

Die Leistungsdichte des Nahbensprechsignals ergibt sich aus Gleichung (3.27) zu

$$S_{NEXT,i}(f) = |H_{NEXT,i}(f, l)|^2 \cdot S_{Störer}(f) \quad . \quad (3.28)$$

Formal entspricht Gleichung (3.28) einem Mehrtor mit N Eingängen und einem Ausgang, dessen systemtheoretisches Ersatzschaltbild in Abbildung 3.6 dargestellt ist.

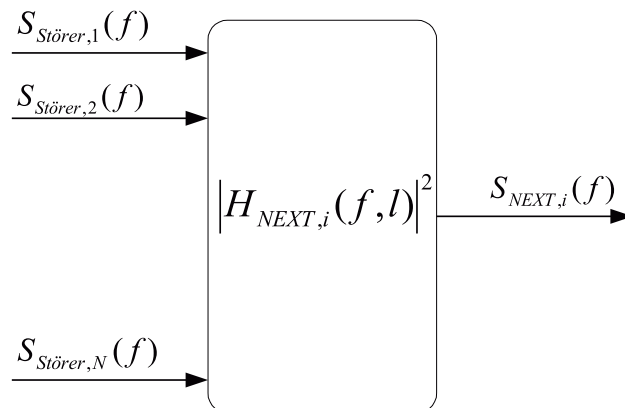


Abbildung 3.6: NEXT-Ersatzschaltbild bei N störenden Übertragungssystemen im Kabelbündel

⁷Im Folgenden bezeichnet die Variable N die Anzahl der in einem Kabelbündel vorhandenen Nebensprechstörer.

Die N störenden Übertragungssysteme besitzen nach Näherung zwei alle Systeme die gleiche Sendeleistungsdichte $S_{Störer}(f)$. Weichen die Leistungsdichten der störenden Übertragungssysteme voneinander ab, so ist ein Ansatz der den unterschiedlichen Sendeleistungen Rechnung trägt, für die Bestimmung der induzierten Nahnebensprechleistungsdichte zu wählen.

Die Power-Sum Transferfunktion $|H_{NEXT}(f, l)|^2$ ist in einem ersten Ansatz von der Frequenz f und der Länge l der Kupferdoppeladern im Kabelbündel abhängig. Die Kopplungskonstanten k_{n_j} ($j \in \{1, N\}$ mit $i \neq j$) sind Zufallsvariablen, die den Ausdruck $(\pi^2 f^2)/\alpha(f) \cdot [1 - \exp(-4 \alpha(f) l)]$ entsprechend der jeweiligen NEXT-Kopplung zwischen den Leitungspaaren i und j skalieren. $|H_{NEXT,i}(f, l)|^2$ berechnet sich unter den getroffenen Annahmen gemäß Gleichung (3.26) aus der Summe über N statistisch unabhängige Zufallsvariablen k_{n_j} . Nach dem zentralen Grenzwertsatz ist die Wahrscheinlichkeitsdichte von $|H_{NEXT,i}(f, l)|^2$ normalverteilt [52], [68], [69]. Mit der mittleren Kopplungskonstanten $\bar{k}_n = E\{k_{n_j}\}$ ergibt sich aus Gleichung (3.28) für die mittlere NEXT-Kopplungsfunktion

$$|\bar{H}_{NEXT}(f, l)|^2 \approx \frac{\pi^2 f^2}{\alpha(f)} \cdot [1 - \exp(-4 \alpha(f) l)] \cdot \bar{k}_n. \quad (3.29)$$

Für Leitungslängen $l \gg 1$ kann der Exponentialterm in Gleichung (3.29) äquivalent zu Gleichung (3.21) vernachlässigt werden. Mit dieser Vereinfachung lautet die gemittelte NEXT-Kopplungsfunktion

$$|\bar{H}_{NEXT}(f)|^2 \approx \frac{\pi^2 f^2}{\alpha(f)} \cdot \bar{k}_n. \quad (3.30)$$

Nach Gleichung (3.22) ist die Leitungsdämpfung $\alpha(f)$ proportional zu \sqrt{f} . Infolge dieser Proportionalität kann Gleichung (3.30) zu

$$|\bar{H}_{NEXT}(f)|^2 \approx \frac{\pi^2}{\zeta \cdot f^{1/2}} \cdot \bar{k}_n \cdot f^{3/2} \quad (3.31)$$

$$|\bar{H}_{NEXT}(f)|^2 \approx K_{NEXT} \cdot f^{3/2} \quad (3.32)$$

mit der NEXT-Kopplungskonstanten

$$K_{NEXT} = \frac{\pi^2}{\zeta} \cdot \bar{k}_n \quad (3.33)$$

weiter vereinfacht werden.

Mit Gleichung (3.32) folgt näherungsweise für die Leistungsdichte der Nahnebensprechstörung auf einer Zweidrahtleitung

$$S_{NEXT}(f) = |\bar{H}_{NEXT}(f)|^2 \cdot S_{störer}(f) \quad (3.34)$$

$$\approx K_{NEXT} \cdot f^{3/2} \cdot S_{störer}(f). \quad (3.35)$$

ANSI-Nahnebensprechmodell

Die Leistungsdichte der Nahnebensprechstörung ist nach Gleichung (3.35), wie im Fall des Einzelstörers nach Gleichung (3.25), proportional zu $f^{3/2}$. In dem abgeleiteten Modell nehmen die Nahnebensprechstörungen mit 15 dB/Dekade zu. ANSI legte die NEXT-Kopplungskonstante K_{NEXT} für ein 50-paariges Bündelkabel nach Messungen an Kabelbündeln der USA auf einen Wert von

$$K_{NEXT} = \left(\frac{N}{49}\right)^{0,6} \cdot 8,818 \cdot 10^{-14} = N^{0,6} \cdot 0,8536 \cdot 10^{-14} \quad \text{für} \quad N \leq 50 \quad (3.36)$$

fest [26], [32]. Die von ANSI definierte Kopplungskonstante ist nach Gleichung (3.36) von der Anzahl N der im Kabelbündel störenden Übertragungssysteme abhängig. Der Quotient $N/49$ setzt für ein 50-paariges Kabelbündel die Zahl der tatsächlich vorhandenen störenden Übertragungssysteme N in Relation zu den 49 maximal möglichen störenden Übertragungssystemen.

Nach ANSI ergibt sich für die mittlere NEXT-Kopplungsfunktion eines 50-paarigen Kabelbündels bei $N < 50$ die Gleichung

$$|\overline{H}_{NEXT}(N, f)|_{ANSI}^2 \approx K_{NEXT} \cdot f^{1,5} = \left(\frac{N}{49}\right)^{0,6} \cdot 8,818 \cdot 10^{-14} \cdot f^{1,5} \quad (3.37)$$

$$\approx N^{0,6} \cdot 0,8536 \cdot 10^{-14} \cdot f^{1,5}. \quad (3.38)$$

$|\overline{H}_{NEXT}(N, f)|_{ANSI}^2$ ist nach Gleichung (3.38) eine Funktion der Parameter N und der Frequenz f . In Abbildung 3.7 ist $|\overline{H}_{NEXT}(N, f)|_{ANSI}^2$ als Funktion der veränderlichen Größen N und f graphisch dargestellt.

Das induzierte Leistungsdichtespektrum der Nahnebensprechstörung auf einem Leitungspaar berechnet mit der von ANSI definierten Kopplungskonstanten nach⁸

$$S_{NEXT}(N, f) \approx \left(\frac{N}{49}\right)^{0,6} \cdot 8,818 \cdot 10^{-14} \cdot f^{3/2} \cdot S_{störer}(f). \quad (3.39)$$

Gleichung (3.39) stellt das ein Prozent Worst-Case Power-Sum Modell (PS-Modell) für Nahnebensprechstörungen dar. Die Leistungsdichte der Nahnebensprechstörung nimmt auf der logarithmisch skalierten Frequenzachse mit 15 dB pro Dekade zu [25]. Die Parameter des PS-Modells wurden von ANSI nach Messungen an Kabelbündeln in der Weise definiert, dass im Mittel 99 Prozent der real verlegten Kabelbündel kleinere oder maximal die mit dem Modell simulierten Nahnebensprechstörungen aufweisen. Das PS-Modell geht dabei von der vereinfachenden Annahme aus, dass die in einem Kabelbündel betriebenen Übertragungssysteme das gleiche Sendeleistungsdichtespektrum aufweisen.

⁸Im Anhang B sind die Sendeleistungsdichten $S_{störer}(f)$ der verschiedenen xDSL-Technologien nach den xDSL-Standards von ETSI und ANSI zusammengefasst.

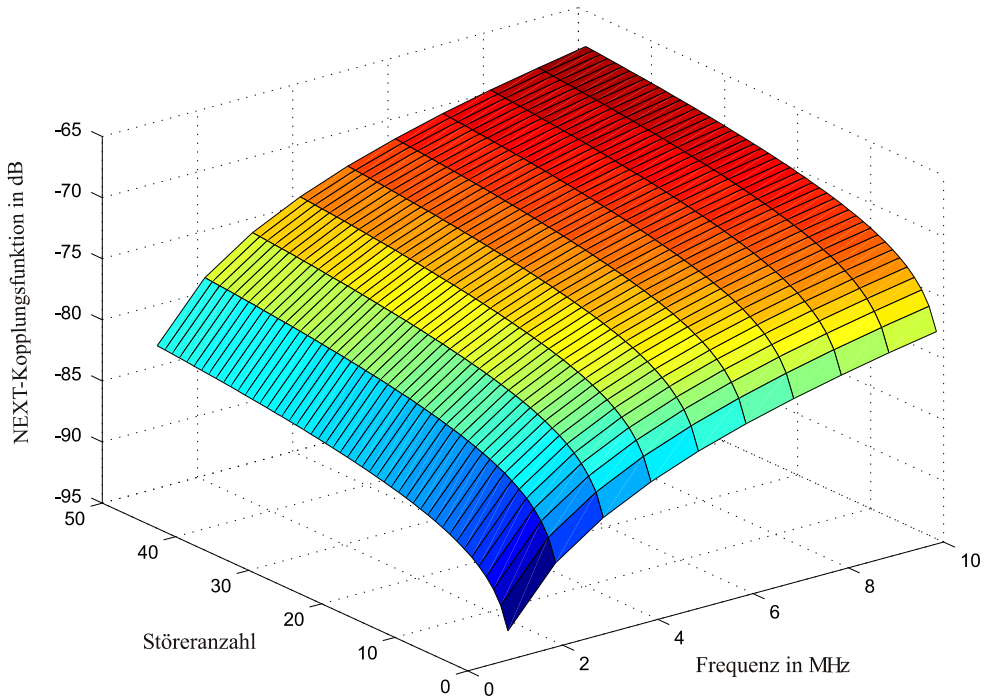


Abbildung 3.7: NEXT-Kopplungsfunktion nach ANSI T1.413 in Abhängigkeit von der Störeranzahl N und der Frequenz f

Werden D Systeme mit unterschiedlichen Sendeleistungsdichten $S_i(f)$ parallel an einem Kabelbündel betrieben, so würde sich aus der einfachen Erweiterung von Gleichung (3.39) gemäß

$$S_{NEXT}(f) \approx \left[\sum_{i=1}^D N_i^{0,6} S_i(f) \right] \cdot 0,8536 \cdot 10^{-14} \cdot f^{1,5} \quad (3.40)$$

eine in Relation zu den tatsächlichen Verhältnissen zu große Nahnebensprechstörung ergeben [34]. Die Ursache für die Simulationsungenauigkeiten nach Gleichung (3.40) besteht darin, dass nach dieser Gleichung jeweils ein System der Sendeleistung $S_i(f)$ auf der Doppelader mit der betragsmäßig größten Nahnebensprechkopplung betrieben wird. Das ist physikalisch unmöglich, weil auf der Zweidrahtleitung mit der geringsten Nahnebensprechdämpfung zu einem Zeitpunkt nur ein xDSL-System betrieben werden kann.

Auf Grund der Diskrepanz zwischen dem Modell nach Gleichung (3.40) und den realen physikalischen Gegebenheiten setzt ANSI die „FSAN-Methode“ (Full Service Access Network) für die Summation der Leistungsdichtespektren unterschiedlicher Nebensprechstörer im Kabelbündel ein [21]. Das von Persico und Magnone entwickelte FSAN-Modell ist durch die Gleichung

$$S_{NEXT,FSAN}(f) = \left[\sum_{i=1}^D [N_i^{0,6} S_i(f)]^{1/0,6} \right] \cdot 0,8536 \cdot 10^{-14} \cdot f^{1,5} \quad (3.41)$$

gegeben [22]. Nach J. Cook und L. Magnone existiert keine einfache physikalische Erklärung für den Exponenten 0,6 [23]. Nach S. Galli und K. Kerpez kann das FSAN-Modell auf die Minkowski-Ungleichung

$$\left[\sum_{j=1}^J \left(\sum_{k=1}^K a_{jk} \right)^{1/\lambda} \right]^\lambda \leq \sum_{k=1}^K \left(\sum_{j=1}^J a_{jk}^{1/\lambda} \right)^\lambda \quad (3.42)$$

zurückgeführt werden [34]. Bei a_{jk} handelt es sich um positive Werte. Die Variablen j seien aus dem Intervall $1 \leq j \leq J$ und k aus $1 \leq k \leq K$. λ liegt dabei innerhalb von $0 \leq \lambda \leq 1$. Es kann gezeigt werden, dass durch mathematische Umformungen für $\lambda = 0,6$ Gleichung (3.42) in die Gleichung (3.41) des FSAN-Modells übergeht.

S. Galli und K. Kerpez lieferten mit der Gleichung (3.42) die mathematische Ableitung für den bis dahin durch Messung ermittelten Exponenten von 0,6. Dieser Exponent wurde bereits vor der Veröffentlichung von S. Galli und K. Kerpez in der Industrie allgemein verwendet. Die Autoren stellten auch fest, dass die in Europa eingesetzten Kabelbündel besser durch einen Exponenten von 0,7 bis 0,8 charakterisiert werden [32], [34].

ETSI-Nahbessprechmodell

Für die Nahbessprechstörungen die in Europa verlegten Kabelbündel auftreten definierte ETSI ein von dem ANSI-Nahbessprechmodell abweichendes Modell. Der ETSI SHDSL-Standard gibt für die Kopplungskonstante europäischer Kabelbündel einen Wert von $K = 10^{-50/20} \approx 0,0032$ an [28]. Im Gegensatz zur der in Gleichung (3.36) von ANSI definierten Kopplungskonstante, ist die von ETSI festgelegte Konstante unabhängig von der Anzahl N der Nahbessprechstörer im Kabelbündel. Die NEXT-Kopplungsfunktion lautet nach ETSI für ein mit der charakteristischen Impedanz von 135Ω abgeschlossenes Kabelbündel

$$|\overline{H}_{NEXT}(f, l)|_{ETSI}^2 = \left[K_{NEXT} \cdot (f/f_0)^{0,75} \cdot \sqrt{1 - |s_{T0}(f, l)|^4} \right]^2 \quad (3.43)$$

$$= 10^{-50/20} \cdot (f/f_0)^{1,5} \cdot [1 - |s_{T0}(f, l)|^4]. \quad (3.44)$$

Die NEXT-Kopplungsfunktion nach Gleichung (3.44) ist eine Funktion der Frequenz f und der Leitungslänge l . Zur Prüfung der Standardkonformität von xDSL-Systemen nach den Richtlinien der ETSI-Standards wird der Parameter l mit den entsprechenden Werten der standardisierten Testleitungen belegt [24], [28]. Die Frequenz f wird in Gleichung (3.44) auf die Referenzfrequenz $f_0=1$ MHz normiert. $s_{T0}(f, l)$ repräsentiert die frequenz- und längenabhängige Übertragungsfunktion der jeweiligen Zweidrahtleitung. Die Übertragungsfunktionen der in den ETSI-Standards festgelegten Testleitungen können mit den ebenfalls standardisierten Leitungsbelägen berechnet werden (siehe Anhang C) [24], [28].

Die primären Leitungsparameter pro Meter ergeben sich aus den Leitungsbelägen nach

$$Z_S = R_s + j\omega L_s \quad (3.45)$$

$$Y_p = j\omega C_p. \quad (3.46)$$

Mit den Leitungsbelägen bei der Leitungslänge l

$$Z_{sx} = l \cdot Z_S \quad (3.47)$$

$$Y_{px} = l \cdot Y_P \quad (3.48)$$

und

$$\gamma_x = \sqrt{Z_{sx} \cdot Y_{px}} \quad (3.49)$$

folgt für die Übertragungsfunktion

$$s_{T0(f,l)} = \frac{2 / \cosh(\gamma_x)}{(Z_0/R_V + R_V/Z_0) \tanh(\gamma_x) + 2} \quad (3.50)$$

Im Gegensatz zu dem ein Prozent Worst-Case Power-Sum Modell von ANSI, ist die NEXT-Kopplungsfunktion des ETSI Nahnebensprechmodells unabhängig von der Anzahl N der störenden xDSL-Systeme im Kabelbündel. Die von ETSI festgelegte NEXT-Kopplungskonstante ist eine empirische Konstante, welche durch Messungen an Kabelbündeln bestimmt wurde. Mit $K_{NEXT} = 10^{-50/20}$ weist die NEXT-Kopplungsfunktion per Definition bei einer Leitungslänge von 1 km an dem Frequenzpunkt von 1 MHz einen Betrag von -50 dB auf [28]. Derzeit ist nicht endgültig sichergestellt, dass $K_{NEXT} = 10^{-50/20}$ der allgemeinen mittleren NEXT-Kopplungskonstanten der in Europa verlegten Kabelbündel entspricht. Die Kopplungskonstante europäischer Kabel ist laut ETSI noch zu untersuchen [28].

Durch Einsetzen von Gleichung (3.44) in (3.28) ergibt sich nach ETSI für die auf den Kupferzweidrahtleitungen induzierte Leistungsdichte der Nahnebensprechstörung [28]

$$S_{NEXT}(f, L) = 10^{-6} \cdot (f/f_0)^{1,5} \cdot [1 - |s_{T0}(f, L)|^4] \cdot S_{Störer}(f). \quad (3.51)$$

Bei einem im Voll-Duplex-Betrieb⁹ arbeitenden xDSL-System ist das Empfangssignal von dem sich ebenfalls auf der Zweidrahtleitung ausbreitenden Sendesignal überlagert. Darüber hinaus generieren die auf den Nachbaradern betriebenen xDSL-Systeme durch die im Kabelbündel vorhandenen Kopplungen Nebensprechstörungen auf der betrachteten Kupferdoppelader (siehe Abbildung 3.4). $S_{Störer}(f)$ repräsentiert in Gleichung (3.51) die gewichtete Summe der Störungen, die ein xDSL-System an einem Adernpaar gegenüber sich selbst verursacht und die von xDSL-Systeme an benachbarten Zweidrahtleitungen stammen. Gemäß dieses Ansatzes ergibt sich für die gewichtete Summe der Störleistungsdichten [28]

⁹Im Vollduplex-Betrieb werden auf einer Doppelader die Daten in beiden Richtungen gleichzeitig übertragen.

$$S_{St\ddot{o}rer}(f) = [S_{XS}^{K_n}(f) + S_{XA}^{K_n}(f)]^{1/K_n} \quad \text{mit: } K_n = 1/0,6 \quad . \quad (3.52)$$

Das Signal S_{XS} entspricht der Sendeleistungsdichte des betrachteten xDSL-Systems addiert mit einem von ETSI festgelegten Offset. Das Leistungsdichtespektrum $S_{XA}(f)$ der (fremd-) induzierten Störungen („alien noise“) ist von ETSI spezifiziert [28]. Gleichung (3.52) basiert auf dem FSAN-Modell. ETSI definierte dabei unterschiedliche Störumgebungen für xDSL-Systeme in Vermittlungsstellen (central office, LT) oder beim Endkunden (remote, NT)¹⁰.

Für die aus den Nachbaradern induzierten NEXT-Störungen sind von ETSI die vier Rauschmodelle A, B, C und D vorgegeben. Die Profile der Störleistungsdichten der Modelle A, B, C für fremdinduzierte NEXT-Störungen auf Seite des Endkunden und auf Seite der Vermittlungsstelle sind in den Abbildungen 3.8 und 3.9 dargestellt¹¹.

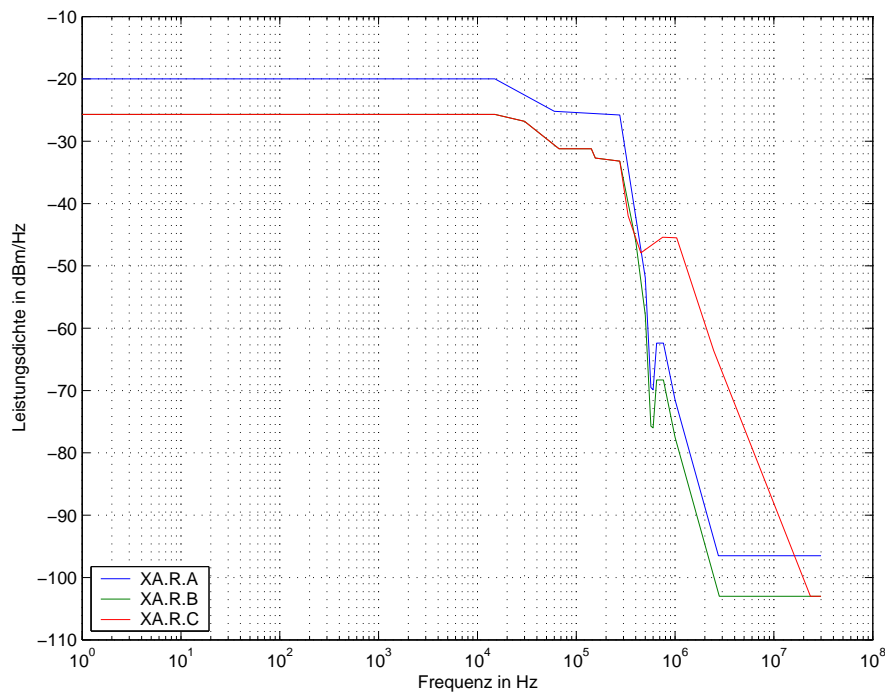


Abbildung 3.8: Spezifiziertes Leistungsdichteprofil für (fremd-)induzierte Störungen (alien noise) auf der Seite des Endkunden (NT)

¹⁰Anhang B des SHDSL-Standards von ITU-T [27] enthält die Nebensprechmodelle und deren Parameter zur Modellierung typischer Störumgebungen europäischer Fernsprechnetze. Die darin beschriebenen Nebensprechmodelle sind identisch mit denen des SHDSL-Standards von ETSI [28].

¹¹Das Leistungsdichtespektrum des Störmodells D wird in den folgenden Graphiken nicht dargestellt, weil dieses Modell ausschließlich von selbstinduzierten Nahbessprechstörungen („self crosstalk scenario“) ausgeht.

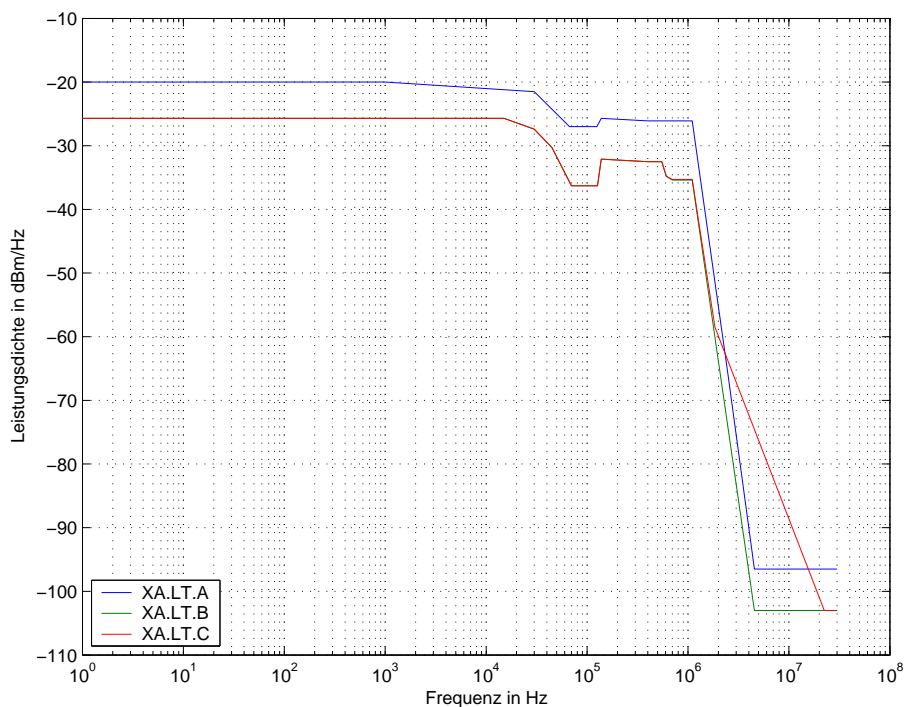


Abbildung 3.9: Standardisierte Leistungsdichteprofile für (fremd-)induzierte NEXT-Störungen (alien noise) auf der Seite der Vermittlungsstelle (LT)

Wie die Darstellungen 3.8 und 3.9 zeigen, nehmen die Leistungsdichten im Mittel mit zunehmender Frequenz ab. Auf Seiten der Vermittlungsstelle (LT), als auch auf der Seite des Endkungen (NT), repräsentiert Modell A eine Umgebung, die von starken Störungen für SHDSL-Systeme geprägt ist. Modell B bildet im Vergleich zu dem Modell A eine moderate Störumgebung nach. Das Rauschzenario nach Modell C entspricht dem von Modell B, ergänzt durch zusätzlich störende ISDN-Systeme. Das Modell C geht für die ISDN-Systeme von einem HDB3-Leitungscode aus.

Wie die in Abbildung 3.24 dargestellte Messung zeigt und in Abschnitt 3.2.3 näher untersucht wird, treten in Kabelbündeln Nebensprechstörleistungsdichten auf, die von den dargestellten Nebensprechprofilen des ETSI SHDSL-Standards abweichen. Das mit 25 SHDSL-Systemen belegte 50-paarige Kabelbündel weist auf dem Referenzadernpaar bei 300 Hz eine maximale Nebensprechleistungsdichte von ca. -95 dBm/Hz auf¹². Damit ergibt sich zwischen der Messung und dem Leistungsdichteprofil des Modells A bei 300 Hz eine Abweichung von ca. 69 dBm/Hz. Im Vergleich zu den Nebensprechmodellen B und C beträgt die Differenz bei 300 Hz ca. 63 dBm/Hz. In dem hier diskutierten Beispiel würde ein Störsignalgenerator größere Nebensprechstörungen erzeugen, als diese auf der betrachteten Kupferdoppelader zu messen sind. Ein xDSL-System würde in diesem Fall in einer von der Realität abweichenden Störumgebung getestet werden.

¹²Bei den hier durchgeführten Betrachtungen wird von einer Kabelbelegung von 50 Prozent ausgegangen. Dies entspricht der ungefähren Auslastung von Kabelbündeln im Anschlussnetz mit xDSL-Systemen.

Unger-Nebensprechmodell

Die Nahnebensprechmodelle von ANSI und ETSI stellen Vereinfachungen des von J. H. W. Unger entwickelten Nebensprechmodells dar. In diesem Abschnitt wird daher das von Unger entwickelte Nebensprechmodell untersucht. Unger modellierte in seiner 1985 veröffentlichten Arbeit *“Near-end crosstalk model for line code studies“* [47] die Nahnebensprechkopplungsfunktion durch die abschnittsweise definierte Funktion

$$|H_{NEXT}(f, N)|^2 = \begin{cases} 4,6288 \cdot 10^{-10} \cdot f^{0,4} \cdot N^{0,6} & \text{für } f \leq 20 \text{ kHz} \\ 2,3144 \cdot 10^{-14} \cdot f^{1,4} \cdot N^{0,6} & \text{für } f > 20 \text{ kHz.} \end{cases} \quad (3.53)$$

Für $f \leq 20$ kHz besitzt die NEXT-Kopplungsfunktion des Unger-Modells eine Steigung von 4 dB/Dekade. Ab 20 kHz steigt die Kopplungsfunktion mit 14 dB/Dekade auf der logarithmisch skalierten Frequenzachse an. Die Nahnebensprechkopplungsfunktion nach Unger zeigt ein hochpassähnliches Verhalten. Die NEXT-Kopplungsfunktion des Unger-Modells ist, wie die des ANSI-Modells, von der Anzahl N der NEXT-Störer im Kabelbündel abhängig. Abbildung 3.10 zeigt die NEXT-Kopplungsfunktion des Unger-Modells für $N = 1, 10, 20, 49$ Störer im Kabelbündel. Der Wert der NEXT-Kopplungsfunktion an dem Frequenzpunkt $f = 20$ kHz hängt von der Anzahl N der störenden xDSL-Systeme im Kabelbündel ab. Der Betrag der Kopplungsfunktion nach Unger bei $f = 20$ kHz für unterschiedlich viele störende xDSL-Systeme ist in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Störeranzahl N	1	10	20	49
$ H_{NEXT}(f = 20 \text{ kHz}, N) ^2$ in dB	-76,1412	-70,1412	-68,3350	-66,0000

Tabelle 3.1: NEXT-Kopplungsfunktion des Unger-Modells für $f = 20$ kHz

Die Nahnebensprechmodelle der xDSL-Standards verwenden für eine einfache Modellierung von NEXT-Störungen eine über der Frequenz mit konstanter Steigung verlaufende NEXT-Kopplungsfunktion (siehe Gleichung (3.44), (3.38)). Abbildung 3.11 zeigt die NEXT-Kopplungsfunktionen des Unger-Modells im Vergleich zu den NEXT-Kopplungsfunktionen des ANSI-Nahnebensprechmodells aus dem Standard T1.413 für $N = 10, 49$ Störer im Kabelbündel.

Aufgrund der unterschiedlichen Steigungen weichen die Kopplungsfunktionen des ANSI- und des Unger-Modells bei $f = 1$ Hz um 47,3421 dB von einander ab. Mit steigender Frequenz nimmt die Differenz im Bereich $0 < f \leq 20$ kHz ab. Bei $f = 20$ kHz beträgt der Unterschied der Kopplungsfunktionen 0,03081 dB. Die Steigung des ANSI-Modells beträgt über den gesamten Frequenzbereich 15 dB/Dekade, so dass die Differenz der Kopplungsfunktionen für Frequenzen größer 20 kHz anwächst.

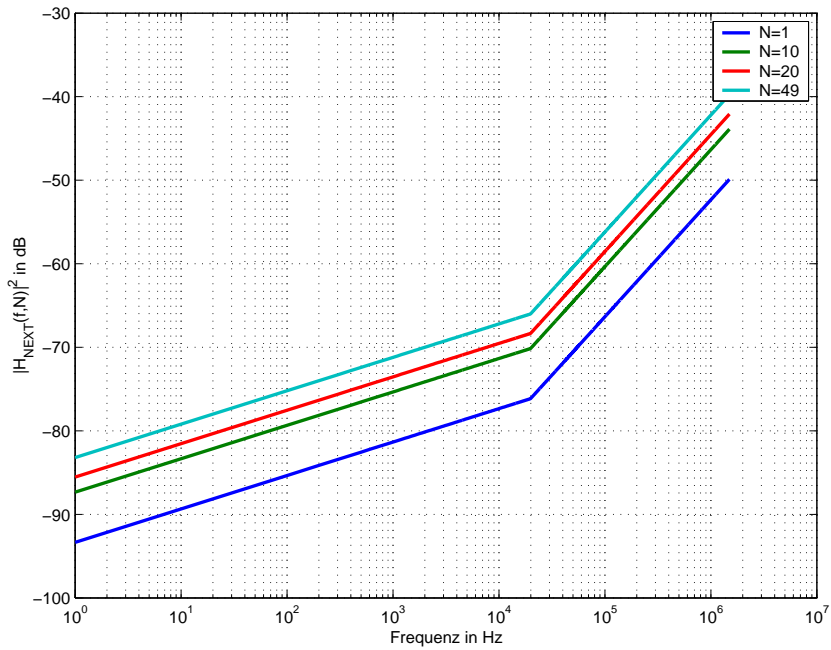


Abbildung 3.10: Nahnebensprechübertragungsfunktion nach Unger für $N = 1, 10, 20$ und 49 Störer

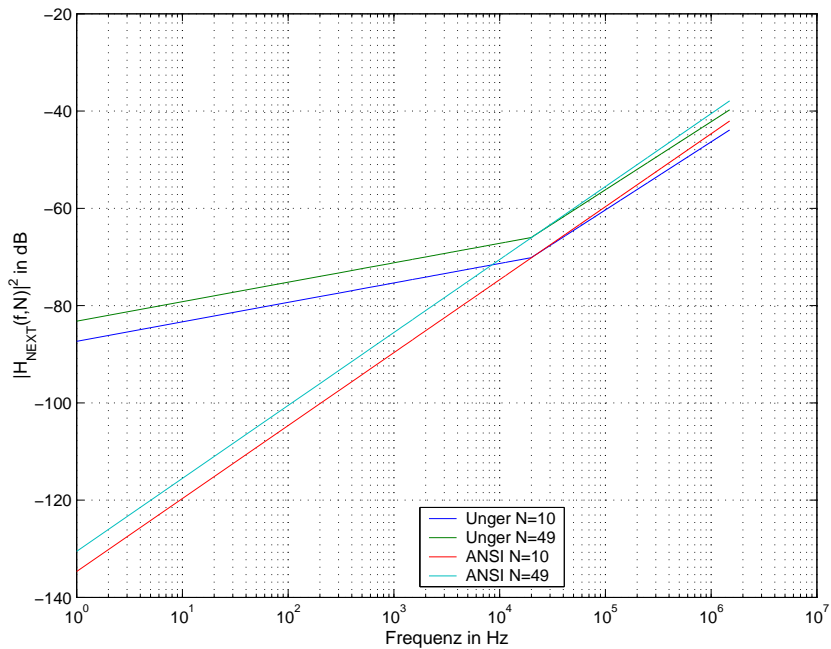


Abbildung 3.11: NEXT-Übertragungsfunktionen nach ANSI T1.413 und Unger für $N = 10$ und 49 Störer

3.2.3 Untersuchung der Standard-Nahbensprechmodelle

Die in den Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 diskutierten Nahbensprechmodelle basieren auf vereinfachenden Annahmen hinsichtlich der physikalischen Gegebenheiten in realen Kabelbündeln. Die Simulationsgenauigkeit der in den xDSL-Standards von ETSI TM 6, ANSI T1E1 definierten Nahbensprechmodelle wurde anhand der im Folgenden dargestellten Messungen verifiziert. Für diese Untersuchungen wurde ein flexibel konfigurierbares Testnetz aufgebaut.

Testnetz

Die Kabeltypen mit unterschiedlichen Aderndurchmesser, die in der Länge variabel konfigurierbaren Übertragungstrecken und die frei wählbare Beschaltung der Kabelbündel mit Übertragungssystemen (Modems), stellen die Flexibilität des realisierten Testnetzes dar. Abbildung 3.12 zeigt das Testnetz in seinen Komponenten.

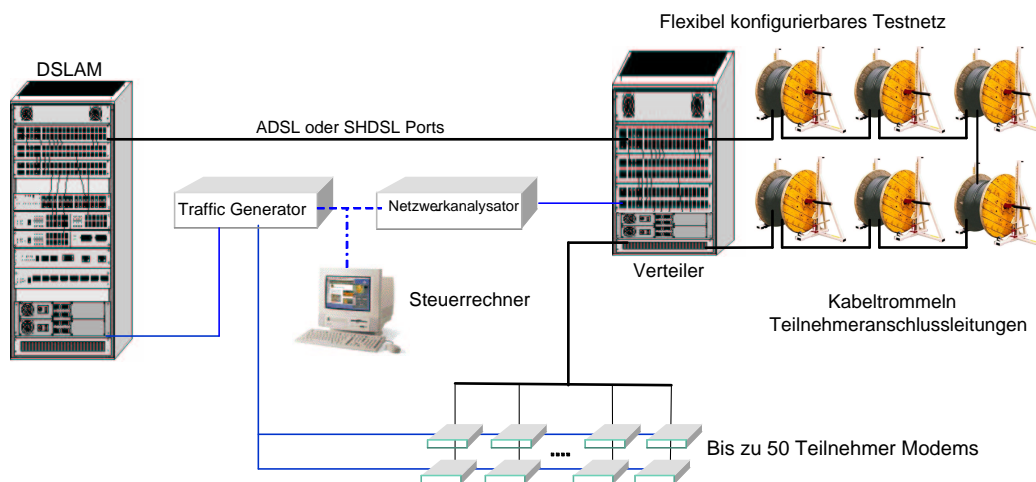


Abbildung 3.12: Testnetz zur Untersuchung von Nebensprecheffekten und dem Verhalten von xDSL-Systemen in realen Kabelbündeln

Der DSLAM stellt entsprechend der Konfiguration ADSL- und SHDSL-Teilnehmerschnittstellen zur Verfügung¹³. Die Kabel des Testnetzes sind vom Typ A-2Y(L) 50×2×0,4 mm mit einem Aderndurchmesser von 0,4 mm und vom Typ DIN VDE 0815 J-2Y(ST)Y mit einem Leiterdurchmesser von 0,6 mm. Diese Aderndurchmesser sind typisch für das deutsche Zugangsnetz [55], [56], [57]¹⁴. Das Testnetz besteht aus einzelnen Leitungssegmenten, die in Schritten von 250 m zu Kabelstrecken zwischen 300 m und 6000 m zusammengeschaltet werden können. Mit der maximalen Gesamtlänge

¹³Im deutschen Anschlussnetz werden derzeit vorwiegend ADSL- und SHDSL-Modems eingesetzt, so dass der DSLAM nur mit diesen Line Cards bestückt wurde.

¹⁴Nach Bauvorschriften werden Anschlussleitungen bis zu einer Leitungslänge von 4 km mit einem Aderndurchmesser von 0,4 mm ausgeführt. Längere Anschlussleitungen werden mit Kupferdoppeladern mit einem Leiterdurchmesser von 0,6 mm und 0,8 mm ausgeführt [55].

von 6000 m können über 90 Prozent der im deutschen Anschlussnetz auftretenden Leitungslängen reproduziert werden. Die Längenabhängigkeit der im Kabelbündel auftretenden Nebensprechstörungen kann durch die Skalierbarkeit der Leitungslängen im Testnetz untersucht werden. Die Kabelsegmente des aufgebauten Testnetzes sind im Detail in Abbildung 3.13 dargestellt.

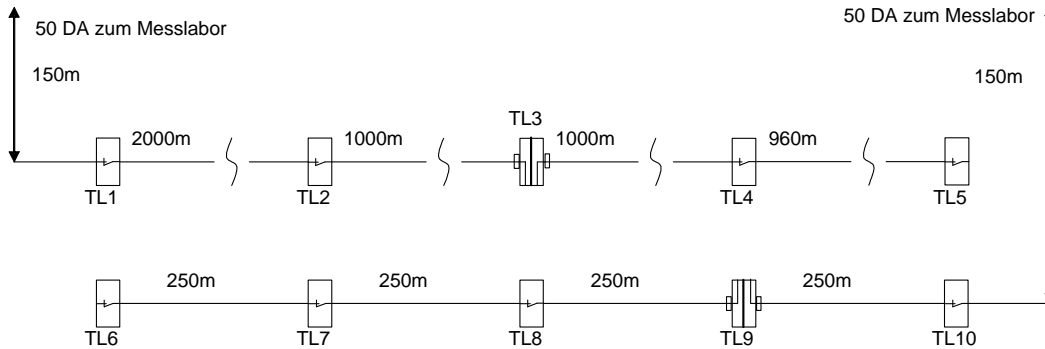


Abbildung 3.13: Leitungsssegmente des Testnetzes

Eine bestimmte Leitungslänge wird über Verbindungen zwischen den Trennleisten (TL) zusammengeschaltet. Mit diesem Testaufbau werden die im Kabelbündel und die an den Trennleisten realer Anschlussnetze auftretenden Störeffekte berücksichtigt. Die xDSL-Modems sind über den Verteiler mit dem Testnetz verbunden. Der am DSLAM und an den xDSL-Modems angeschlossene Verkehrsgenerator („Traffic Generator“) erzeugt für die Untersuchungen einen zu übertragenden Datenstrom. Mittels des am Verteiler angeschlossenen Netzwerkanalysators werden die zwischen den Kupferoppeladern auftretenden Nebensprechkopplungen gemessen. Die Steuerung des Verkehrsgenerators und des Netzwerkanalysators erfolgt über einen daran angeschlossenen PC (Steuerrechner).

Aufbau zur Messung von Nahnebensprechen

Die zwischen den Kupferdoppeladern des Testnetzes bestehenden Nahnebensprechkopplungen wurden mit dem in Abbildung 3.14 dargestellten Messaufbau bestimmt [29], [30], [81]. Für die Messung der NEXT-Kopplungsfunktionen wurde ein Netzwerkanalysator eingesetzt. Durch Auswertung der vom Netzwerkanalysator ausgegebenen S -Parameter sind die Nahnebensprechkopplungsfunktionen direkt bestimmbar [78]. Um Aussagen über das Nahnebensprechverhalten von Kupferzweidrahtleitungen über den maximal von xDSL-Systemen genutzten Frequenzbereich treffen zu können, erstreckt sich der Messbereich von 10 kHz bis 30 MHz.

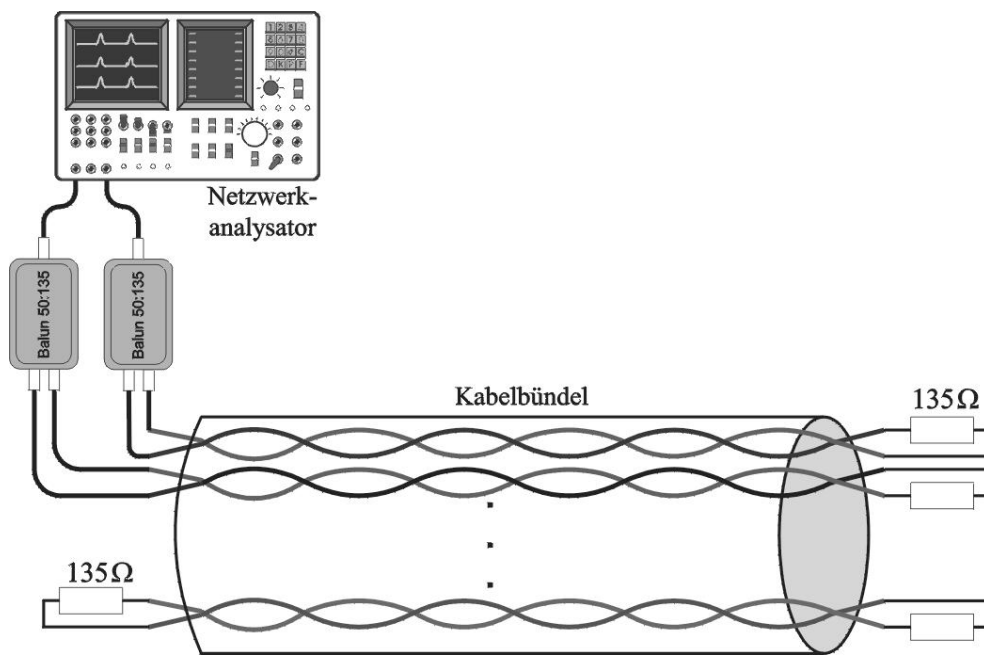


Abbildung 3.14: Messaufbau zur Bestimmung der NEXT-Kopplungsfunktionen

Der Netzwerkanalysator wurde über $50\ \Omega : 135\ \Omega$ -Baluns mit den Doppeladern des zu untersuchenden Kabelbündels verbunden. Die Baluns passen die Ein- und Ausgangsimpedanz des Netzwerkanalysators an die charakteristische Impedanz der Kupferdoppeladern von $135\ \Omega$ an [78]. Zur Vermeidung von Signalreflexionen wurden die gegenüberliegenden Enden der untersuchten Leitungspaare, wie auch die nicht bei einer Messung betrachteten Kupferzweidrahtleitungen, mit der charakteristischen Impedanz abgeschlossen [30].

Mess- und Untersuchungsergebnisse

Abbildung 3.15 zeigt die in einem 10-paarigen Grundbündel gemessenen NEXT-Kopplungsfunktionen im doppellogarithmischen Maßstab. Die Leitungslänge betrug bei den Messungen $300\ \text{m}$ ¹⁵. Die erste Kupferdoppelader stellte bei diesen Untersuchungen das Referenzadernpaar (Referenzleitung, Bezugsleitung) dar, auf welches die gemessenen Nahbensprechkopplungen bezogen wurden.

¹⁵Die hier dargestellten Untersuchungen wurden bei einer Leitungslänge von $300\ \text{m}$ durchgeführt, um die hier dargestellten Messergebnisse mit den Ergebnissen der FEXT-Messungen in Abschnitt 3.3.3 vergleichen zu können. Bei der Messung der Nahbensprechkopplungen wird deren Längenabhängigkeit meist vernachlässigt [78].

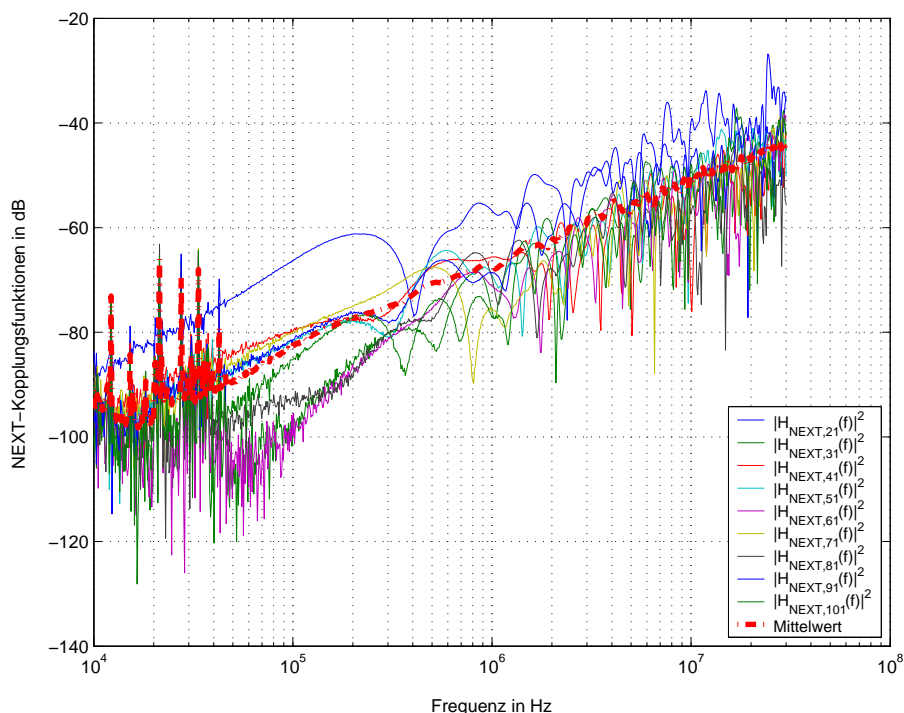


Abbildung 3.15: NEXT-Kopplungsfunktionen im ersten Grundbündel bei einer Leitungslänge von 300 m

Die Untersuchung zeigte, dass der Betrag der jeweiligen NEXT-Kopplungsfunktion von der gegenseitigen geometrischen Lage der betrachteten Kupferdoppeladern abhängig ist. Das Adernpaar zwei bildet mit dem hier betrachteten Referenzadernpaar einen Sternvierer. Die durchgeführten Analysen und der in der Grafik dargestellte Mittelwert aller in benachbarten Grundbündeln gemessenen Nahnebensprechkopplungsfunktionen verdeutlichen, dass die NEXT-Kopplungsfunktionen zwischen zwei Kupferdoppeladern im gleichen Sternvierer im Mittel den größten Betrag aufweist. Demzufolge stören sich Übertragungssysteme im gleichen Sternvierer im Durchschnitt mehr, als Systeme in verschiedenen Sternvierern. Zur eindeutigen Bestätigung dieser Aussage wurden alle in einem 50-paarigen Kabelbündel auftretenden Nahnebensprechkopplungen bestimmt und ausgewertet. Abbildung 3.16 zeigt die relative Häufigkeit der Betragsdifferenzen zwischen den im gleichen und in benachbarten Sternvierern gemessenen NEXT-Kopplungsfunktionen. Die relativen Häufigkeiten der über der Frequenz gemittelten Betragsdifferenzen sind in Abbildung 3.17 dargestellt.

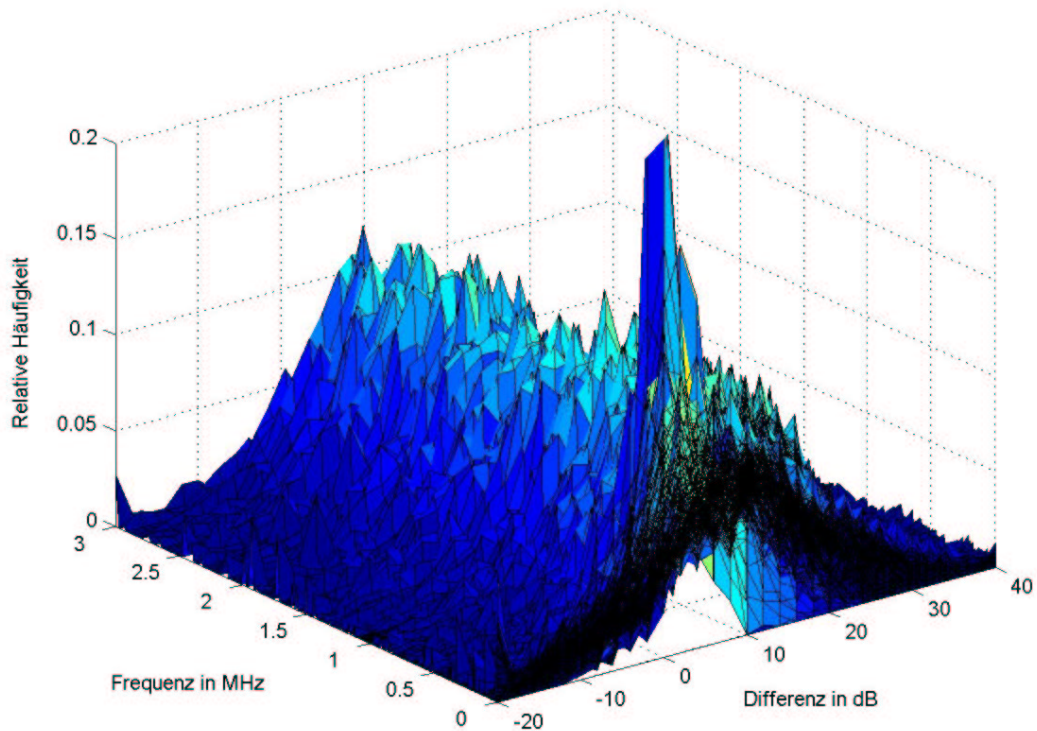


Abbildung 3.16: Relative Häufigkeit der Betragsdifferenz zwischen den im gleichen und in benachbarten Sternvierern gemessenen Nahbensprechkopplungsfunktionen über der Frequenz

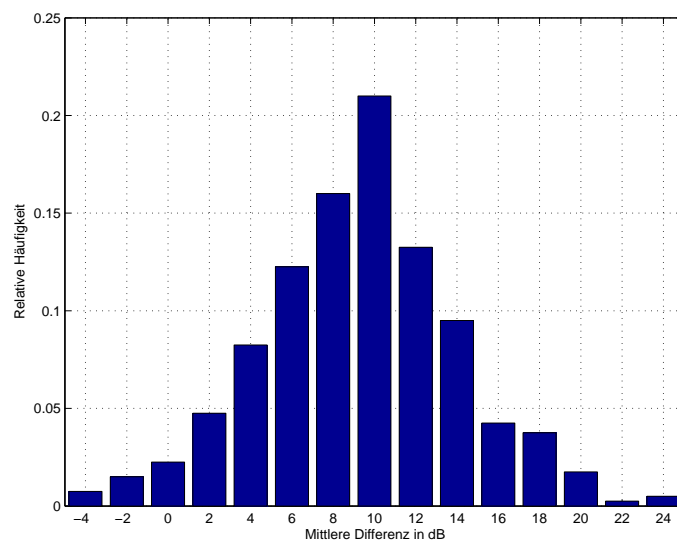


Abbildung 3.17: Relative Häufigkeit der mittleren Betragsdifferenz zwischen den im gleichen und in benachbarten Sternvierern gemessenen Nahbensprechkopplungsfunktionen bei einer Leitungslänge von 300 m und einem Leiterdurchmesser von 0,4 mm

Gemäß der in den Abbildungen 3.16 und 3.17 dargestellten Auswertungen, besitzen die zwischen benachbarten Sternvierern gemessenen Nahnebensprechkopplungen im Durchschnitt einen 10 dB geringeren Betrag, als die im gleichen Sternvierer gemessenen NEXT-Kopplungen. Bei ca. 2,25 Prozent der untersuchten Nahnebensprechkopplungen beträgt die mittlere Differenz weniger als 1 dB. In diesen 2,25 Prozent der untersuchten Fälle liefern die Zweidrahtleitungen in benachbarten Sternvierern einen ähnlich großen Nahnebensprechbeitrag auf der Referenzleitung, wie die jeweiligen Leitungspaare im Sternvierer der Bezugsleitung.

Aus den in Abbildungen 3.15 bis 3.17 gezeigten Untersuchungsergebnissen folgt für den praktischen Einsatz von xDSL-Systemen und für die Modellierung von Nahnebensprechstörungen, dass zwischen Übertragungssystemen im gleichen Sternvierer im Mittel die größten Nahnebensprechstörungen auftreten. Im Vergleich dazu ergeben sich im Durchschnitt zwischen Kommunikationssystemen in verschiedenen Sternvierern geringere Nahnebensprechstörungen. Durch die Zunahme des geometrischen Abstandes zwischen zwei Kupferdoppeladern im Kabelbündel, wird das von einer Zweidrahtleitung auf ein benachbartes Leitungspaar übergekoppelte Signal in der Leistung stärker gedämpft. Der Betrag der NEXT-Kopplungsfunktion nimmt gleichbedeutend ab. Nach diesem Gesichtspunkt sind die parallel an einem Kabelbündel eingesetzten xDSL-Systeme möglichst in verschiedenen Sternvierern zu betreiben, um die gegenseitigen Nahnebensprechstörungen zu reduzieren.

Die in Abbildung 3.15 und in den nachfolgenden Grafiken gezeigten Nebensprechkopplungsfunktionen sind zwischen 10 kHz und 42 kHz von extern eingekoppelten Schmalbandstörern überlagert. Diese Störungen werden von elektrischen Geräten, wie z. B. Schaltnetzteilen, in der Umgebung der Zweidrahtleitung verursacht [82]. Um sicherzustellen, dass diese schmalbandigen Störungen nicht auf Nebensprecheffekte zurückzuführen sind, wurden die NEXT-Kopplungsfunktionen in dem in Abbildung 3.12 dargestellten Testnetz und in Relation dazu direkt an der Kabeltrommel in einer störarmen Umgebung gemessen. In Abbildung 3.18 ist beispielhaft für die durchgeführten Messungen die NEXT-Kopplungsfunktion $|H_{NEXT,17,18}(f)|^2$ über der logarithmisch skalierten Frequenzachse dargestellt¹⁶.

¹⁶Die übrigen durchgeführten Messungen weisen die gleiche Charakteristik wie die hier dargestellte Messung auf.

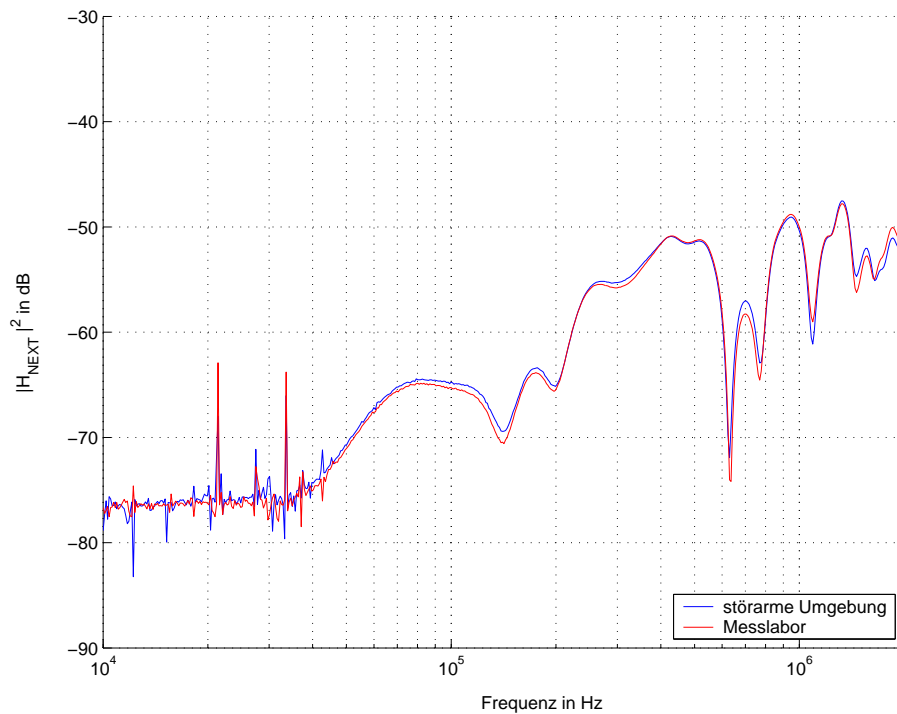


Abbildung 3.18: Gemessene NEXT-Kopplungsfunktion in störrarmer Umgebung in Relation zur Messung im Labor

Die in Abbildung 3.18 dargestellten Messungen zeigen, dass die schmalbandigen Störungen an den Frequenzpunkten 21,38 kHz und 33,57 kHz nur bei den im Labor durchgeführten Messungen auftreten. In dem Labor sind, neben der erforderlichen Messeinrichtung zur Bestimmung der NEXT-Kopplungsfunktionen, weitere elektrische Geräte in Betrieb. Werden die Messungen an dem Kabelbündel in einer Umgebung wiederholt, in der keine anderen elektrischen Einrichtungen als die für die Messungen notwendigen Messgeräte betrieben werden, so treten die schmalbandigen Überhöhungen nicht auf. Aus diesem Ergebnis wird für die weiteren Untersuchungen gefolgert, dass die schmalbandigen Störungen von elektrischen Einrichtung in der Umgebung des Messaufbaus verursacht werden. Diese Effekte sind dadurch nicht auf die charakteristischen Nebensprecheigenschaften des untersuchten Kabelbündels zurückzuführen. Diese Aussage lieferte auch die zusätzlich durchgeführte analytische Betrachtung der Schmalbandstörer. Bei dieser Untersuchung wurden die gemessenen NEXT-Kopplungsfunktionen $|H_{NEXT,i}(f)|^2$ über den betrachteten Frequenzbereich durch die Gleichung

$$|H_{NEXT,i}(f)|^2 = |L_{NEXT,i}(f)|^2 + P_i \cdot \delta[f - f_s] \quad (3.54)$$

angenähert¹⁷. Die zu untersuchenden Störungen treten innerhalb des Frequenzintervalls von 10 kHz bis 60 kHz auf, so dass nur dieser Frequenzbereich bei den Überlegungen betrachtet wird. $|L_{NEXT,i}(f)|^2$ beschreibt den über der logarithmisch skalierten

¹⁷ $\delta(\cdot)$ beschreibt den Einheitsimpuls („unit sample“) [83], [65].

Frequenzachse näherungsweise linear ansteigende Anteil der NEXT-Kopplungsfunktion $|H_{NEXT,i}(f)|^2$. $|L_{NEXT,i}(f)|^2$ wird am Frequenzpunkt f_S ($10 \text{ kHz} < f_S < 60 \text{ kHz}$) von einem Schmalbandstörer der Leistung P_i überlagert. Nach Abbildung 3.18 ist P_i an der Frequenz $f = f_S$ um ca. 12 dB größer, als $|L_{NEXT,i}(f_S)|^2$. Handelt es sich bei $P_i \cdot \delta[f - f_S]$ um eine aus der Umgebung des untersuchten Kabelbündels eingekoppelte periodische Störung gleicher Signalleistung, so tritt dieser Effekt parallel auf allen D gemessenen NEXT-Kopplungsfunktionen am Frequenzpunkt f_S auf. Werden die D Nahnebensprechkopplungsfunktionen aufsummiert, ergibt sich mit der Näherungsgleichung (3.54)

$$|H_{sum}(f)|^2 = \sum_i^D |H_{NEXT,i}(f)|^2 \quad (3.55)$$

$$= \sum_i^D (|L_{NEXT,i}(f)|^2 + P_i \cdot \delta[f - f_S]). \quad (3.56)$$

Mit der konstant angenommenen Signalleistung der eingekoppelten Störung $P_i = P$, folgt für die Summe der D gemessenen NEXT-Kopplungsfunktionen

$$|H_{sum}(f)|^2 = \sum_i^D |L_{NEXT,i}(f)|^2 + \sum_i^D P \cdot \delta[f - f_S] \quad (3.57)$$

$$= \sum_i^D |L_{NEXT,i}(f)|^2 + D \cdot P \cdot \delta[f - f_S]. \quad (3.58)$$

Nach Gleichung (3.58) tritt im Summensignal $|H_{sum}(f)|^2$ am Frequenzpunkt f_S die mit dem Faktor D gewichtete Störung auf. Unter der Annahme, dass nicht alle gemessenen NEXT-Kopplungsfunktionen exakt am Frequenzpunkt f_S einen Sprung in der NEXT-Kopplungsfunktion aufweisen, kann aus Gleichung (3.58) auf die externe Ursache der Spitzen im Verlauf der NEXT-Kopplungsfunktionen geschlossen werden.

Gemäß dieser Ableitung wurden die pro Grundbündel gemessenen NEXT-Kopplungsfunktionen aufsummiert. Abbildung 3.19 zeigt die im ersten Grundbündel berechnete Funktion $|H_{sum}(f)|^2$ in Relation zu der gemessenen NEXT-Kopplungsfunktion $|H_{NEXT,21}(f)|^2$. Dabei weisen die in den weiteren Grundbündeln berechneten Funktionen $|H_{sum}(f)|^2$ das gleiche charakteristische Verhalten, wie die in Abbildung 3.19 dargestellte Funktion auf.

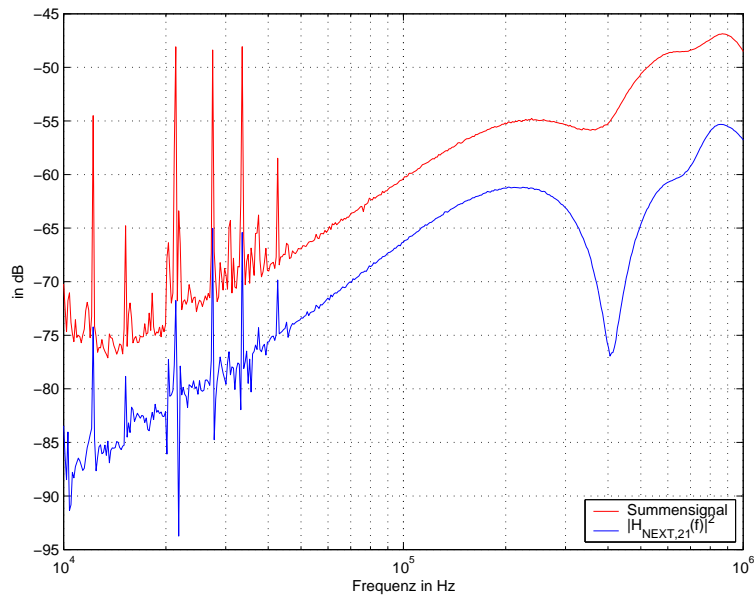


Abbildung 3.19: $|H_{sum}(f)|^2$ in Relation zur gemessenen Funktion $|H_{NEXT,21}(f)|^2$

Das in Abbildung 3.19 dargestellte Ergebnis zeigt, dass die Summenfunktion $|H_{sum}(f)|^2$ und die dargestellte NEXT-Kopplungsfunktion $|H_{NEXT,21}(f)|^2$ an den gleichen Frequenzpunkten f_S schmalbandige Überhöhungen besitzen. Der Betrag der Überhöhungen der Summenfunktion sind größer, als die der Funktion $|H_{NEXT,21}(f)|^2$. Diesem Ergebnis zur Folge, weisen die NEXT-Kopplungsfunktionen des hier betrachteten Grundbündels $|H_{NEXT,21}(f)|^2$ bis $|H_{NEXT,10,1}(f)|^2$ an den gleichen Frequenzpunkten f_S Spitzen im Verlauf auf. Die Untersuchungen der NEXT-Kopplungsfunktionen in Abbildung 3.15 und [32] belegen, dass sich die in einem Kabelbündel gemessenen NEXT-Kopplungsfunktionen in ihrem individuellen Frequenzverlauf unterscheiden. Die Verstärkung der schmalbandigen Spitzen bei der durchgeführten Summation nach Gleichung (3.58) zeigt die äußere Ursache für die schmalbandigen Überhöhungen in den NEXT-Kopplungsfunktionen¹⁸. Dieses analytisch und durch Messung bestätigte Resultat entspricht dem Ergebnis der vorangegangenen Vergleichsmessungen aus Abbildung 3.18.

Die in Abbildung 3.15 dargestellten Messungen der NEXT-Kopplungsfunktionen in einem Grundbündel zeigten, dass der Betrag der NEXT-Kopplungsfunktionen mit zunehmenden Abstand zwischen den betrachteten Kupferdoppeladern abnimmt. Motivation für die im Folgenden dargestellten Untersuchungen war die Analyse der Nahbensprechkopplungen zwischen Leitungspaaren in benachbarten Grundbündeln. Die zwischen dem ersten und zweiten Grundbündel gemessenen NEXT-Kopplungsfunktionen sind exemplarisch in Abbildung 3.20 im doppellogarithmischen Maßstab dargestellt. Das Adernpaar eins bildete bei den Untersuchungen das Referenzadernpaar¹⁹. Fer-

¹⁸Die auf den Zweidrahtleitungen aus der Umgebung eingekoppelten Impulsstörungen werden durch gesonderte Störmodelle modelliert (siehe Abschnitt 2.2).

¹⁹Das Leitungspaar eins wurde bei diesen Untersuchungen als Referenzadernpaar gewählt, um die Ergebnisse der Analyse mit denen der vorangegangenen Untersuchungen in Relation setzen zu

ner zeigt Abbildung 3.20 den mittleren gemessenen Betrag der NEXT-Kopplungsfunktionen zwischen zwei Grundbündeln des Kabelbündels.

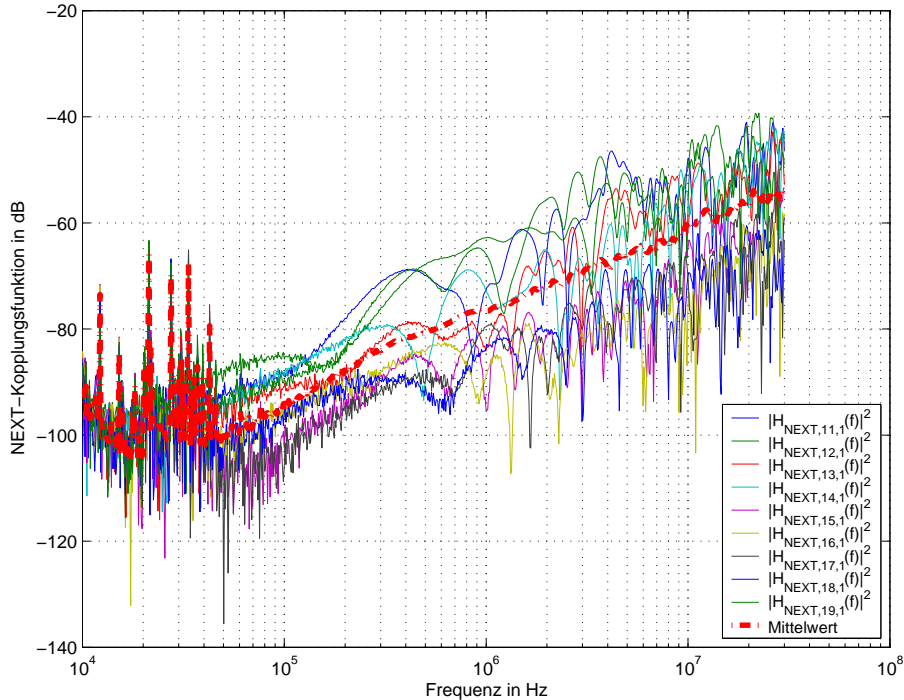


Abbildung 3.20: NEXT-Kopplungen zwischen dem ersten und zweiten Grundbündel

Die Auswertung der zwischen benachbarten Grundbündeln gemessenen NEXT-Kopplungsfunktionen ergab, dass die Nahnebensprechstörungen aus benachbarten Grundbündeln im Mittel um 13,8760 dB stärker, als die Störungen im Grundbündel der Referenzleitung gedämpft werden. Gemäß dieses Ergebnisses werden xDSL-Systeme vorwiegend durch die im gleichen Grundbündel parallel betriebenen Übertragungssysteme gestört. Die xDSL-Standards gehen bei der Modellierung von Nahnebensprechstörungen allgemein davon aus, dass die Leistungsdichte der im Kabelbündel vorhandenen Nebensprechstörer mit der Power-Sum Transferfunktion zu multiplizieren ist (siehe Abschnitt 3.2.2). In Anbetracht der festgestellten Dämpfung von 13,8760 dB wurde der Einfluss von Zweidrahtleitungen in angrenzenden Grundbündeln bei der Berechnung der Power-Sum NEXT-Funktion analysiert. Die Power-Sum NEXT-Funktion bzw. die alternative Power-Sum NEXT-Dämpfung gibt allgemein den Einfluss aller Nahnebensprechstörer auf ein bestimmtes Referenzadernpaar wieder²⁰ [42]. Abbildung 3.21 zeigt die im Grundbündel gemessenen Power-Sum NEXT-Dämpfungen bei einer Leitungslänge von 300 m.

können.

²⁰Die Power-Sum NEXT-Dämpfung ist der Kehrwert der Power-Sum NEXT-Funktion nach Gleichung (3.27)

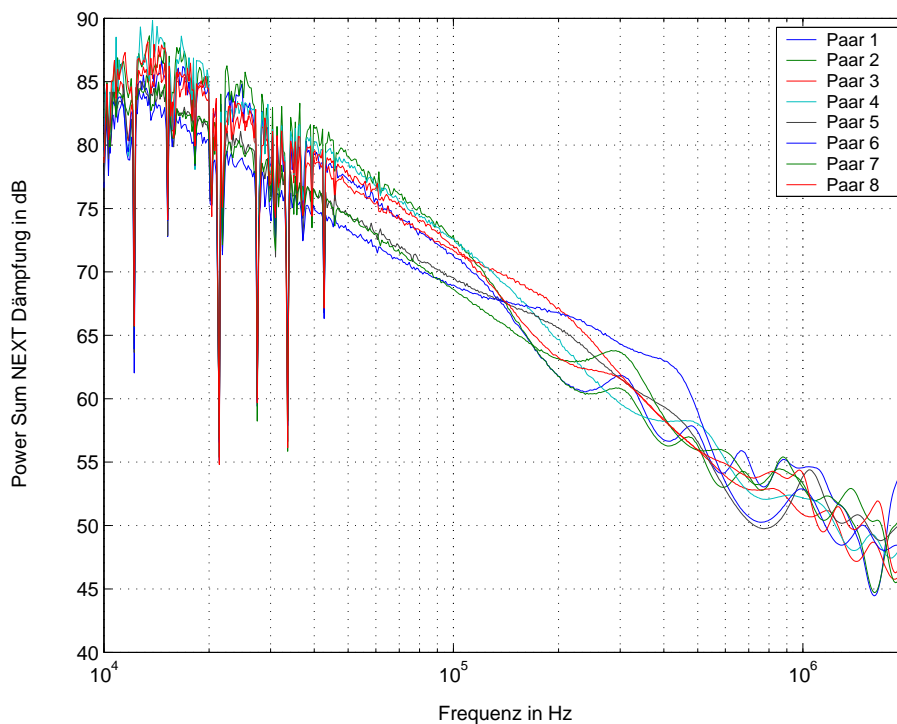


Abbildung 3.21: Power-Sum NEXT-Dämpfungen in einem Grundbündel bei einer Leitungslänge von 300 m

Die Gegenüberstellung der in den Abbildungen 3.15 und 3.21 dargestellten Messergebnisse zeigte, dass der Betrag der Power-Sum NEXT-Dämpfung bzw. der Power-Sum NEXT-Funktion von der im gleichen Sternvierer gemessenen NEXT-Kopplungsfunktion dominiert wird. Nach Abbildung 3.20 tragen die in benachbarten Grundbündeln gemessenen NEXT-Kopplungsfunktionen weniger, als die im Grundbündel der Referenzleitung bestimmten NEXT-Kopplungsfunktionen zur Power-Sum NEXT-Dämpfung bei. Die durchgeführten Untersuchungen beweisen, dass zwischen der Power-Sum NEXT-Dämpfung berechnet aus den NEXT-Beziehungen im gleichen Grundbündel und der Power-Sum NEXT-Dämpfung aus allen Nebensprechbeziehungen des Kabelbündels, eine mittlere Abweichung von 0,018 dB besteht. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass der Einfluss von Zweidrahtleitungen benachbarter Grundbündel in einer ersten Näherung vernachlässigt werden kann. Demzufolge wird die Modellierung und die Abschätzung der potentiell auf einer Kupferzweidrahtleitung auftretenden Nahbensprechstörungen in der Komplexität reduziert.

Wie die Abbildungen 3.15, 3.20 und 3.21 zeigen, variieren die Beträge der NEXT- und der Power-Sum NEXT-Kopplungsfunktionen über die einzelnen Zweidrahtleitungen eines Kabelbündels. Entsprechend dieser Beträge führen die auf den Doppeladernpaaren betriebenen Übertragungssysteme zu unterschiedlich großen Nahbensprechstörungen auf der betrachteten Kupferzweidrahtleitung (Referenzleitung). Die Nahbensprechmodelle der xDSL-Standards verwenden eine aus Messungen empirisch abgeleitete Nahbensprechkopplungsfunktion (siehe Abschnitt 3.2.2). Die Analyse und Reproduktion der individuell in einem Kabelbündel auftretenden Ortsabhängigkeit der

Nahnebensprechkopplungen ist mit den bisherigen standardisierten Nahnebensprechmodellen explizit nicht möglich. Dementsprechend kann die Leistungsfähigkeit eines xDSL-Systems bei einem unterschiedlich beschalteten Kabelbündel mit diesen Modellen nicht untersucht werden²¹.

Zur Verifikation der in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen NEXT-Kopplungsfunktionen der Standardnebensprechmodelle wurden weitere Untersuchungen an realen Kabeln durchgeführt. Die NEXT-Kopplungsfunktionen der Standardmodelle wurden durch die Regressionsgerade des gemessenen ein Prozent Worst-Case Falles festgelegt²² [30], [32]. Um die Simulationsgenauigkeit der standardisierten Nahnebensprechmodelle im Hinblick des hier betrachteten Kabelbündels zu untersuchen, wurden die in Abbildung 3.21 dargestellten Dämpfungen durch die jeweilige Regressionsgerade angenähert. In Tabelle 3.2 sind die Geradengleichungen der in Abbildung 3.22 dargestellten Power-Sum NEXT-Dämpfungen und deren mittlere Abweichungen vom ETSI TM6 Nahnebensprechmodell [28] zusammengefasst.

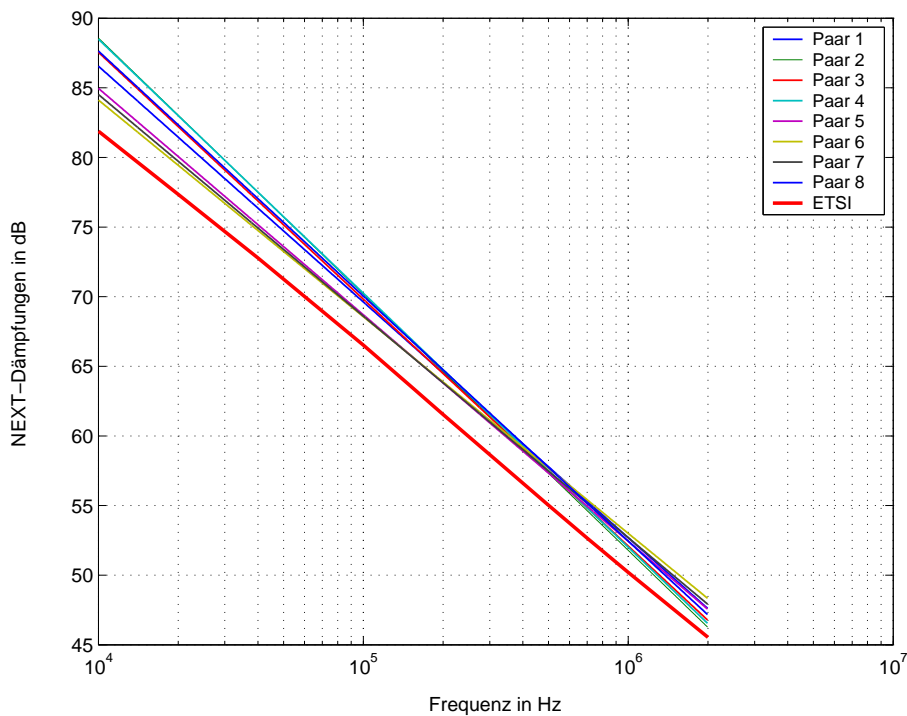


Abbildung 3.22: Approximierte Power-Sum NEXT-Dämpfungen in Relation zur NEXT-Dämpfung des ETSI Nahnebensprechmodells bei einer Leitungslänge von 300 m

²¹In diesem Zusammenhang wird davon ausgegangen, dass bei bisherigen Labortests von xDSL-Systemen die in der Realität auftretenden Nahnebensprechstörungen durch einen Störsignalgenerator nach den Standardnebensprechmodellen generiert werden.

²²Bei der Berechnung der Regressionsgerade, wie auch bei der Darstellung der Power-Sum Funktionen, wird von einer logarithmisch skalierten Frequenzachse ausgegangen.

Paar Nr.	Geradengleichung	Mittlere Abweichung in dB
1	$-7,354 \cdot \log(f) + 154,291$	3,1921
2	$-7,990 \cdot \log(f) + 162,167$	3,5299
3	$-7,702 \cdot \log(f) + 158,487$	3,2713
4	$-7,924 \cdot \log(f) + 161,477$	3,6245
5	$-7,063 \cdot \log(f) + 150,015$	2,3705
6	$-6,758 \cdot \log(f) + 146,370$	2,3367
7	$-6,912 \cdot \log(f) + 148,181$	2,3266
8	$-7,643 \cdot \log(f) + 158,033$	3,5121

Tabelle 3.2: Geradengleichungen der approximierten Power-Sum NEXT-Dämpfungen und mittlere Abweichungen vom ETSI Nahbensprechmodell

Die Untersuchungsergebnisse der Graphiken 3.21, 3.22 und der Tabelle 3.2 zeigen, dass die in dem hier betrachteten Kabelbündel A-2Y(L) $50 \times 2 \times 0,4$ mm gemessenen Power-Sum NEXT-Dämpfungen im einzelnen größer als die Nahbensprechdämpfungen des ETSI-Nahbensprechmodells sind. In diesen Fällen liegt die Leistung der in dem realen Kabelbündel auftretenden Nahbensprechstörungen unter den mit dem Modell simulierten Störungen. Das ETSI-Nahbensprechmodell geht auf Grund des betrachteten ein Prozent Worst-Case Falles und der vereinfachenden Näherungen aus Abschnitt 3.2.2 von einer, im Vergleich zur Realität, zu pessimistischen Störumgebung aus. Diese Diskrepanz führt zu der in Abschnitt 2.3 beschriebenen ineffizienten Auslastung des Kabelbündels oder zu einer im Hinblick der auftretenden Nahbensprechstörungen unrealistischen Störumgebung für xDSL-Systemtests. Die in den Labortests für das zu testende Modem ermittelten Leistungswerte wären folglich nur bedingt auf die realen Verhältnisse übertragbar.

Gemäß Gleichung (3.28) und den in Abbildung 3.15 dargestellten Untersuchungen ist die Leistungsdichte der Nahbensprechstörung auf einer Kupferzweidrahtleitung von der geometrischen Lage der störenden Übertragungssysteme im Kabelbündel abhängig. Für die detaillierte Untersuchung dieses Zusammenhangs wurde, neben den bereits analysierten Beträgen der NEXT-Kopplungsfunktionen, die tatsächlich auf einer Doppelader induzierten Nahbensprechstörungen messtechnisch bestimmt. Bei diesen Untersuchungen wurde die Konstellation der störenden Übertragungssysteme im Kabel variiert. Die in den Abbildungen 3.23 und 3.24 dargestellten Untersuchungsergebnisse zeigen die auf der Kupferdoppelader Nummer eins des Kabelbündels A-2Y(L) $50 \times 2 \times 0,4$ mm gemessenen Nebensprechleistungsdichten²³. Die Messungen wurden nach dem in Abbildung 3.14 gezeigten Messaufbau bestimmt, wobei anstatt des Netzwerkanalysators ein Spektrumanalysator verwendet wurde. Die Referenzleitung wurde für die Messungen mit der charakteristischen Impedanz abgeschlossen, um Störeffekte durch Signalreflexionen zu reduzieren. Als „Störquellen“ wurden SHDSL-Systeme eingesetzt, die ein Sendespektrum von 0 Hz bis ca. 240 kHz besitzen [85].

²³Um die hier diskutierten Untersuchungsergebnisse mit den vorhergehenden Ergebnissen in Relation setzen zu können, wurde für diese Analysen wiederum die Kupferzweidrahtleitung eins als Referenzadernpaar gewählt.

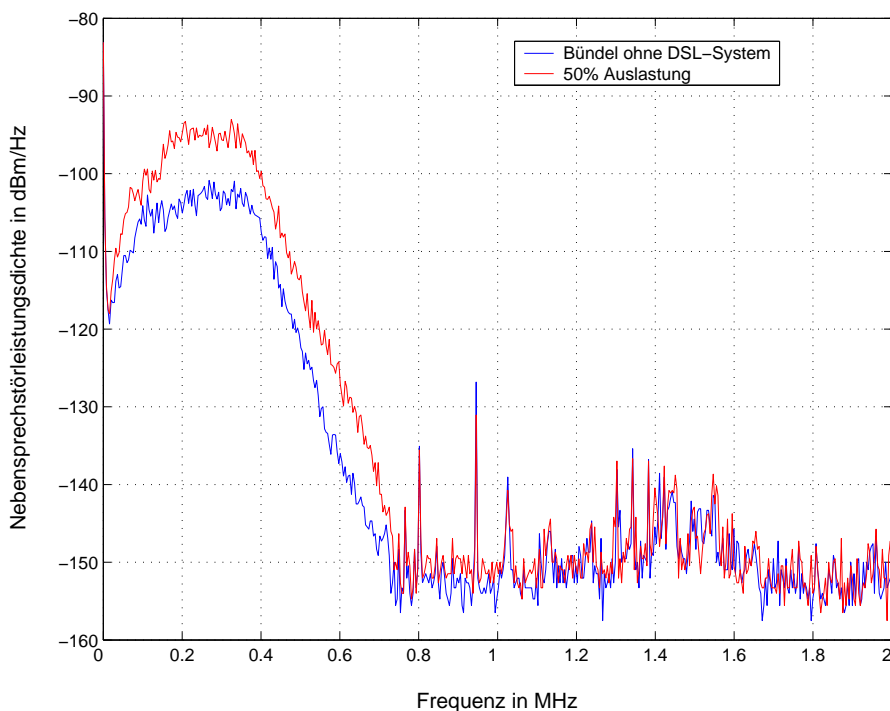


Abbildung 3.23: Nebensprechstörung auf einer Doppelader bei 50% Belegungsichte und ohne SHDSL-System im Grundbündel

Der in Abbildung 3.23 blau dargestellte Graph zeigt die auf der Referenzleitung gemessene Leistungsdichte der Nebensprechstörung für den Fall, dass im Grundbündel der Referenzleitung keine weiteren SHDSL-Systeme betrieben werden. Jede zweite Doppelader der benachbarten Grundbündel ist jeweils mit einem SHDSL-System beschaltet. Die auf der Referenzleitung messbare Nebensprechstörung weist den um die Nebensprechdämpfungen reduzierten Verlauf der Sendeleistungsdichtespektren der störenden SHDSL-Systeme auf. Die blau dargestellte Kurve besitzt einen Spitzenwert von ca. -102 dBm/Hz. Wird zusätzlich jede zweite Doppelader im Grundbündel der Referenzleitung jeweils mit einem SHDSL-System beschaltet, ergibt sich der in Abbildung 3.23 rot dargestellte Verlauf der Nebensprechstörung. In dieser Konstellation weist das Kabelbündel eine Belegungsichte von 50 Prozent auf. Diese Beschaltung ist typisch für das deutsche Telefonanschlussnetz. Die störenden SHDSL-Systeme im Grundbündel der Referenzleitung sind dafür verantwortlich, dass ein Spitzenwert der Nebensprechstörleistungsdichte von ca. -95 dBm/Hz zu messen ist. Die zusätzliche Beschaltung des Grundbündels führte damit zu einer Erhöhung der maximalen Störleistungsdichte um ca. 7 dBm/Hz.

Nach dem Entfernen des SHDSL-System aus dem Sternvierer der Referenzleitung ergab sich die in Abbildung 3.24 grün dargestellte Leistungsdichte der Nebensprechstörung. Dabei ist jede zweite Doppelader dieses Grundbündels weiterhin mit SHDSL-Systemen beschaltet. Zusätzlich zeigt Abbildung 3.24 ebenfalls die gemessenen Leistungsdichten aus Abbildung 3.23.

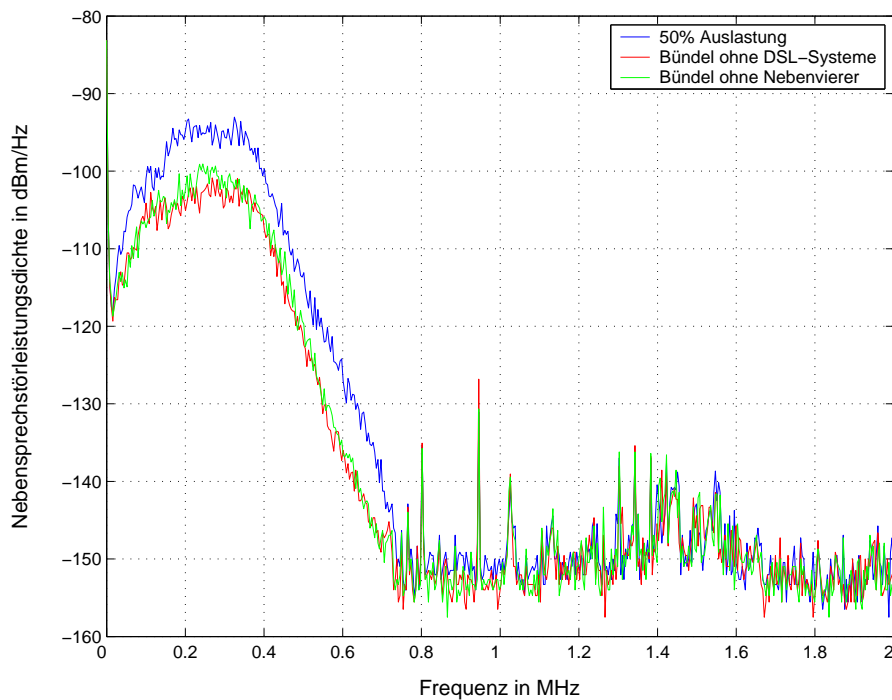


Abbildung 3.24: Nebensprechleistungsichte in Abhängigkeit der Belegungsichte von SHDSL-Systemen

Durch das Entfernen des SHDSL-Systems auf dem unmittelbar benachbarten Adernpaar (Imvierer) ist auf dem Referenzadernpaar eine maximale Nebensprechstörleistung von ca. -100 dBm/Hz zu messen. Dies entspricht ungefähr der maximalen Störleistung die sich ergibt, wenn im Grundbündel der Referenzleitung keine weiteren SHDSL-Systeme betrieben werden (roter Graph). Dieses Messergebnis spiegelt die Aussagen von R. van den Brink [42] und T. Starr [32] wieder, dass im Imvierer die größten Nebensprechstörungen auftreten. Die hier dargestellten Untersuchungsergebnisse der induzierten Leistungsdichten bestätigen die in den Abbildungen 3.20 dargestellten Resultate, die sich auf die NEXT-Kopplungen bezogen.

Resumee der Untersuchungen

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die einzelnen Kupferdoppeladern eines Kabelbündels individuell größere Nahbessprechdämpfungen, als die von ETSI TM6 und ANSI T1E1 definierten ein Prozent Worst-Case Power-Sum Modelle aufweisen. Bei diesen Modellen handelt es sich um statistische Modelle, deren Parameter durch Messungen an verlegten Kabelbündeln bestimmt wurden. Per Definition reproduzieren diese Modelle die auftretenden Nebessprechstörungen in der Weise, dass 99 Prozent der verlegten Kabelbündel kleinere oder maximal die mit dem Modell simulierten Nebessprechstörungen aufweisen (siehe Abschnitt 3.2.2 und 3.3.2). Wie die durchgeführten Untersuchungen zeigen, können die Power-Sum Nebessprechdämpfungen bestimmter Doppeladern im einzelnen um mehr als 3 dB von dem 99 Prozent-Wert des Simulationsmodells abweichen. Aus dieser Diskrepanz ergeben sich für den prakti-

schen Einsatz von xDSL-Systemen folgende Probleme:

1. xDSL-Systeme werden in einer Nebensprechstörumgebung getestet, die nicht den individuellen Verhältnissen auf einem Kabel entspricht. Die im Labor ermittelten Leistungswerte des Systems können nur bedingt auf die speziell in einem Kabelbündel vorherrschenden Gegebenheiten übertragen werden.
2. Weisen reale Kabelbündel größere Nebensprechdämpfungen als das ein Prozent Worst-Case Power-Sum Modell auf (siehe Abbildung 3.22), wird bei der Abschätzung der Nebensprechstörungen zur Netzplanung von einer zu pessimistischen Störumgebung ausgegangen. Für ein bestimmtes Signal-Rauschleistungsverhältnis auf einer Kupferzweidrahtleitung wird das Kabelbündel nach der Simulation mit einer geringeren Anzahl von Übertragungssystemen beschaltet, als das unter den realen Bedingungen möglich ist. Der daraus resultierende kostenineffiziente Betrieb der Anschlussleitungen ist eine Folge der Simulationsungenauigkeiten des ein Prozent Worst-Case Power-Sum Modells.

Die zwischen zwei Kupferdoppeladern eines Kabelbündels auftretenden Nebensprechkopplungen können durch eine Log-normal-Verteilung bzw. durch eine Gamma-Verteilung modelliert werden [45], [53]. Die Parameter der Wahrscheinlichkeitsverteilungen sind durch Messungen an realen Kabelbündeln zu bestimmen. Diese Verteilungen sind allerdings nur Näherungen für die im Kabelbündel auftretenden Nebensprechdämpfungen. Darüber hinaus ist die Verteilung der Summe log-normal verteilter Variablen derzeit noch ein ungelöstes mathematisches Problem [34].

Das ANSI ein Prozent Worst-Case Power-Sum Modell setzt die in einem Kabelbündel vorhandene Anzahl von N Störern in Relation zu 49 potentiell möglichen Störern eines 50-paarigen Kabelbündels (siehe Gleichungen (3.36), (3.79)). Die Kabel des Anschlussnetzes werden derzeit nicht vollständig mit xDSL-Systemen beschaltet. Auf Grund dessen, dass das ein Prozent Worst-Case Power-Sum Modell bei nicht vollständig belegten Kabelbündeln Simulationsungenauigkeiten aufweisen können, kommt es zu Differenzen zwischen tatsächlich messbaren und simulierten Nebensprechstörungen [38]. Zu den Simulationsungenauigkeiten trägt auch bei, dass die Sendeleistungsdichten auf realen Anschlussleitungen von den in den Standards festgelegten Leistungsdichteprofilen abweichen können (siehe Abbildung 3.8 und 3.9). Die Simulationsungenauigkeiten führen wiederum zur bedingten Übertragbarkeit der im Labor ermittelten Performancewerte von xDSL-Systeme auf die realen Gegebenheiten.

Die in Kapitel 3.2.3 dargestellten Messungen verdeutlichen, dass die auf einer Doppelader induzierte Nebensprechstörleistung von der Lage der störenden Leitungen im Kabelbündel abhängig ist. Die auf den unmittelbar benachbarten Leitungspaaren betriebenen xDSL-Systeme liefern den größten Beitrag zu der Nebensprechstörung auf einer Zweidrahtleitung. Die individuelle Beschaltung eines (realen) Kabelbündels wird durch die derzeitigen Nebensprechmodelle der Standards nicht explizit berücksichtigt. Die Simulation und die Reproduktion von Nebensprechstörungen bestimmter Beschaltungsszenarien lassen sich mit den derzeitigen standardisierten Modellen dementsprechend nur in eingeschränkter Weise durchführen.

Die Ableitung der Spannungstransferfunktionen nach Gleichung (3.5) ging von identischen Leitungsbelägen R, L, C, G aus. Bei realen Kabelbündeln können die Leitungsbeläge der einzelnen Zweidrahtleitungen voneinander abweichen. Ferner führen Alterungseffekte der Kabel und Umwelteinflüsse dazu, dass sich die Übertragungseigenschaften der Doppeladernpaare eines Kabelbündels voneinander unterscheiden. Die Diskrepanz zwischen den vereinfachenden Annahmen bei der Ableitung des Nebensprechmodells und den realen Gegebenheiten im Kabelbündel können zu Simulationsungenauigkeiten führen.

Im Anschlussnetz werden nach Angaben der Deutschen Telekom AG in Zukunft immer mehr xDSL-Systeme betrieben werden. Ferner kommen neben der derzeit am häufigsten verwendeten ADSL-Technologie weitere xDSL-Techniken, wie SHDSL und VDSL, verstärkt im Zugangsnetz zum Einsatz. Für den Test und den optimalen Einsatz dieser Systeme sind möglichst genaue Aussagen über die in realen Kabelbündeln auftretenden Nebensprechstörungen nötig. Dies kann mit einem gegenüber den bisherigen Modellen optimierten Nebensprechmodell erreicht werden. Dieses verbesserte Modell hat neben den für das Nebensprechen verantwortlichen physikalischen Effekten auch die jeweilige individuelle Beschaltung eines Kabelbündels zu berücksichtigen. Auf Grund dieser Motivation wird in Kapitel 4 ein Modell vorgeschlagen, welches diese geforderten Randbedingungen erfüllt.

3.3 Fernnebensprechen (FEXT)

Die an einem Kabelbündel parallel betriebenen xDSL-Systeme werden von Nah- und Fernnebensprechen gestört (siehe Abschnitt 3.1). In Abschnitt 3.3.1 wird die Modellierung eines einzelnen Fernnebensprechstörers (FEXT-Störer) im Kabelbündel betrachtet. Die Modellierung mehrerer Fernnebensprechstörer im Kabel durch entsprechende Modelle der xDSL-Standards von ETSI und ANSI wird in Abschnitt 3.3.2 diskutiert. Eine Abschätzung der Beträge der NEXT- und äquivalenten FEXT-Funktionen in einem Kabelbündel erfolgt Abschnitt 3.3.3. Die Untersuchung, in wie weit FEXT in Relation zu NEXT bei der Modellierung von Nebensprechstörungen berücksichtigt werden muss, stellt die Motivation für die auf Messungen basierenden Betrachtungen in Abschnitt 3.3.3 dar.

In Abbildung 3.25 ist das Prinzip des Fernnebensprechens zwischen zwei Kupferdoppeladern dargestellt.

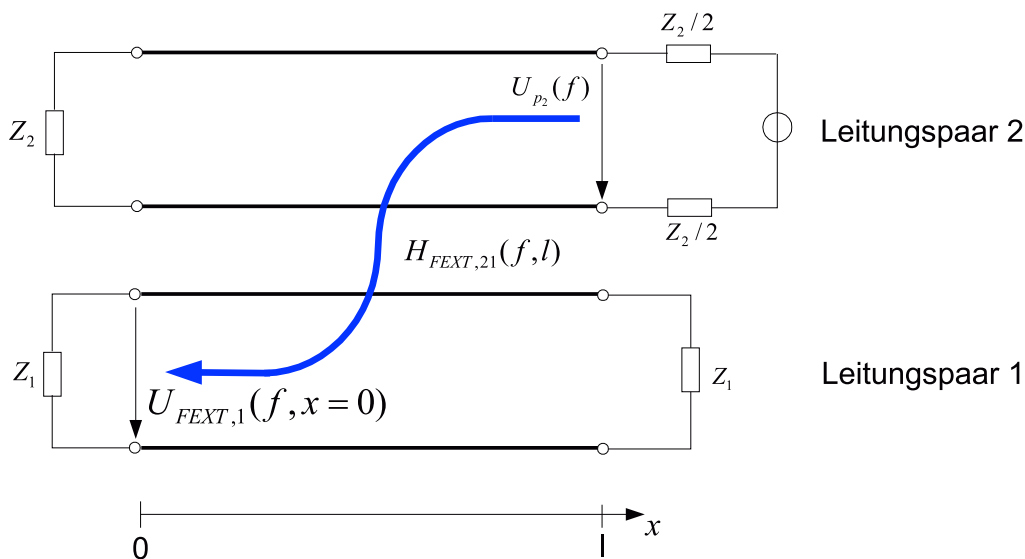


Abbildung 3.25: Prinzip des Fernnebensprechens zwischen zwei Kupferdoppeladern

Fernnebensprechstörungen werden durch Sender verursacht, die aus Sicht des gestörten Empfängers am gegenüberliegenden Kabelende an benachbarten Adernpaaren betrieben werden [32], [56]. In der in Abbildung 3.25 dargestellten Skizze repräsentiert $U_{p_2}(f)$ die Signalspannung des störenden Übertragungssystems. Die Impedanzen Z_1 und Z_2 stellen die Eingangswiderstände der an den Leitungen angeschlossenen Übertragungssysteme dar. Die zu den Fernnebensprechstörungen beitragenden Systeme senden in einem Frequenzband, in dem das dadurch gestörte System Nutzsignale empfängt. Der beim Fernnebensprechen zwischen den Kupferdoppeladern auftretende Energietransfer wird analytisch durch die Fernnebensprechübertragungsfunktion (FEXT-Übertragungsfunktion) $H_{FEXT}(f, x)$ oder äquivalent durch die Fernnebensprechdämpfung $1/H_{FEXT}(f, x)$ beschrieben.

3.3.1 Fernnebensprechmodell für Einzelstörer

Die theoretische Ableitung des Fernnebensprechens erfolgt äquivalent zu den bereits beschriebenen Nahnebensprechstörungen. Die in Abbildung 3.25 dargestellte Anordnung aus zwei ungeschirmten Kupferdoppeladern bildet die Basis für die folgenden Überlegungen. Wie im Fall des Nahnebensprechens sind die zwischen den Adernpaaren vorhandenen parasitären kapazitiven und induktiven Kopplungen und die sich auf der Zweidrahtleitung zwei ausbreitende Spannung $U_{p_2}(f)$ dafür verantwortlich, dass auf dem Adernpaar eins eine Spannung $U_{FEXT}(f, l)$ (Fernnebensprechspannung, FEXT-Spannung) induziert wird. Die Fourier-Transformierte der FEXT-Spannung am Anfang der Kupferdoppelader eins lautet [32], [37] - [40]:

$$U_{FEXT,1}(f, x = 0) = H_{FEXT,21}(f, l) \cdot U_{p_2}(f) \quad (3.59)$$

$$U_{FEXT,1}(f, x = 0) = j2\pi f \cdot U_{p_2}(f) \cdot \int_0^l X_{21}(f, x) \cdot T_1(x, f) \cdot T_2(l - x, f) dx. \quad (3.60)$$

Die Spannungs-Übertragungsfunktion des Fernnebensprechens

$$H_{FEXT,21}(f, x = 0) = j2\pi f \cdot \int_0^l X_{21}(f, x) \cdot T_1(x, f) \cdot T_2(l - x, f) dx \quad (3.61)$$

bildet die Signalspannung $U_{p_2}(f)$ des Nachbaradernpaares zwei (Ursachengröße) auf die Spannung der Fernnebensprechstörung $U_{FEXT,1}(f, l)$ (Wirkungsgröße) am gegenüberliegenden Ende des Adernpaares eins ab. Der Faktor $j2\pi f$ in Gleichung (3.61) trägt der Induktionsgleichung als Ursache der Fernnebensprechstörung auf dem Leitungspaar zwei Rechnung.

Die Spannungstransferfunktionen lauten nach Gleichung (3.5):

$$T_1(x, f) = \exp[-\gamma(f)x] \quad (3.62)$$

$$T_2(l - x, f) = \exp[-\gamma(f)(l - x)]. \quad (3.63)$$

$T_1(f, x)$ reicht vom „Induktionsort“ auf der ersten Zweidrahtleitung bis zum Empfänger am Kabelanfang. $T_2(l - x, f)$ beschreibt die Ausbreitung der Signalspannung auf dem Adernpaar zwei. Unter der Voraussetzung, dass die Leitungspaare mit ihrer charakteristischen Impedanz abgeschlossen sind und identische Leitungsbeläge aufweisen, ergibt sich für das Produkt der Spannungstransferfunktionen der Ausdruck

$$T_1(x, f) \cdot T_2(l - x, f) = \exp[-\gamma(f)l]. \quad (3.64)$$

Mit Gleichung (3.64) folgt unter der Voraussetzung (3.11) für die Spannungs-Übertragungsfunktion der Fernnebensprechstörung

$$H_{FEXT,21}(f, x = 0) = j2\pi f \cdot \exp[-\gamma(f)l] \cdot \int_0^l X_{21}(x) dx \quad (3.65)$$

bzw. für die Fourier-Transformierte der induzierten Spannung am Anfang des Leitungspaars eins

$$U_{FEXT,1}(f, x = 0) = j2\pi f \cdot \exp[-\gamma(f) l] \cdot \int_0^l X_{21}(x) dx \cdot U_{p_2}(f). \quad (3.66)$$

Bei dem Sendesignal $U_{p_2}(f)$ handelt es sich um eine statistische Größe, die im Frequenzbereich durch ihr Leistungsdichtespektrum $S_{Störer,2}(f)$ beschrieben wird. Die induzierte Spannung der FEXT-Störung ist nach Gleichung (3.66) von $U_{p_2}(f)$ abhängig, so dass es sich bei $U_{FEXT,1}(f, x = 0)$ ebenfalls um eine statistische Größe handelt²⁴.

Die Leistungsdichte der Fernnebensprechstörung auf der Zweidrahtleitung zwei berechnet sich äquivalent zu Gleichung (3.14) nach dem Ansatz [63], [64]

$$S_{FEXT,1}(f) = H_{FEXT,21}(f, l) \cdot H_{FEXT,21}(f)^* \cdot S_{Störer,2}(f) \quad (3.67)$$

$$= |H_{FEXT,21}(f, l)|^2 \cdot S_{Störer,2}(f). \quad (3.68)$$

Der mittlere quadratische Betrag $|H_{FEXT,21}(f)|^2$ wird im Weiteren als FEXT-Kopplungsfunktion bezeichnet. In der hier betrachteten Anordnung ist diese Kopplungsfunktion zwischen den Doppeladernpaaren eins und zwei nach Gleichung (3.65) durch

$$|H_{FEXT,21}(f, l)|^2 = 4\pi^2 f^2 \exp[-2\alpha(f) l] \int_0^l \int_0^l \text{Cov}\{X_{21}(x), X_{21}(y)\} dx dy \quad (3.69)$$

gegeben. Unter der Voraussetzung (3.11) kann für Gleichung (3.69) weiter gefolgert werden:

$$|H_{FEXT,21}(f, l)|^2 \approx 4\pi^2 f^2 \cdot \exp[-2\alpha(f) l] \int_0^l \int_0^l k_f \delta(x - y) dx dy \quad (3.70)$$

$$\approx 4\pi^2 f^2 \cdot k_f \cdot l \cdot \exp[-2\alpha(f) l] \quad (3.71)$$

Gleichung (3.71) stellt näherungsweise die mittlere Leistungsübertragungsfunktion der Fernnebensprechstörung zwischen zwei Leitungspaaren dar. Bei der Kopplungskonstanten k_f handelt es sich um eine Zufallsvariable, welche die jeweilige FEXT-Kopplungsfunktion skaliert. k_f stellt das Pendant zur Kopplungskonstanten k_n der Nahnebensprechstörung dar, und kann wie diese über die einzelnen Leiterpaare eines Bündelkabels variieren (siehe Abschnitt 3.2.1). Im Gegensatz zur Leistungsübertragungsfunktion des Nahnebensprechens ist $|H_{FEXT,21}(f, x = 0)|^2$ proportional zu f^2 und steigt damit auf der logarithmisch skalierten Frequenzachse mit 20 dB/Dekade an [32], [56].

Die Leistungsdichte der Fernnebensprechstörung auf dem Leitungspaar eins berechnet sich näherungsweise mit Gleichung (3.71) nach

$$S_{FEXT,1}(f) \approx 4\pi^2 f^2 k_f l \cdot \exp[-2\alpha(f) l] \cdot S_{Störer,2}(f). \quad (3.72)$$

²⁴Fernebensprechen wird wie Nahnebensprechen als eine statistische Rauschstörung (Zufallsprozess) betrachtet [37].

Die Gleichung (3.72) entspricht dem Fernnebensprechmodell für den Fall eines einzelnen Fernnebensprechstörers im Kabelbündel. Die von einem Sender am gegenüberliegenden Kabelende ausgehende Fernnebensprechstörung wird um den Anteil $\exp[-2\alpha(f)l]$ reduziert. Für die Signalübertragung wirkt sich eine hohe Leitungsdämpfung negativ aus. Zur Reduzierung von Fernnebensprechstörungen ist eine hohe Leitungsdämpfung aber positiv zu bewerten [56].

3.3.2 FEXT-Modelle für mehrere FEXT-Störer

In einem realen Kabelbündel tragen die Sendesignale auf mehreren Zweidrahtleitungen zu der Fernnebensprechstörung auf einem bestimmten Leitungspaar i bei. Die einzelnen Teil-Fernnebensprechbeiträge summieren sich zu einer resultierenden (Gesamt-) Fernnebensprechstörung auf dem Doppeladernpaar i (siehe Abbildung 3.26).

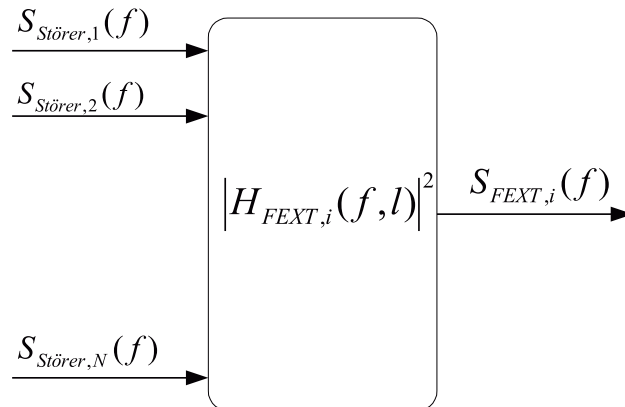


Abbildung 3.26: Systemtheoretisches Blockschaltbild des Fernnebensprechens auf ungeschirmten Kupferdoppeladern

Für die Ableitung des Fernnebensprechmodells (FEXT-Modell) bei mehreren im Kabelbündel vorhandenen FEXT-Störern wird für die Modellierung von den folgenden vereinfachenden Annahmen ausgegangen [32], [37]:

1. Die Sendesignale benachbarter xDSL-Systeme sind voneinander statistisch unabhängig.
2. Die Übertragungssysteme, welche die Fernnebensprechstörungen auf einer Kupferdoppelader des Kabelbündels verursachen, besitzen das gleiche Leistungsdichtespektrum.
3. Die Leitungsbeläge R, L, C, G der Doppeladernpaare im Kabelbündel sind identisch.
4. Die Adernpaare besitzen alle die gleiche Leitungslänge l .

Diese Annahmen sind das Pendant zu den vereinfachenden Näherungen bei der Ableitung des Nahnebensprechmodells in Abschnitt 3.2.2. Die statistische Unabhängigkeit der Sendesignale ist dabei nach R. van den Brink erfüllt [42]. In einem Kabelbündel des Anschlussnetzes werden in der Regel Übertragungssysteme verschiedener Technologie eingesetzt, so dass die zweite Voraussetzung in der Realität nur eingeschränkt gültig ist. Darüberhinaus führen Fertigungstoleranzen und Umwelteinflüsse dazu, dass die Zweidrahtleitungen realer Kabelbündel unterschiedliche Leitungsbeläge aufweisen. Um die Komplexität des Modells zu reduzieren, wird trotz der Diskrepanzen zu den realen Verhältnissen von den oben getroffenen Annahmen ausgegangen [32], [37].

Unter den obigen Voraussetzungen folgt für die auf das Adernpaar i bezogene Leistungsübertragungsfunktion des Fernnebensprechens nach Gleichung (3.71) bei N statistisch unabhängigen FEXT-Störern im Kabelbündel²⁵

$$|H_{FEXT,i}(f)|^2 \approx 4\pi^2 f^2 l \cdot \exp[-2\alpha(f)l] \cdot \sum_{j=1}^N k_{f_j} \quad \text{für } i \neq j. \quad (3.73)$$

Die FEXT-Kopplungskonstanten k_{f_j} sind voneinander statistisch unabhängig [37]. $|H_{FEXT,i}(f)|^2$ ist nach Gleichung (3.73) die Summe über N statistisch unabhängige Zufallsvariablen. Wie im Fall des Nahnebensprechens, können in einem Kabelbündel mehrere störende Transceiver zu den Fernnebensprechstörungen auf der Zweidrahtleitung i beitragen. Die Power-Sum FEXT-Kopplungsfunktion bei N Störern berechnet sich äquivalent zu Gleichung (3.27) nach

$$|H_{FEXT,i}(f)|^2 = \sum_{j=1}^N |H_{FEXT,ij}(f)|^2 \quad \text{mit: } i \neq j \quad (3.74)$$

Mit dem Erwartungswert erster Ordnung \bar{k}_f der FEXT-Kopplungskonstanten ergibt sich für die (mittlere) Kopplungsfunktion der FEXT-Störung näherungsweise

$$|\bar{H}_{FEXT}(f)|^2 \approx 4\pi^2 f^2 l \cdot \exp[-2\alpha(f)l] \cdot \bar{k}_f. \quad (3.75)$$

Für die (mittlere) induzierte FEXT-Leistungsdichte folgt der Ausdruck

$$S_{FEXT}(f) = |\bar{H}_{FEXT}(f)|^2 \cdot S_{Störer}(f) \quad (3.76)$$

$$\approx 4\pi^2 f^2 l \cdot \exp[-2\alpha(f)l] \cdot \bar{k}_f \cdot S_{Störer}(f). \quad (3.77)$$

$\exp[-2\alpha(f)l]$ entspricht nach Gleichung (3.5) dem quadratischen Betrag der Spannungstransferfunktion der jeweiligen Doppelader für eine Leitungslänge l . Die FEXT-Leistungsdichte lautet mit der Spannungstransferfunktion der Doppelader allgemein

$$S_{FEXT}(f) \approx 4\pi^2 f^2 \cdot l \cdot \bar{k}_f \cdot |T_i(f, l)|^2 \cdot S_{Störer}(f). \quad (3.78)$$

²⁵Für eine einfachere Notation wird auf die explizite Angabe der Längenabhängigkeit der Funktion $|H_{FEXT,i}(f, x)|^2$ verzichtet. $|H_{FEXT}(f, x)|^2$ wird auf den Kabelanfang $x = 0$ bezogen.

ANSI-Fernnebensprechmodell

In dem von ANSI verwendeten Fernnebensprechmodell wird der Term $4\pi^2 \cdot \bar{k}_f$ aus Gleichung (3.78) in der Konstanten

$$K_{FEXT} = 4\pi^2 \cdot \bar{k}_f \quad (3.79)$$

zusammengefasst. Der Wert dieser Konstanten wurde nach Messungen an Kabelbündeln der USA auf einen Wert von

$$K_{FEXT} = \left(\frac{N}{49}\right)^{0,6} \cdot 9 \cdot 10^{-20} \quad (3.80)$$

für $N < 50$ festgelegt [25], [29], [32]. Mittels K_{FEXT} folgt für die Leistungsdichte des Fernnebensprechens näherungsweise

$$S_{FEXT}(f) \approx K_{FEXT} \cdot f^2 \cdot l \cdot |T_i(f, l)|^2 \cdot S_{Störer}(f) \quad (3.81)$$

$$\approx \left(\frac{N}{49}\right)^{0,6} \cdot 9 \cdot 10^{-20} \cdot f^2 \cdot l \cdot |T_i(f, l)|^2 \cdot S_{Störer}(f) \quad (3.82)$$

[32]. Gleichung (3.82) repräsentiert das ANSI ein Prozent Worst-Case Power-Sum FEXT-Modell. Der Wert der Konstanten K_{FEXT} wurde aus Messungen an realen Kabelbündeln in der Weise festgelegt, dass 99 Prozent der untersuchten Kabelbündel kleinere oder maximal die mit dem Modell simulierten Fernnebensprechstörungen aufweisen.

ETSI-Fernnebensprechmodell

Für die in Europa verlegten Kabelbündel des Telefonanschlusnetzes definierte ETSI eine FEXT-Kopplungskonstante von

$$K_{FEXT} = 10^{-45/20} \approx 0,0056 \quad (3.83)$$

[24], [28]. Die empirische Konstante K_{FEXT} skaliert die FEXT-Kopplungsfunktion des ETSI-Fernnebensprechmodells gemäß

$$|H_{FEXT}(f)|^2 = K_{FEXT} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 \cdot \frac{l}{L_0} \cdot |T_i(f, l)|^2 \quad (3.84)$$

$$= 10^{-45/20} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 \cdot \frac{l}{L_0} \cdot |T_i(f, l)|^2. \quad (3.85)$$

Die Bezugsfrequenz f_0 beträgt in dem von ETSI definierten Fernnebensprechmodell 1 MHz. Die (Bezugs-)Leitungslänge L_0 wurde auf einen Wert von 1 km festgelegt. Alle in einem Kabelbündel auftretenden Fernnebensprecheffekte werden in den von ETSI und ANSI definierten Fernnebensprechmodellen in einer einzigen Kopplungsfunktion

zusammengefasst. Die durch Fernnebensprecheffekte auf einer Doppelader induzierte Leistungsdichte wird von ETSI durch die Gleichung

$$S_{FEXT}(f) = 10^{-45/20} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 \cdot \frac{l}{L_0} \cdot |T_i(f, l)|^2 \cdot S_{Störer}(f) \quad (3.86)$$

angegeben²⁶. Für $S_{Störer}(f)$ definierte ETSI entsprechende Störspektren. Diese Spektren sind äquivalent zu den im ETSI-Nahnebensprechmodell verwendeten Störspektren (siehe Abschnitt 3.2.2).

Die Fernnebensprechmodelle nach den Gleichungen (3.82) und (3.86) berücksichtigen durch die Parameter l und $|T_i(f, l)|^2$ die Länge und die Übertragungsfunktion der in den Standards definierten Testleitungen (siehe Anhang C). Weicht die Leitungscharakteristik der in der Realität verlegten Kabelbündel und die darin auftretenden Störspektren von den in den xDSL-Standards definierten Werten ab, treten Simulationsungenauigkeiten hinsichtlich $S_{FEXT}(f)$ auf. Die Abschätzung der auftretenden Fernnebensprechstörungen mit dem Modell würde in dem hier dargestellten Fall bei der Neuinstallation von xDSL-Diensten und bei der Netzplanung von einem unzutreffenden Störszenario ausgehen. Ferner wird in diesem Fall bei xDSL-Systemtests von Fernnebensprechstörungen ausgegangen, die nicht den tatsächlichen Verhältnissen entsprechen. Die für das getestete xDSL-System ermittelten Leistungswerte sind dann nur bedingt auf die realen Verhältnisse übertragbar.

3.3.3 FEXT-Messungen

Im Folgenden werden die in dem in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Testnetz gemessenen Fernnebensprechkopplungen untersucht. Die gemessenen Kopplungen sind nach Gleichung (3.68) repräsentativ für die auftretenden Fernnebensprechstörungen. Die Messungen dienen der Verifikation der beschriebenen FEXT-Modelle. Zur quantitativen Abschätzung von FEXT- gegenüber NEXT-Störungen werden die gemessenen FEXT-Kopplungsfunktionen in Relation zu den ebenfalls in dem Testnetz gemessenen NEXT-Kopplungsfunktionen gesetzt (siehe Abschnitt 3.2.3).

Messaufbau

Die FEXT-Kopplungsfunktionen wurden innerhalb des Frequenzbereichs von 10 kHz bis 30 MHz mit dem in Abbildung 3.27 dargestellten Messaufbau gemessen [29], [30], [81]²⁷. Zur Messung der Fernnebensprechkopplungen wurde, wie bei dem in Abschnitt 3.2.3 dargestellten Messaufbau zur Bestimmung der NEXT-Kopplungsfunktionen, ein Netzwerkanalysator verwendet. Durch den Einsatz dieses Geräts sind die zu bestimmenden FEXT-Kopplungsfunktionen direkt aus den S-Parametern ableitbar.

²⁶Im Gegensatz zu den xDSL-Standards von ETSI wird hier die Spannungstransferfunktion mit $T_i(f, l)$ benannt. ETSI bezeichnet diese Funktion mit $s_{T0}(f, l)$.

²⁷Die untere Grenzfrequenz des Frequenzbereichs wurde aus Untersuchungen von C. Valenti abgeleitet [30]. Die obere Grenze des Frequenzintervalls wurde auf 30 MHz festgelegt, um aus den durchgeführten Untersuchungen auch Aufschlüsse hinsichtlich der VDSL-Technik ableiten zu können.

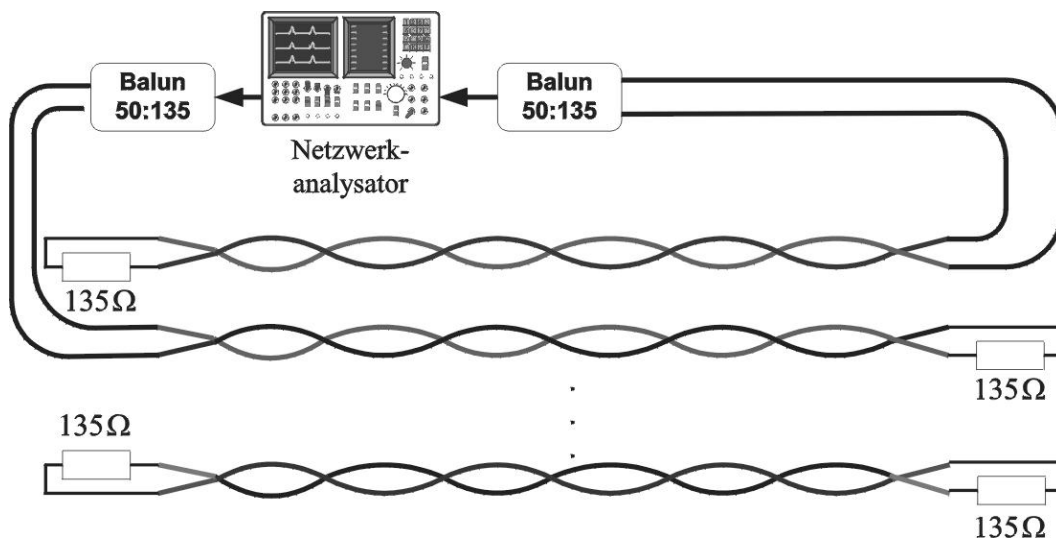


Abbildung 3.27: Messaufbau zur Bestimmung der FEXT-Kopplungsfunktionen eines Kabelbündels

Die Anpassung der Eingangsimpedanz des Netzwerkanalysators an die charakteristischen Impedanzen der betrachteten Kupferdoppeladern erfolgt über die dargestellten $50\ \Omega : 135\ \Omega$ -Baluns. Die bei den jeweiligen Messungen nicht betrachteten Zweidrahtleitungen wurden mit ihrer charakteristischen Impedanz von $135\ \Omega$ abgeschlossen. Die Leitungsabschlüsse dienen der Reduzierung von Signalreflexionen [30].

Mess- und Untersuchungsergebnisse

Abbildung 3.28 zeigt die im ersten Grundbündel bei einer Leitungslänge von 2550 m gemessenen FEXT-Kopplungsfunktionen. Die Kupferdoppelader Nummer eins stellte bei den Messungen das Referenzadernpaar dar²⁸. Etwa 85 Prozent der deutschen Telefonanschlussleitungen weisen eine maximale Leitungslänge bis zu 2550 m auf, so dass diese Leitungslänge für die hier dargestellten Untersuchungen gewählt wurde [56].

Die durchgeführten Untersuchungen und das in Abbildung 3.28 dargestellte Messergebnis zeigen, dass der Betrag der Fernnebensprechkopplungen von der geometrischen Lage der betrachteten Kupferdoppeladern im Kabelbündel abhängig ist. Die FEXT-Kopplungen weisen demnach die gleiche Charakteristik wie die im Kabelbündel auftretenden NEXT-Kopplungen auf (siehe Abbildung 3.15). Die Untersuchungen beweisen, dass die im gleichen Sternvierer liegenden Doppeladern im Mittel den größten Betrag in den jeweiligen FEXT-Kopplungsfunktionen aufweisen²⁹. Folglich werden die auf einer Zweidrahtleitung auftretenden Fernnebensprechstörungen im Durchschnitt vorwiegend von den im gleichen Sternvierer liegenden Übertragungssystemen bestimmt. Um die

²⁸Um die gemessenen FEXT-Kopplungsfunktionen mit den in Abschnitt 3.2.3 durchgeführten Untersuchungen in Relation setzen zu können, wurde für die in diesem Abschnitt dargestellten Messungen ebenfalls die Kupferdoppelader eins als Referenzadernpaar gewählt.

²⁹Bei dem in Abbildung 3.28 dargestellten Messergebnis bilden das Leitungspaar Nummer zwei und das Referenzader einen Sternvierer. Bei den dargestellten Untersuchungen besitzt $|H_{FEXT,21}(f)|^2$ im statistischen Mittel den größten Betrag über der Frequenz.

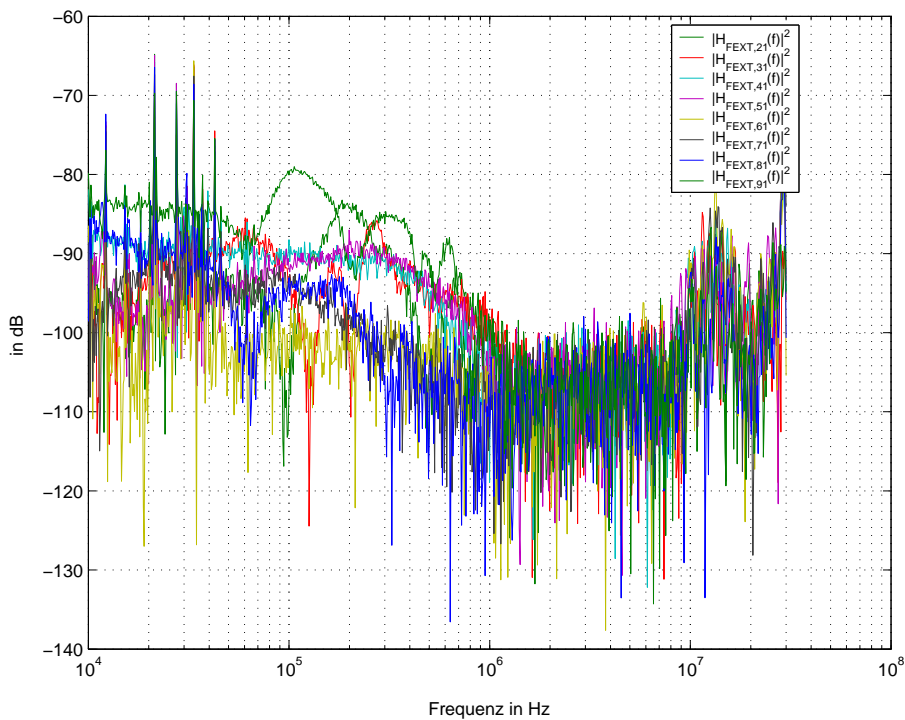


Abbildung 3.28: FEXT-Kopplungsfunktionen im ersten Grundbündel bei einer Leitungslänge von 2550 m

beim praktischen Einsatz von xDSL-Systemen auftretenden Fernnebensprechstörungen zu begrenzen, sind die parallel an einem Kabelbündel angeschlossenen Übertragungssysteme möglichst in unterschiedlichen Sternvierecken zu betreiben (siehe auch Abschnitt 3.2.3).

Die gemessenen FEXT-Kopplungsfunktionen in Abbildung 3.28 und die in den nachfolgenden Graphiken dargestellten Messergebnisse sind in dem Frequenzintervall von 10 kHz bis 42 kHz von schmalbandigen Störungen überlagert. Bei diesen schmalbandigen Spitzen handelt es sich um Störeffekte, die auf elektrische Geräte in der Umgebung der untersuchten Kupferzweidrahtleitungen zurückzuführen sind. In der weiteren Betrachtung der Fernnebensprechkopplungsfunktionen werden diese Effekte daher nicht weiter diskutiert³⁰.

Nach den mathematischen Ableitungen der Abschnitte 3.3.1 und 3.3.2 ist die auf einer Kupferzweidrahtleitung auftretende Leistungsdichte der Fernnebensprechstörung von der Länge l der Doppeladern des Kabelbündels abhängig. Für die Untersuchung, ab welcher Leitungslänge Fernnebensprechen in Relation zum Nahnebensprechen bei der Modellierung zu berücksichtigen ist, wurden die FEXT-Kopplungsfunktionen bei verschiedenen Leitungslängen durch Messungen bestimmt und analysiert. Abbildung 3.29 zeigt die gemessene FEXT-Kopplungsfunktion $|H_{FEXT,21}(f)|^2$ bei Leitungslängen von 300 m, 550 m, 1550 m, 2550 m und 3050 m. In den dargestellten Messergebnissen

³⁰In Abschnitt 3.2.3 wird detailliert bewiesen, dass die auftretenden Schmalbandstörer nicht auf Nebensprecheffekte zurückzuführen sind.

stellte die Doppelader eins des Referenzadernpaar dar.

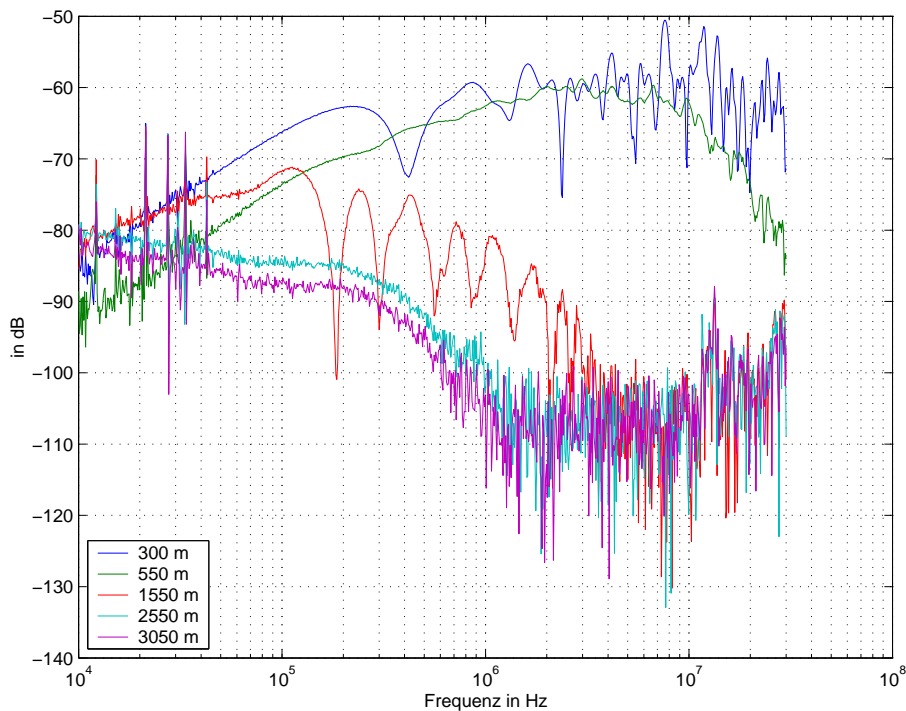


Abbildung 3.29: Abhängigkeit der FEXT-Kopplungsfunktion $|H_{FEXT,21}(f)|^2$ von der Leitungslänge

Die Untersuchungen zeigen, dass der Betrag der FEXT-Kopplungsfunktionen $|H_{FEXT,21}(f)|^2$ mit steigender Leitungslänge abnimmt. Je größer die Leitungslänge ist, desto stärker wird die Leistungsdichte des Fernnebensprechsignals durch die vorhandene Kabeldämpfung reduziert. In der hier dargestellten Messung drückt sich dieser Sachverhalt quantitativ in der Weise aus, dass bei einer Leitungslänge von 300 m $|H_{FEXT,21}(f)|^2$ an dem Frequenzpunkt 1 MHz einen Betrag von -62 dB aufweist. Bei 1550 m besitzt $|H_{FEXT,21}(f)|^2$ bei der gleichen Frequenz einen Betrag von ca. -81 dB. Bei 3050 m ist der Betrag von $|H_{FEXT,21}(f)|^2$ auf einen Wert von ca. -105 dB abgesunken.

Die Untersuchung des Betrags der FEXT-Kopplung $|H_{FEXT,21}(f)|^2$ für Leitungslängen über 3800 m hatte das in Abbildung 3.30 dargestellte Ergebnis.

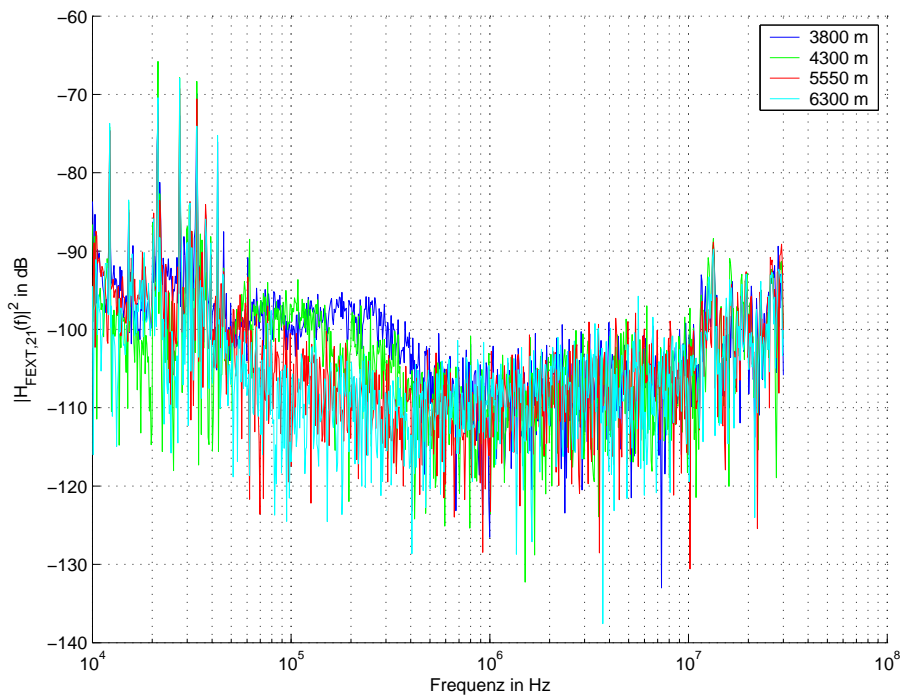


Abbildung 3.30: Längenabhängigkeit der FEXT-Kopplungsfunktion $|H_{FEXT,21}(f)|^2$ bei Leitungslängen von 3800 m bis 6300 m

Die in Abbildung 3.30 dargestellten Messergebnisse zeigen, dass sich ab einer Leitungslänge von 3800 m die Verläufe von $|H_{FEXT,21}(f)|^2$ bei den betrachteten Leitungslängen überlappen. Dabei besitzt die FEXT-Kopplungsfunktion $|H_{FEXT,21}(f)|^2$ des untersuchten Kabelbündels zwischen 3800 m bis 6300 m einen mittleren Betrag von -104,2260 dB. Nach den dargestellten Messergebnissen und in Anbetracht der Größenordnungen wird ab einer Leitungslänge von 3800 m in einer vereinfachenden Näherung angenommen, dass die hier untersuchte FEXT-Kopplungsfunktion $|H_{FEXT,21}(f)|^2$ mit zunehmender Leitungslänge nicht mehr voneinander unterschieden werden kann. Dieses Verhalten zeigten auch die übrigen im Kabelbündel untersuchten FEXT-Kopplungsfunktionen.

Für eine quantitative Abschätzung der parallel auftretenden Nah- und Fernnebensprechkopplungsfunktionen wurden die NEXT-Kopplungsfunktionen $|H_{NEXT,21}(f)|^2$ bei den Leitungslängen der in Abbildung 3.29 dargestellten Untersuchung bestimmt. Abbildung 3.31 zeigt die gemessene Nahnebensprechkopplungsfunktion $|H_{NEXT,21}(f)|^2$ für Leitungslängen zwischen 300 m bis 2550 m. Die Differenz zwischen der Funktion $|H_{NEXT,21}(f)|^2$ und der in Abbildung 3.29 dargestellten FEXT-Kopplungsfunktion $|H_{FEXT,21}(f)|^2$ bei der Frequenz $f = 1$ MHz ist in Tabelle 3.3 dargestellt³¹.

³¹Um Ungenauigkeiten durch die auftretenden Schmalbandstörer auszuschließen, wurden die Fern- und Nahnebensprechkopplungsfunktionen bei der Frequenz $f = 1$ MHz betrachtet.

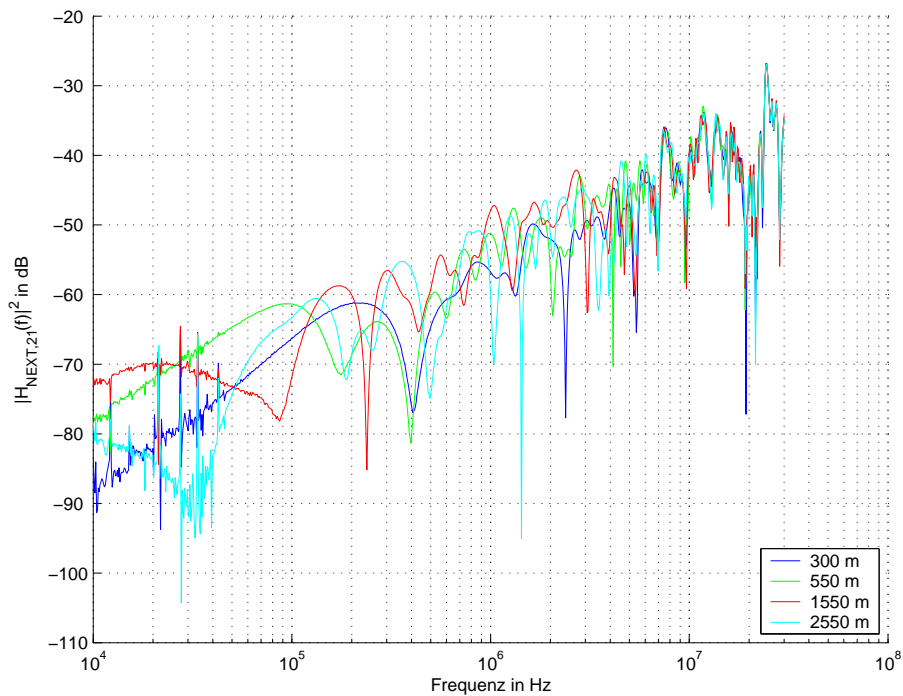


Abbildung 3.31: Nahnebensprechkopplungen bei einer Leitungslänge von 300 m bis 2550 m

l in m	$ H_{NEXT,21}(f) ^2$	$ H_{FEXT,21}(f) ^2$
300	-57 dB	-62 dB
550	-51 dB	-63 dB
1550	-50 dB	-81 dB
2550	-58 dB	-100 dB

Tabelle 3.3: Betrag von $|H_{NEXT,21}(f)|^2$ und $|H_{FEXT,21}(f)|^2$ bei $f = 1$ MHz

Die Differenz zwischen $|H_{FEXT,21}(f)|^2$ und $|H_{NEXT,21}(f)|^2$ nimmt mit ansteigender Leitungslänge zu. Beträgt diese Differenz bei $l = 300$ m und $f = 1$ MHz einen Wert von 5 dB, so ergibt sich bei $l = 550$ m für das hier betrachtete Kabelbündel bei der gleichen Frequenz ein Unterschied von 12 dB. Infolge des Unterschieds von 12 dB wird näherungsweise angenommen, dass die ab einer Leitungslänge von 550 m auftretenden Fernnebensprechstörungen gegenüber den ebenfalls vorhandenen Nahnebensprechstörungen vernachlässigt werden können.

Zur Untersuchung der Nebensprechverhältnisse bei größeren Leitungslängen wurden die bei 4300 m in einem Grundbündel auftretenden Fernnebensprechdämpfungen in Relation zu den Nahnebensprechdämpfungen gesetzt. Nach Untersuchungen aus dem Jahr 1990 weisen die Anschlussleitungen in der BRD zwischen der Vermittlungsstelle und dem Endkunden in 90 Prozent der Fälle Leitungslängen unter 4300 m auf [57]. Von dieser Struktur des Anschlussleitungsnetzes kann auch heute noch ausgegangen werden [56]. Abbildung 3.32 zeigt die in einem Grundbündel gemessenen Fernneben-

sprechdämpfungen in Relation zu den Nahnebensprechdämpfungen.

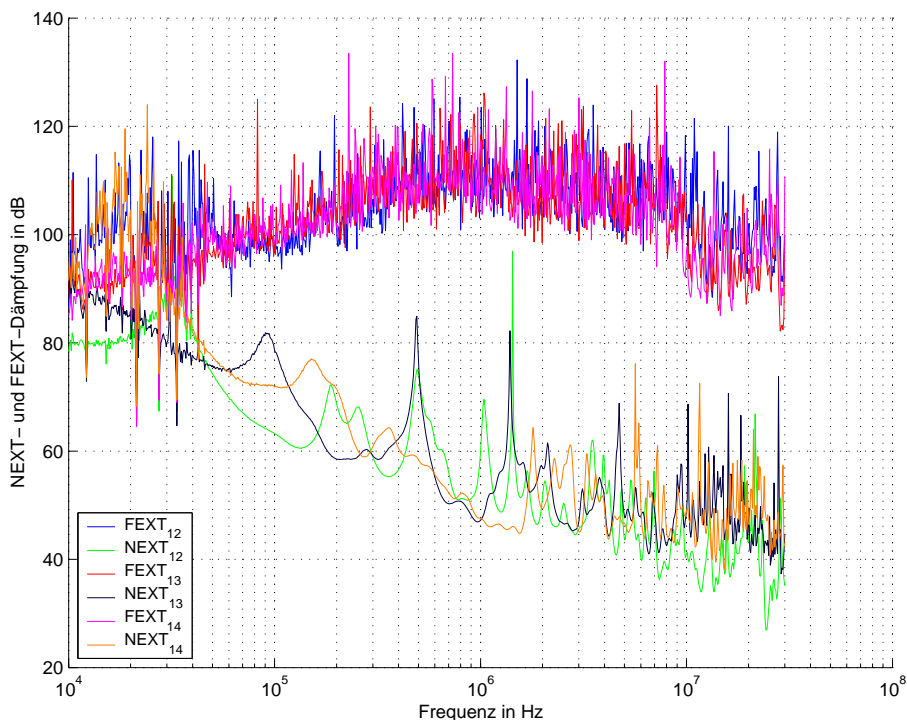


Abbildung 3.32: Nah- und Fernnebensprechdämpfungen bei einer Leitungslänge von $l = 4300$ m

Die Untersuchungen und das in Abbildung 3.32 exemplarisch dargestellte Messergebnis zeigen, dass bei einer Leitungslänge von 4300 m die Fernnebensprechdämpfungen größer als die auf den gleichen Leitungspaaren auftretenden Nahnebensprechdämpfungen sind. In diesem Fall werden die an einem Kabelende angeschlossenen xDSL-Systeme hauptsächlich durch die im Kabelbündel auftretenden Nahnebensprecheffekte gestört. Die auf den Anschlussleitungen mit einer Länge von 4300 m auftretenden Fernnebensprechstörungen können gegenüber den Nahnebensprechstörungen am Empfänger vernachlässigt werden. Zum Beweis dieser getroffenen Annahme, zeigt die Graphik 3.33 den Worst-Case Fall der Nah- und Fernnebensprechdämpfungen des untersuchten Kabelbündels bei der Leitungslänge von 4300 m.

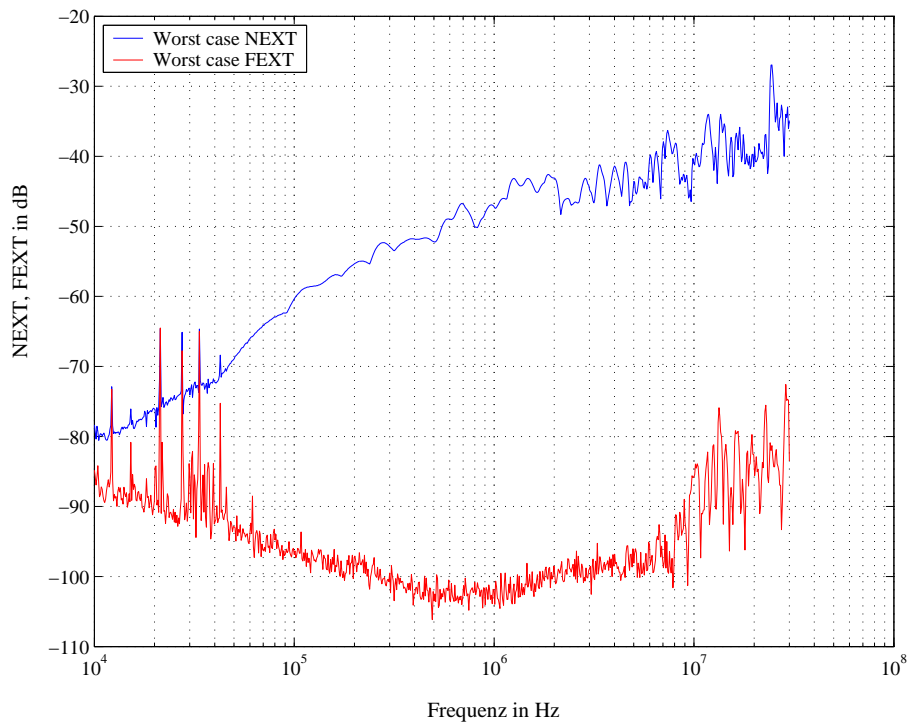


Abbildung 3.33: Gegenüberstellung des Worst-Case Falles von NEXT und FEXT bei einer Leitungslänge von $l = 4300$ m

Das dargestellte Messergebnis zeigt, dass bei der untersuchten Leitungslänge der Worst-Case Fall der Fernnebensprechdämpfung deutlich unter dem Äquivalent der Nahnebensprechdämpfung liegt. Die Differenz beträgt bei 10 kHz ca. 8 dB und wächst bei 1 MHz auf einen Wert von ca. 56 dB an. Diese Messungen bestätigen auch die von S. Galli und J. K. Kerpez an amerikanischen Kabelbündeln durchgeführten Untersuchungen [34]. K. Schneider kommt durch seine durchgeführten Simulationen zu dem gleichen Ergebnis [50].

3.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde das Nebensprechen auf den Zweidrahtleitungen von Telefonanschlussleitungen betrachtet. Neben dem grundsätzlichen Aufbau von Telefonanschlussleitungen wurden besonders die in den xDSL-Standards verwendeten Nah- und Fernnebensprechmodelle analysiert. Die Modelle treffen für die Modellierung von Nebensprechen auf xDSL-Leitungen vereinfachende Annahmen, die im Einzelnen dargestellt und diskutiert wurden.

Die auf den Telefonanschlussleitungen auftretenden Nah- und Fernnebensprechstörungen können von einem einzelnen oder mehreren störenden Übertragungssystemen im Kabelbündel stammen. Für die Modellierung beider Fälle wurden die Standardmodelle für einen und mehrere Nebensprechstörer diskutiert.

Zur Modellierung von Nebensprechstörungen verwenden ANSI T1E1 und ETSI TM6

teilweise unterschiedliche Modelle und Parameter. Es wurde gezeigt, dass das von ANSI für mehrere störende Systeme im Kabelbündel verwendete Nebensprechmodell auf die Minkowski-Ungleichung zurückgeführt werden kann. Die von ETSI für die Modellierung von Nebensprechstörungen definierten Leistungsdichtepprofile der störenden Systeme wurden dargestellt und erläutert.

Die Simulationsgenauigkeit der standardisierten Nebensprechmodelle wurde durch Messungen an Telefonanschlussleitungen verifiziert, die typisch für das deutsche Zugangsnetz sind. Durch entsprechende Untersuchungen wurde gezeigt, dass die in dem untersuchten Kabelbündel auftretenden Nahnebensprechdämpfungen im Mittel um 3 dB größer, als die des ETSI-Modells sind. Ferner wurde zwischen den Grundbündeln des Kabels eine mittlere Nebensprechdämpfung von 13,8760 dB gemessen. Dabei wurde festgestellt, dass sich bei der Vernachlässigung benachbarter Grundbündel in der Power-Sum NEXT-Dämpfung ein mittlerer Fehler von 0,018 dB ergibt.

Ebenso wurden die Nebensprechleistungsdichten bei verschiedenen Konstellationen von störenden Übertragungssystemen untersucht. Es wurde anhand von Messungen gezeigt, dass die NEXT-Kopplungsfunktionen von der geometrischen Lage der betrachteten Kupferdoppeladern abhängig sind. Die im Sternvierer bzw. die im Grundbündel betriebenen Systeme werden dabei hauptsächlich von Übertragungssystemen im gleichen Sternvierer bzw. im gleichen Grundbündel gestört. Problematisch für die Durchführung von xDSL-Systemtests und für die Abschätzung von Nebensprechstörungen ist, dass die jeweilige individuelle Lage der betrachteten Systeme durch die Standardnebensprechmodelle nicht explizit berücksichtigt wird.

Für die Abschätzung, inwieweit Fernnebensprechstörungen in Relation zu Nahnebensprechstörungen zu berücksichtigen sind, wurden entsprechende Untersuchungen an realen Kabelbündeln durchgeführt.

Die zunehmende Auslastung des Telefonanschlussnetzes mit Übertragungssystemen unterschiedlicher Technologie erfordert eine möglichst exakte Simulation der auftretenden Nebensprechstörungen. Mit der Modellierung der spezifisch in einem Kabelbündel vorhandenen Nebensprechstörungen kann eine höhere Simulationsgenauigkeit als mit den bestehenden Standardnebensprechmodellen erreicht werden. Im nachfolgenden Kapitel wird daher ein Modell vorgeschlagen, mit dem Nebensprechstörungen für ein Kabelbündel individuell simuliert und reproduziert werden können.

4 Verbessertes Nahnebensprechmodell

In diesem Kapitel wird die Berechnung der NEXT-Kopplungsfunktionen und die Modellierung von Nebensprechstörungen in realen Kabelbündeln betrachtet. In Abschnitt 4.1 werden die Randbedingungen für die Schätzung und Modellierung der zwischen den Zweidrahtleitungen vorhandenen Nebensprechkopplungsfunktionen detailliert festgelegt. Ein gegenüber den bisherigen Standardnebensprechmodellen verbessertes Nebensprechmodell wird in Abschnitt 4.2 vorgestellt. Für die Schätzung der Kopplungsfunktionen wird in Abschnitt 4.3 ein multipler nichtlinearer Regressionsansatz aufgestellt. Die Hardware für die kostengünstige Implementierung dieses Ansatzes wird in Abschnitt 4.4 konzipiert und optimiert. Die Genauigkeit des entwickelten Nebensprechmodells wird in Abschnitt 4.5 anhand von Simulationen dargestellt. Die Diskussion und Bewertung des neu entwickelten Nebensprechmodells erfolgt in Abschnitt 4.6. Die wesentlichen Ergebnisse dieses Kapitels fasst Abschnitt 4.7 zusammen.

4.1 Einführung

Die unterschiedlichen für das Nebensprechen verantwortlichen Einflussgrößen und der Aufbau des Telefonanschlussnetzes aus verschiedenen Kabeltypen führen dazu, dass die auf den Zweidrahtleitungen des Zugangnetzes auftretenden Nebensprechstörungen allgemein durch statistische Modelle simuliert werden (siehe Kapitel 3). Nach S. H. Lin [53] und R. F. M. van den Brink [42] kann ein allgemeines, für alle verlegten Telefonanschlussleitungen exakt zutreffendes Nebensprechmodell, nicht aufgestellt werden. Die vorhandenen Abweichungen im Kabelaufbau durch Fertigungstoleranzen, beziehungsweise die individuell auftretenden Umwelteinflüsse und Alterungseffekte der Kabel, führen bei einem allgemeinen Nebensprechmodell mit fest definierten Parametern zu Simulationsungenauigkeiten (siehe Abschnitt 3.2.3). Die Simulationsgenauigkeit kann mit einem Modell verbessert werden, welches die auf dem jeweils betrachteten Kabel vorherrschenden Nebensprechstörungen individuell simuliert.

Nach den Untersuchungen aus Abschnitt 3.3.3 wird im Folgenden von der vereinfachenden Näherung Gebrauch gemacht, dass ab einer Leitungslänge größer 550 m Fernnebensprechstörungen gegenüber den parallel auftretenden Nahnebensprechstörungen vernachlässigt werden können. Auf Leitungen mit einer Länge unter 550 m wird das Sendesignal infolge der mit der Leitungslänge abnehmenden Leitungsdämpfung in der Leistung weniger reduziert als bei Leitungslängen über 550 m (siehe Gleichung(3.5)). Das Signalrauschleistungsverhältnis am xDSL-Empfängereingang nimmt bei gleich bleibenden Störungen mit kleiner werdenden Leitungslängen zu. Die vorhandenen Fernnebensprechstörungen wirken sich bei einem großen Signalrauschleistungsverhältnis weniger auf die Leistungsfähigkeit eines xDSL-Systems aus, als bei einem geringen

Signalrauschleistungsverhältnis. Dementsprechend werden die auftretenden Fernnebensprechstörungen auch bei Leitungslängen unter 550 m gegenüber den Nahnebensprechstörungen vernachlässigt. K. Schneider zeigte anhand von Simulationen, dass diese Näherung realistisch ist [50].

4.2 Multivariantes Regressionsmodell

Nebensprechen ist ein statistischer Rauschprozess. Zur Beschreibung der statistischen Eigenschaften eines Rauschprozesses wird die Autokorrelationsfunktion im Zeitbereich beziehungsweise das Leistungsdichtespektrum im Frequenzbereich herangezogen [32], [37], [64]. Das hier gegenüber den bisherigen Standardnebensprechmodellen vorgestellte verbesserte Modell simuliert Nahnebensprechstörungen im Frequenzbereich. Durch die Betrachtungen im Frequenzbereich sind die auf den Kupferdoppeladern auftretenden Nebensprechstörungen durch Multiplikation und Summation der Nebensprechkopplungsfunktionen mit den Spektren der störenden Sendesignale berechenbar¹. Eine alternative Modellierung im Zeitbereich würde im Vergleich dazu implementierungsaufwändigere Faltungsoperationen benötigen.

Das hier vorgestellte Nebensprechmodell basiert auf dem in Abbildung 4.1 dargestellten Blockschaltbild. Für eine übersichtliche Darstellung wurde repräsentativ für alle gestörten Kupferdoppeladern nur ein durch Nebensprechen beeinträchtigtes Leitungspaar dargestellt.

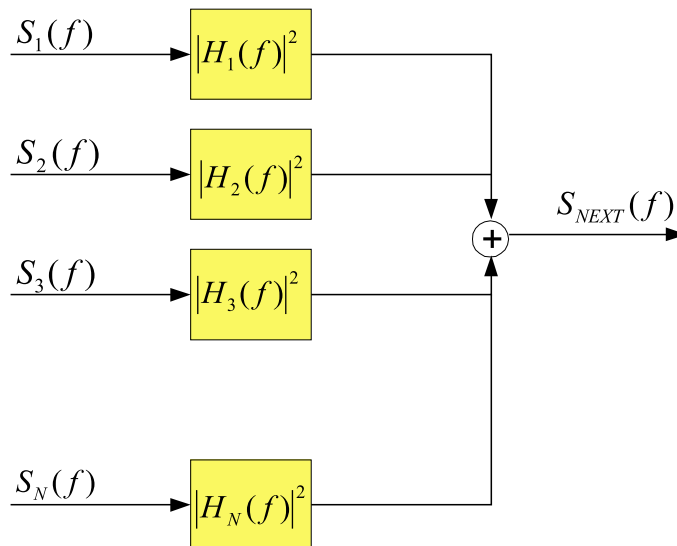


Abbildung 4.1: Blockschaltbild des entwickelten Nahnebensprechmodells im Frequenzbereich für ein gestörtes Leitungspaar

¹Bei mehreren im Kabelbündel vorhandenen störenden Übertragungssystemen sind die sich aus der Multiplikation ergebenden Teilnebensprechstörungen zu summieren.

In Abbildung 4.1 gilt folgende Notation:

N	Anzahl der Nebensprechstörer im Kabelbündel
$S_{NEXT}(f)$	Leistungsdichtespektrum der Nahnebensprechstörung auf der gestörten Kupferdoppelader (Referenzleitung)
$S_i(f)$	Störendes Sendeleistungsdichtespektrum auf der benachbarten Kupferdoppelader i ($i \in \{1, \dots, N\}$) im Kabelbündel
$ H_i(f) ^2$	Quadratischer Betrag der individuellen Nahnebensprechübertragungsfunktion (Leistungsübertragungsfunktion) i .

Die jeweilige NEXT-Kopplungsfunktion $|H_i(f)|^2$ repräsentiert die Nahnebensprechkopplung zwischen der störenden Sendeleistungsdichte $S_i(f)$ auf der Kupferdoppelader i und der Nahnebensprechstörleistungsdichte auf der gestörten Zweidrahtleitung (Referenzleitung). Im Gegensatz zu den Nebensprechmodellen der xDSL-Standards, wird in dem hier vorgestellten Modell jede „Teilnebensprechstörung“ im betrachteten Kabelbündel durch eine separate NEXT-Kopplungsfunktion $|H_i(f)|^2$ und Sendeleistungsdichte $S_i(f)$ mit $i \in \{1, \dots, N\}$ berücksichtigt. Simulationsungenauigkeiten, die aus der Betrachtung des ein Prozent Worst-Case Falles der gemessenen Nebensprechkopplungen resultieren, werden durch den vorgestellten Modellansatz vermieden (siehe Abschnitt 3.2.2 und 3.3.2).

Die induzierte (Gesamt-)Nahnebensprechstörleistungsdichte auf einer Kupferdoppelader berechnet sich bei N im Kabelbündel vorhandenen Nebensprechstörern aus der linearen Summe der N Teilnebensprechstörungen. Eine Teilnebensprechstörung wird im Frequenzbereich aus der Multiplikation der Sendeleistungsdichte $S_i(f)$ mit der jeweiligen NEXT-Kopplungsfunktion $|H_i(f)|^2$ berechnet. Für die auf einer Kupferzweidrahtleitung induzierte NEXT-Störleistungsdichte folgt mit dem gewählten Modellansatz

$$S_{NEXT}(f) = \sum_{i=1}^N |H_i(f)|^2 \cdot S_i(f). \quad (4.1)$$

Durch die Verwendung der tatsächlich auf den Zweidrahtleitungen eines Kabelbündels messbaren Sendeleistungsdichten $S_i(f)$ finden die Leistungsdichteprofile der Störungen, wie in Abbildung 3.8 und 3.9 gezeigt, keine Anwendung. Differenzen zwischen realen und theoretischen Störleistungsdichten werden durch diese Methode vermieden, was letztlich zu einer Verbesserung der Simulationsgenauigkeit führt.

Sämtliche auf den Kupferzweidrahtleitungen eines D -paarigen Kabelbündels induzierten Leistungsdichtespektren $S_{NEXT,i}(f)$ können mittels des analytischen Ausdrucks

$$\begin{pmatrix} S_{NEXT,1}(f) \\ S_{NEXT,2}(f) \\ \vdots \\ S_{NEXT,D}(f) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & |H_{21}(f)|^2 & \dots & |H_{D1}(f)|^2 \\ |H_{12}(f)|^2 & 0 & \dots & |H_{D2}(f)|^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ |H_{1D}(f)|^2 & |H_{2D}(f)|^2 & & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_1(f) \\ S_2(f) \\ \vdots \\ S_D(f) \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

berechnet werden². Die Gleichung (4.2) kann in vektorieller bzw. Matrizen Schreibweise zu

$$\mathbf{S}_{NEXT}(f) = \mathbf{H} \cdot \mathbf{S}(f) \quad (4.3)$$

vereinfacht dargestellt werden. Der D -dimensionale Vektor $\mathbf{S}_{NEXT}(f)$ enthält die induzierten Nahnebensprechleistungsdichten. Im D -dimensionalen Vektor $\mathbf{S}(f)$ werden die im Kabelbündel vorhandenen störenden Sendespektren $S_i(f)$ zusammengefasst. Die $D \times D$ -Matrix \mathbf{H} (Kopplungsmatrix) enthält die zwischen den Kupferzweidrahtleitungen eines Kabelbündels vorhandenen Nahnebensprechkopplungsfunktionen. Die Nahnebensprechkopplungen der Leitungspaare auf sich selbst (Rückkopplung) wird zu Null angenommen [37]. Die Kopplungsmatrix \mathbf{H} enthält dementsprechend auf der Hauptdiagonalen ausschließlich Nullelemente.

Zur Bestätigung des aufgestellten Modellansatzes nach Gleichung (4.2) wurden die standardisierten Sendeleistungsdichten von SHDSL-Systemen mit den in einem Kabelbündel gemessenen Nebensprechkopplungsfunktionen nach Gleichung (4.1) multipliziert³. Die Elemente des Vektors $\mathbf{S}(f)$ bzw. die Sendeleistungsdichte der SHDSL-Systeme $S_i(f)$ wurden für die Simulationen durch den Ausdruck

$$S_i(f) = \begin{cases} 10^{-PBO/10} \cdot \frac{K_{SHDSL}}{135} \cdot \frac{1}{f_{sym}} \cdot \frac{[\sin(\pi f/N f_{sym})]^2}{\pi f/N f_{sym}} \cdot \frac{1}{1+(f/f_{3dB})^{2 \cdot Order}} \cdot 10^{M(f)/10} & , f < f_{int} \\ 0,5683 \cdot 10^{-4} \cdot f^{-1,5} & , f_{int} \leq f \leq 1,1 \text{ MHz (Annex A)} \\ 0,5683 \cdot 10^{-4} \cdot f^{-1,5} & , f_{int} \leq f \leq 1,5 \text{ MHz (Annex B)} \end{cases} \quad (4.4)$$

mit

$$M(f) = \begin{cases} 1 + 0,4 \cdot \frac{f_{3dB} - f}{f_{3dB}} & \text{für } f < f_{3dB} \\ 1 & f \geq f_{3dB} \end{cases} \quad (4.5)$$

des SHDSL-Standards G.991.2 der ITU-T approximiert [27]. Die Frequenz f_{int} repräsentiert die „intersection frequency“, bei der sich die Intervalle der abschnittsweise definierten Funktion $S_i(f)$ schneiden. PBO entspricht dem „Power back off Wert“ der in den Simulationen zu Null gesetzt wird. In der Simulation werden ausschließlich europäische SHDSL-Systeme betrachtet, so dass das Sendespektrum $S_i(f)$ zwischen $f_{int} \leq f \leq 1,5$ MHz durch den Anhang B (Annex B) des SHDSL-Standards der ITU-T beschrieben wird⁴.

²Die Gleichung (4.2) basiert auf dem in Abbildung 4.1 dargestellten Blockschaltbild.

³Die Nebensprechkopplungsfunktionen wurden mit dem in Abbildung 3.2.3 dargestellten Messaufbau bestimmt.

⁴Annex A beschreibt die Sendeleistungsdichte für die in Amerika eingesetzten SHDSL-Systeme.

Die Belegung der übrigen Parameter der Gleichung (4.4) erfolgt nach der folgenden Tabelle [27].

Payload Datenrate, R (kbit/s)	K_{SHDSL}	Order	N	f_{sym}	f_{3dB}	P_{SHDSL} (dBm)
$R < 2048$	7086	6	1	$(R + 8)/3$	$1,0 \cdot f_{sym}/2$	$P1(R) \geq P_{SHDSL}$ $\geq 13,5$
$R \geq 2048$	9,90	6	1	$(R + 8)/3$	$1,0 \cdot f_{sym}/2$	14,5

Tabelle 4.1: Parameter der standardisierten Sendespektren von SHDSL-Systemen nach dem ITU-T Standard G.991.2 Annex B

Die Simulationsergebnisse wurden in Relation zu den gemessenen Nebensprechleistungsdichten gesetzt. Die Konstellation der störenden SHDSL-Systeme im Grundbündel war bei der Simulation und der Messung identisch.

Abbildung 4.2 zeigt die auf dem Referenzadernpaar gemessene und simulierte Leistungsdichte der Nebensprechstörung bei vier störenden SHDSL-Systemen im gleichen Grundbündel. Das Doppeladernpaar Nummer eins stellte bei den Simulationen und den Messungen das Referenzadernpaar dar⁵. In der Praxis werden xDSL-Systeme möglichst in verschiedenen Sternvierern betrieben. Bei den hier durchgeführten Untersuchungen wurden aus diesem Grund die störenden xDSL-Systeme an den Zweidrahtleitungen drei bis sechs angeschlossen. Bei diesen Messungen und Simulationen wurden nur die im Grundbündel der Referenzleitung betriebenen störenden xDSL-Systeme betrachtet. Nach den Untersuchungen in Kapitel 3.2.3 und 3.3.3 sind die Nebensprechstörungen aus benachbarten Grundbündeln gegenüber denen im gleichen Grundbündel der Referenzleitung in einer ersten Näherung vernachlässigbar.

Wie das in den Abbildung 4.2 dargestellten Ergebnis zeigt, geben die simulierten Spektren den Verlauf der gemessenen Nebensprechleistungsdichten wieder. Die Abweichungen zwischen den Simulationen und den Messungen sind bei Signalpegeln ab ca. -110 dBm/Hz auf den beschränkten Dynamikbereich des verwendeten Spektrumanalysators zurückzuführen. Die innerhalb des Intervalls von 0 Hz bis ca. 50 kHz feststellbaren schmalbandigen Überhöhungen der simulierten Nebensprechleistungsdichten sind auf die extern eingekoppelten Störungen bei der Messung der NEXT-Kopplungsfunktionen zurückzuführen (Beweis siehe Abschnitt 3.2.3). Aus der Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den gemessenen Sendeleistungsdichten wird im Folgenden davon ausgegangen, dass das Modell nach Abbildung 4.1 und Gleichung (4.1) den realen Nebensprechverhältnissen entspricht.

⁵Um die Simulationsergebnisse mit den vorangegangenen Resultaten der Nebensprechuntersuchungen setzen zu können, wurde hier das Adernpaar Nummer eins wiederum als Referenzadernpaar gewählt.

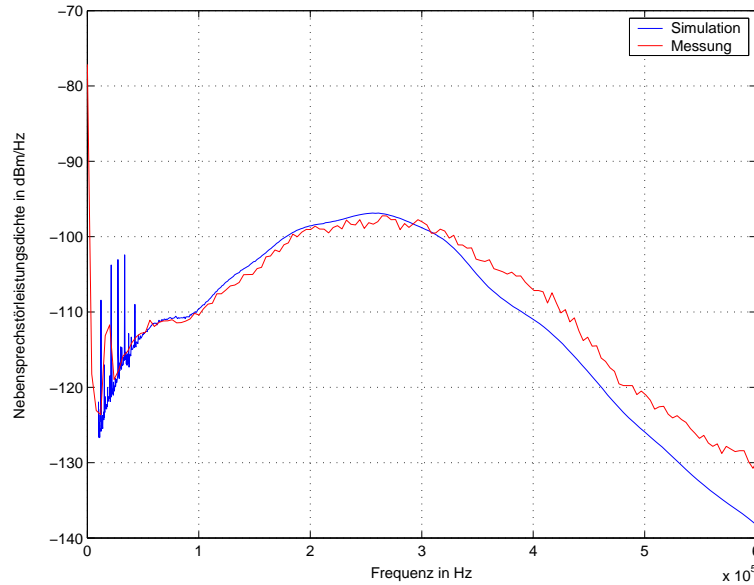


Abbildung 4.2: Gemessene und simulierte Nebensprechstörleistungsdichte bei vier SHDSL-Systemen in einem Grundbündel

In dem hier vorgeschlagenen modifizierten Nahnebensprechmodell werden die quadratischen Beträge der individuellen NEXT-Übertragungsfunktionen $|H_i(f)|^2$ (NEXT-Kopplungsfunktionen) im Frequenzbereich durch die Potenzfunktion

$$|H_i(f)|^2 \approx k_i \cdot f^{x_i} \quad (4.6)$$

mit der individuellen Kopplungskonstanten k_i und dem individuellen Exponenten x_i approximiert. Um zu verifizieren, dass die vereinfachende Annahme nach Gleichung (4.6) den in einem Kabelbündel messbaren NEXT-Kopplungsfunktionen entspricht, wurden die Kopplungsfunktionen innerhalb der Fernmeldeinstallationsleitung vom Typ DIN VDE 0815 J-2Y(ST) 50 x 2 x 0,6 mm STIII des Testnetzes in einem Frequenzband von 9 kHz bis 30 MHz gemessen. Die Messungen erfolgten nach dem in Kapitel 3.2.3 beschriebenen Prinzip. Die bestimmten NEXT-Kopplungsfunktionen wurden jeweils durch Potenzfunktionen nach Gleichung (4.6) angenähert. Zur Berechnung der Parameter k_i und x_i werden die Variablensubstitutionen

$$u = \log_{10}(f) \quad (4.7)$$

$$v_i = \log_{10}(|H_i(f)|^2) \quad (4.8)$$

$$c_i = \log_{10}(k_i) \quad (4.9)$$

eingeführt⁶. Mit den obigen Gleichungen ergibt sich für die Potenzfunktion aus Gleichung (4.6) die Gerade

$$v_i(u) = x_i \cdot u + c_i \quad (4.10)$$

auf der logarithmisch skalierten Frequenzachse. Die Parameter x_i, c_i und der daraus resultierende Wert der individuellen Kopplungskonstanten k_i wurden zur Verifikation

⁶Für eine übersichtliche Notation wird die Frequenzabhängigkeit von u und v nicht explizit in den Gleichungen angegeben.

von Gleichung (4.6) aus den jeweils gemessenen NEXT-Kopplungsfunktionen nach dem *Gauß'schen Prinzip der kleinsten Quadrate* berechnet [67], [68], [69].

In Abbildung 4.3 ist repräsentativ für alle im Kabelbündel gemessenen NEXT-Kopplungsfunktionen der gemessene und der approximierte quadratische Betrag der Funktionen $H_{21}(f)$ und $H_{41}(f)$ auf der logarithmisch skalierten Frequenzachse dargestellt⁷.

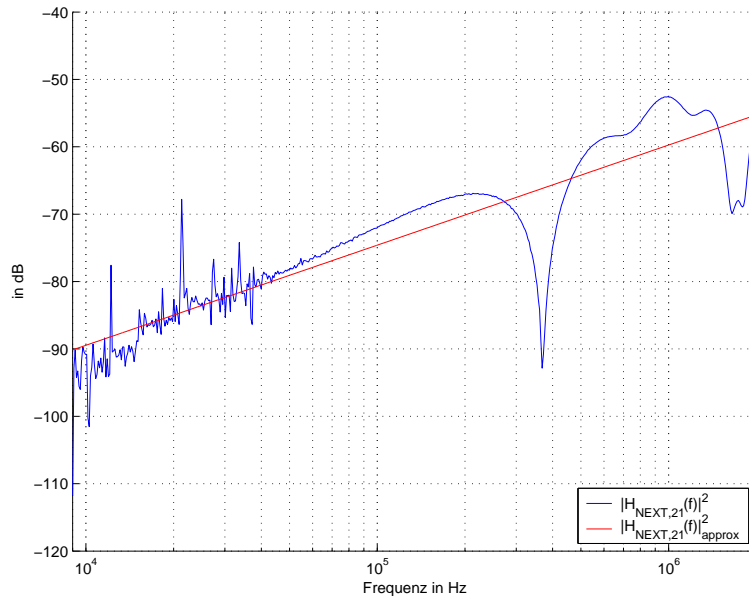


Abbildung 4.3: Gemessener und approximierter quadratischer Betrag von $H_{21}(f)$

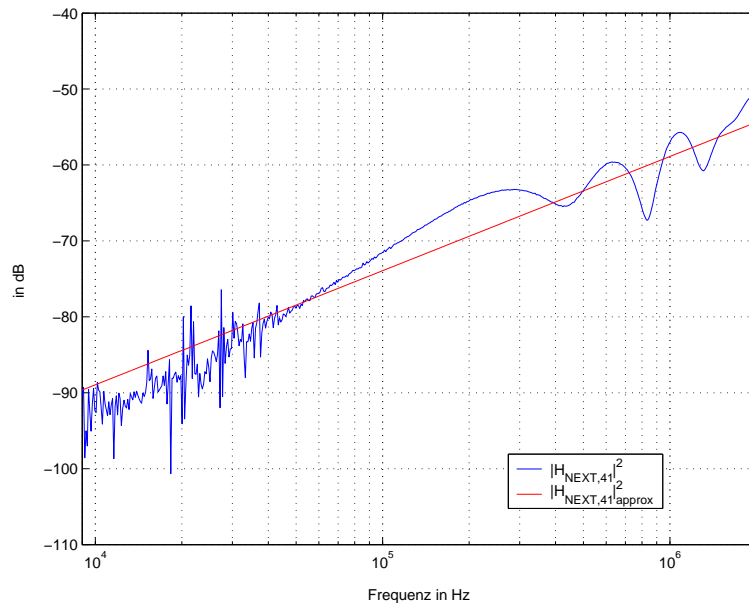


Abbildung 4.4: Gemessener und approximierter quadratischer Betrag von $H_{41}(f)$

⁷ $|H_{xy}|^2$ repräsentiert die NEXT-Kopplungsfunktion von der störenden Doppelader x auf die gestörte Doppelader y .

Für die approximierten quadratischen Beträge von $H_{21}(f)$ und $H_{41}(f)$ ergeben sich nach dem Gauß'schen Prinzip der kleinsten Quadrate die Gleichungen

$$|H_{21}(f)|_{approx}^2 = k_{21} \cdot f^{x_{21}} = 1,2887293 \cdot 10^{-15} \cdot f^{1,4860} \quad (4.11)$$

$$|H_{41}(f)|_{approx}^2 = k_{41} \cdot f^{x_{41}} = 1,2327959 \cdot 10^{-15} \cdot f^{1,5033} \quad (4.12)$$

Aus den berechneten Näherungen folgt, dass die Funktion $|H_{21}(f)|_{approx}$ eine Kopplungskonstante von $k_{21} = 1,2887293 \cdot 10^{-15}$ und einen Exponenten von $x_{21} = 1,4860$ besitzt. Die approximierte NEXT-Kopplungsfunktion $|H_{21}(f)|_{approx}^2$ steigt mit 14,860 dB pro Dekade auf der logarithmisch skalierten Frequenzachse an. Für die Näherungsfunktion $|H_{41}(f)|_{approx}^2$ wurde eine Kopplungskonstante $k_{41} = 1,2327959 \cdot 10^{-15}$ und ein Exponent $x_{41} = 1,5033$ rechnerisch ermittelt. Wie die hier dargestellten Untersuchungsergebnisse zeigen, besitzen die betrachteten NEXT-Kopplungsfunktionen, wie die Standardnebensprechmodelle, eine Steigung von ca. 15 dB pro Dekade (siehe Abschnitt 3.2.2).

Die Abschätzung der Approximationsgenauigkeit erfolgt mittels des Kreuzkorrelationskoeffizienten (nach Bravais-Pearson) [68]. Dieser Koeffizient berechnet sich nach

$$\rho = \frac{\text{Cov}(|H_i(f_l)|^2, |H_i(f_l)|_{approx}^2)}{\sigma_{|H_i(f_l)|^2} \cdot \sigma_{|H_i(f_l)|_{approx}^2}} \quad (4.13)$$

$$\rho = \frac{A \cdot \sum_{l=1}^A (|H_i(f_l)|^2 \cdot |H_i(f_l)|_{approx}^2) - \sum_{l=1}^A |H_i(f_l)|^2 \cdot \sum_{l=1}^A |H_i(f_l)|_{approx}^2}{\sqrt{A \cdot \sum_{l=1}^A |H_i(f_l)|^2 - \left(\sum_{l=1}^A |H_i(f_l)|^2\right)^2} \sqrt{A \cdot \sum_{l=1}^A |H_i(f_l)|_{approx}^2 - \left(\sum_{l=1}^A |H_i(f_l)|_{approx}^2\right)^2}} \quad (4.14)$$

In den obigen Gleichungen stellt σ die Standardabweichung der gemessenen beziehungsweise approximierten NEXT-Kopplungsfunktionen dar. Der Parameter A repräsentiert die Anzahl der Frequenzpunkte f_l , an denen die Funktionen $|H_i(f_l)|^2$ und $|H_i(f_l)|_{approx}^2$ gemessen bzw. berechnet wurden. Der nach den obigen Gleichungen berechnete Kreuzkorrelationskoeffizient zwischen dem gemessenen und dem angenäherten quadratischen Betrag von $|H_{21}(f)|^2$ beträgt $\rho = 0,9437$. Für die Funktion $|H_{NEXT,41}(f)|^2$ wurde nach Gleichung (4.40) ein Kreuzkorrelationskoeffizient von $\rho = 0,9653$ berechnet. Die übrigen im Kabelbündel untersuchten NEXT-Kopplungsfunktionen weisen mit den approximierten Funktionen ebenfalls einen Kreuzkorrelationskoeffizienten von über 90 Prozent auf. Für die weiteren Überlegungen wird daher davon ausgegangen, dass die in Gleichung (4.6) definierte Potenzfunktion die jeweilige NEXT-Kopplungsfunktion $|H_i(f)|^2$ für die Modellierung ausreichend genau approximiert.

Mit der Näherung (4.6) folgt für die simulierte Leistungsdichte der Nahnebensprechstörung auf einer Kupferzweidrahtleitung nach Gleichung (4.1)

$$S_{NEXT}(f) \approx \sum_{i=1}^N k_i \cdot f^{x_i} \cdot S_i(f). \quad (4.15)$$

Die Konzentration von xDSL-Systemen auf der „DSLAM-Seite“ der Telefonanschlussleitung ist größer als am Kabelende beim Endkunden. Als Folge davon ist in der Vermittlungsstelle mit größeren Nahnebensprechstörungen als beim Kunden zu rechnen. Die nachfolgenden Betrachtungen konzentrieren sich daher auf die Gegebenheiten in der Vermittlungsstelle.

Die einzelnen Zweidrahtleitungen eines Kabelbündels sind in der Vermittlungsstelle zugänglich. Die Spektren $S_{NEXT}(f)$ und $S_i(f)$ können dort messtechnisch bestimmt werden. Nach den in Abschnitt 1.1 definierten Randbedingungen darf dabei die Übertragung von Daten und Sprache über das betrachtete Kabel nicht beeinträchtigt werden. In Kapitel 5 wird eine Schaltung spezifiziert, mit der die auf den Kupferdoppeladern eines Kabelbündels vorhandenen Leistungsdichtespektren $S_{NEXT}(f)$ und $S_i(f)$ an A Frequenzpunkten im laufenden Betrieb der Telefonanschlussleitung gemessen werden können. Die Spektren $S_{NEXT}(f)$ und $S_i(f)$ seien daher im Weiteren bekannt. Für die Analyse und Reproduktion der auftretenden Nahnebensprechstörungen durch das in Abbildung 4.1 dargestellte modifizierte Nebensprechmodell, sind die Kopplungskonstanten k_i und Exponenten x_i der NEXT-Kopplungsfunktionen $|H_i(f)|^2$ aus den gemessenen Spektren zu bestimmen. Diese Problemstellung stellt mathematisch ein nicht lineares Regressionsmodell dar, welches im folgenden Abschnitt diskutiert wird.

4.3 Nicht lineares Regressionsmodell

Zur Berechnung der Parameter k_i und x_i werden die Leistungsdichtespektren $S_{NEXT}(f)$ und $S_i(f)$ als Zufallsvariablen betrachtet⁸. Abbildung 4.5 zeigt eine Momentaufnahme der Sendeleistungsdichten $S_i(f)$ von zehn SHDSL-Systemen, die parallel in einem Grundbündel betrieben wurden. Das Grundbündel ist hier vollständig mit xDSL-Systemen belegt. Dieser Fall stellt hinsichtlich der im Grundbündel auftretenden Nebensprechstörungen den ungünstigsten Fall dar. In der Darstellung 4.5 wurden die Leistungsdichten wie üblich auf ein mW normiert.

Nach Untersuchungen von Rob van den Brink sind die Sendesignale in einem Kabelbündel voneinander statistisch unabhängig [42]. Infolge dieser Unabhängigkeit werden die Signalspektren $S_i(f)$ als exogene Variablen betrachtet [68], [69]⁹. Die endogene Variable $S_{NEXT}(f)$ ist nach Gleichung (4.1) von den Sendeleistungsdichten $S_i(f)$ abhängig¹⁰. Die Realisierungen $S_{NEXT}(f_j)$ und $S_i(f_j)$ ($j \in 1, \dots, A$) der Zufallsvariablen $S_{NEXT}(f)$ und $S_i(f)$ werden an A Frequenzpunkten f_j gemessen (siehe Kapitel 5).

⁸Um eine übersichtliche Darstellung zu erreichen, beziehen sich die folgenden Ableitungen auf eine einzelne gestörte Kupferdoppelader.

⁹Mit exogen werden Variablen bezeichnet, die mathematisch nicht von weiteren Variablen abhängig (statistisch unabhängig) sind.

¹⁰Endogene Variablen sind von weiteren (Zufalls-)Variablen statistisch abhängig.

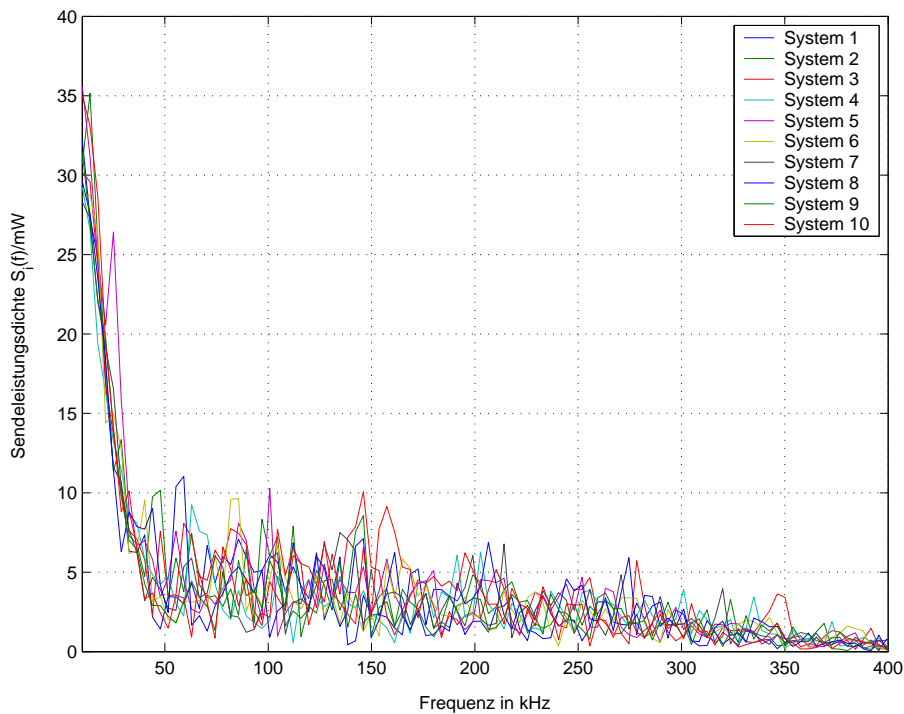


Abbildung 4.5: Gemessene Sendeleistungsdichten von SHDSL-Systemen in einem Grundbündel

Aus dieser Annahme folgt nach Gleichung (4.6) für das modifizierte Nahbensprechmodell am (Mess-)Frequenzpunkt f_j

$$S_{NEXT}(f_j) = \sum_{i=1}^N k_i \cdot f_j^{x_i} \cdot S_i(f_j) + \varepsilon_j \tag{4.16}$$

mit $i \in [1, \dots, N]$ und $j \in [1, \dots, A]$. Die Gleichung (4.16) stellt durch den zu berechnenden Exponenten x_i eine nicht lineare multiple Regressionsfunktion dar. Der Fehler (Residuum) ε_j ist die Realisierung einer nicht zu beobachtenden Zufallsvariablen¹¹. ε_j wird näherungsweise um den Mittelwert Null als normalverteilt angenommen. Unter diesen Voraussetzungen gilt für die Fehlervariable ε_j

$$E\{\varepsilon_j\} = 0 \quad \text{mit: } j \in [1, \dots, A] \tag{4.17}$$

$$\text{Var}\{\varepsilon_j\} = \sigma^2 \tag{4.18}$$

$$\varepsilon_j \approx N(0, \sigma^2). \tag{4.19}$$

Die statistischen Eigenschaften der Fehlervariablen übertragen sich nach

$$\text{Var}\{S_{NEXT}(f_j)\} = \sigma^2 \tag{4.20}$$

¹¹Im Folgenden wird in der Notation nicht zwischen der Fehlervariablen und deren Realisierung unterschieden. Der Fehler und die zugehörige Zufallsvariable werden beide mit ε_j bezeichnet.

auf die endogene Variable (Zielvariable) $S_{NEXT}(f_j)$ [69]. Im Gegensatz zur Fehlervariablen ε_j ist die systematische Komponente $\sum_{i=1}^N k_i \cdot f_j^{x_i} \cdot S_i(f_j)$ in Gleichung (4.16) beobachtbar. Durch das Auftreten des Parameters x_j im Exponenten der Frequenz f handelt es sich bei Gleichung (4.16) um eine nicht lineare multiple Regressionsfunktion. Die numerische Bestimmung der Regressionskoeffizienten erfolgt im nicht linearen Fall mit iterativen Minimierungsalgorithmen [68], [69]. Bei der Anwendung dieser Algorithmen kann aber der Fall eintreten, dass nur ein lokales Minimum der Funktion (4.16) und damit eine suboptimale Lösung für die Parameter k_i und x_i gefunden wird.

Die Untersuchungsergebnisse in Abschnitt 3.2.3 zeigen, dass die gemessenen NEXT-Kopplungsfunktionen näherungsweise mit ca. 15 dB pro Dekade auf der logarithmisch skalierten Frequenzachse ansteigen. Diese Steigung besitzen auch die NEXT-Kopplungsfunktionen der Standardnebensprechmodelle (siehe Abschnitt 3.2.2). Für die Verifikation des Frequenzverlaufs der NEXT-Kopplungsfunktionen wurden die in dem Kabelbündel vom Typ A-2Y(L) $50 \times 2 \times 0,4$ mm gemessenen Übersprechfunktionen durch Geraden nach Gleichung (4.6) approximiert. Die Abbildungen 4.6 und 4.7 zeigen die Häufigkeit der so ermittelten Steigungen für 490 und 1000 untersuchte Nahnebensprechbeziehungen (Stichproben)¹².

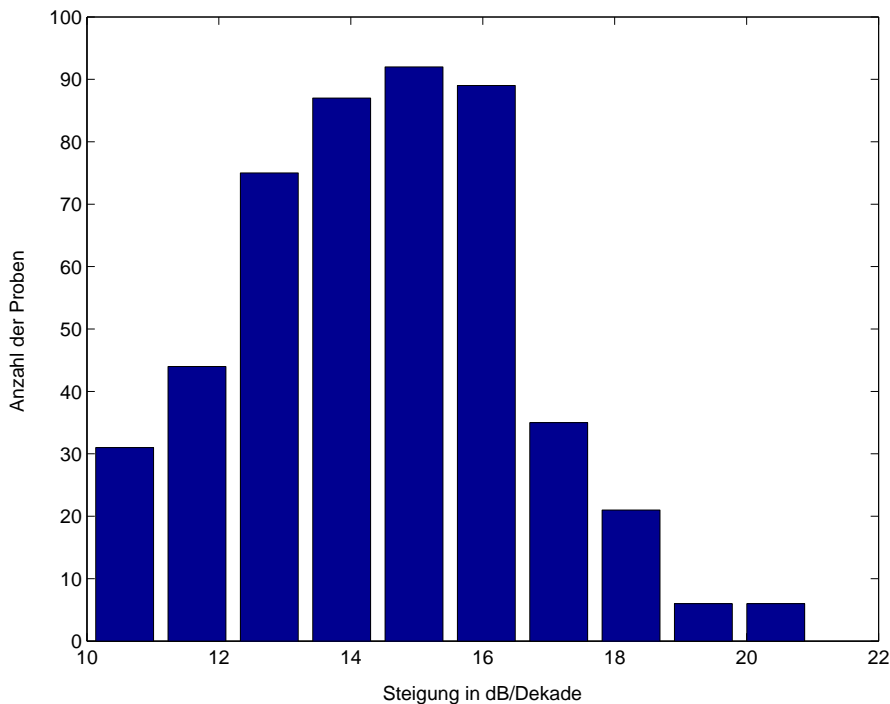


Abbildung 4.6: Häufigkeit der approximierten Steigungen pro Dekade über der Frequenz bei 490 untersuchten Nahnebensprechbeziehungen

¹²Bei den weiteren Betrachtungen wird von einer logarithmisch skalierten Frequenzachse ausgegangen.

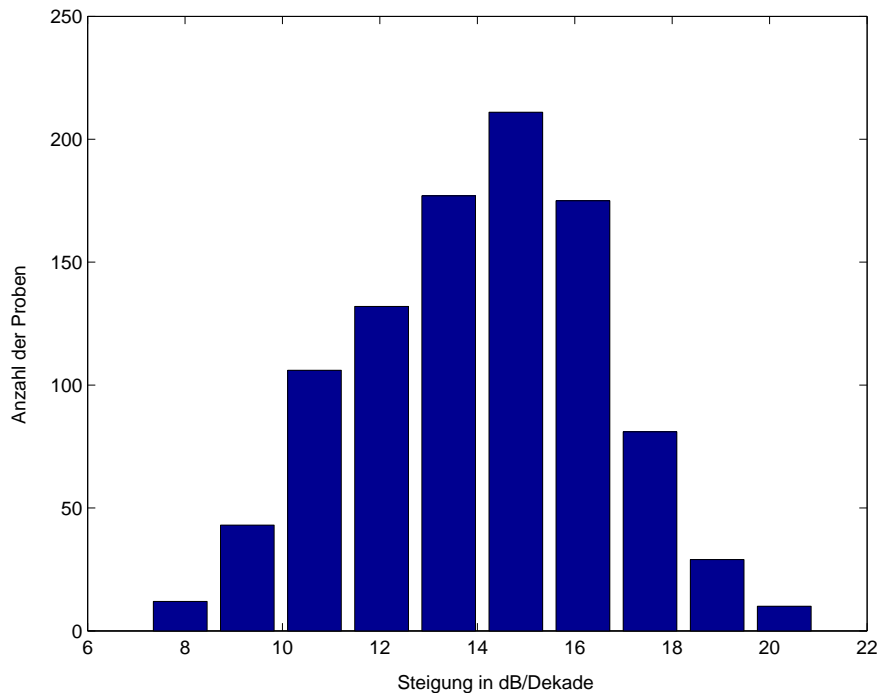


Abbildung 4.7: Häufigkeit der approximierten Steigungen pro Dekade über der Frequenz bei 1000 untersuchten Nahnebensprechbeziehungen

Die als Histogramme dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die Exponenten ähnlich einer Gauß-Verteilung um deren Mittelwert liegen. Bei 490 analysierten NEXT-Beziehungen ergibt sich eine mittlere Steigung von $\bar{x}_{490} = 14,4701$ dB/Dekade. Dabei wurden ausschließlich die Nahnebensprechbeziehungen im Grundbündel der Referenzleitung betrachtet¹³. Die nach [68]

$$\sigma_{x_i} = \sqrt{\frac{1}{D-1} \sum_{i=1}^D (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.21)$$

berechnete Standardabweichung weist für $D = 490$ untersuchte Nahnebensprechbeziehungen einen Wert von $\sigma_{490} = 2,1474$ auf. Im Fall von $D = 1000$ untersuchten NEXT-Kopplungen ergab sich eine mittlere Steigung von $\bar{x}_{1000} = 14,0334$ mit einer Standardabweichung $\sigma_{1000} = 2,4997$. Bei dieser Analyse wurden die NEXT-Beziehungen im gleichen und in den benachbarten Grundbündeln der Referenzleitung betrachtet.

Im Fall von 490 betrachteten NEXT-Kopplungsfunktionen ergibt sich zu der von ETSI definierten Steigung von 15 dB pro Dekade eine Differenz von 0,53 dB/Dekade. Werden auch die Nahnebensprechbeziehungen benachbarter Grundbündel in die Überlegungen mit einbezogen ergibt sich ein Unterschied von 0,96 dB zur Steigung des ETSI-

¹³Nach den Untersuchungen in Abschnitt 3.2.3 besteht zwischen benachbarten Grundbündeln eine Nebensprechdämpfung von über 10 dB. Es wurden daher die Gegebenheiten im Grundbündel und im gesamten Kabelbündel getrennt voneinander betrachtet.

Nahbensprechmodells. Allerdings muss bei den hier dargestellten Untersuchungsergebnissen mit ins Kalkül gezogen werden, dass die von ETSI definierte Steigung der NEXT-Kopplungsfunktionen auf umfangreicheren Messungen basiert, als diese hier durchgeführt werden konnten. Auf Grund der relativ geringen Abweichung von 3,5 Prozent bzw. 6,4 Prozent zu der von ETSI definierten Steigung, wird für die folgenden Betrachtungen von einer konstanten Steigung der NEXT-Kopplungsfunktionen von 15 dB pro Dekade ausgegangen. Mit dieser vereinfachenden Annahme folgt für die Kopplungskonstanten der Funktionen $|H_i(f)|^2$ [26], [32]

$$x_i = 1,5 \quad \text{mit: } i \in \{1, \dots, N\}. \quad (4.22)$$

Für die individuelle Kopplungsfunktion gilt mit der vereinfachenden Annahme nach Gleichung (4.22)

$$|H_i(f)|^2 = x_i \cdot f^{1,5}. \quad (4.23)$$

Mit der Gleichung (4.23) wird die nicht lineare multiple Regressionsfunktion in eine vom Rechenaufwand günstigere multiple lineare Regressionsfunktion

$$S_{NEXT}(f_j) = \sum_{i=1}^N k_i \cdot f_j^{1,5} \cdot S_i(f_j) + \varepsilon_j \quad (4.24)$$

überführt. Die Spektren $S_{NEXT}(f_j)$ und $S_i(f_j)$ seien aus Messungen bekannt. Die Berechnung der individuellen Kopplungskonstanten k_i erfolgt mit dem im folgenden Abschnitt dargestellten linearen Regressionsmodell. Das lineare Regressionmodell ist im Gegensatz zu dem nicht linearen Modell durch einen geschlossenen Ansatz lösbar. Die für die Lösung von nicht linearen Regressionmodellen eingesetzten iterativen Lösungsansätze können zu suboptimalen Lösungen führen. Als Folge ergeben sich Simulationsungenauigkeiten hinsichtlich der zu berechnenden NEXT-Kopplungsfunktionen. Diese Problematik ist bei einem linearen Regressionsmodell nicht gegeben, so dass der lineare Modellansatz im Folgenden weiter betrachtet wird.

4.4 Lineares Regressionsmodell

Nach der Division der gemessenen Nebensprechstörleistungsdichte $S_{NEXT}(f_j)$ durch die Messfrequenz $f_j^{1,5}$ ergibt sich die lineare multiple Regressionsfunktion

$$S'_{NEXT}(f_j) = \sum_{i=1}^N k_i \cdot S_i(f_j) + \varepsilon'_j \quad (4.25)$$

mit $j \in \{1, \dots, A\}$. Das Spektrum $S'_{NEXT}(f_j)$ berechnet sich nach

$$S'_{NEXT}(f_j) = \frac{S_{NEXT}(f_j)}{f_j^{1,5}} \quad (4.26)$$

$$\varepsilon'_j = \frac{\varepsilon_j}{f_j^{1,5}} \quad (4.27)$$

Für den Fehler ε'_j seien die gleichen Bedingungen wie für ε_j gültig (siehe Gleichungen (4.19) - (4.20)). Im Gegensatz zu dem nicht linearen Regressionsmodell aus Gleichung (4.16) sind in Gleichung (4.24) nur die Kopplungskonstanten (Regressionskoeffizienten) k_i zu berechnen. Die Regressionskoeffizienten k_i der linearen multiplen Regressionsfunktion (4.25) können nach dem *Prinzip der kleinsten Quadrate* geschätzt werden [68], [69]. Für die Bestimmung der Regressionskoeffizienten k_i seien die folgenden Voraussetzungen erfüllt:

- Die Anzahl A der gemessenen spektralen Stützstellen für die Spektren $S_{NEXT}(f_j)$ und $S_i(f_j)$ muss mindestens so groß wie die Anzahl N der zu schätzenden Kopplungskonstanten k_i ($i \in [1, \dots, N]$) sein.
- Die Sendespektren $S_i(f)$ ($i \in [1, \dots, N]$) müssen voneinander statistisch unabhängig sein. Dies ist nach der in Abbildung 4.5 exemplarisch dargestellten Messung und den Untersuchungen von R. van den Brink erfüllt [42].

Unter diesen Voraussetzungen sind die Schätzwerte $\hat{k}_1, \dots, \hat{k}_N$ der Kopplungskonstanten so zu bestimmen, dass die quadratische Differenz zwischen der Zielvariablen $S'_{NEXT}(f_j)$ und der systematischen Komponente

$$\sum_{j=1}^A \varepsilon'_j = \sum_{j=1}^A \left[\frac{S_{NEXT}(f_j)}{f_j^{1,5}} - \sum_{i=1}^N [k_i \cdot S_i(f_j)] \right]^2 \quad (4.28)$$

$$= \sum_{j=1}^A \left[S'_{NEXT}(f_j) - \sum_{i=1}^N [k_i \cdot S_i(f_j)] \right]^2 \quad (4.29)$$

minimiert wird.

Zur Berechnung der Kopplungskonstanten k_i werden die Abtastwerte $S'_{NEXT}(f_j)$ in dem Vektor

$$\mathbf{S}'_{NEXT} = \begin{pmatrix} S'_{NEXT}(f_1) \\ S'_{NEXT}(f_2) \\ \vdots \\ S'_{NEXT}(f_A) \end{pmatrix} \quad (4.30)$$

und die diskreten Sendespektren $S_i(f_j)$ in der $(A \times N)$ -Matrix

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_1(f_1) & \dots & S_N(f_1) \\ S_1(f_2) & \dots & S_N(f_2) \\ \vdots & & \vdots \\ S_1(f_A) & \dots & S_N(f_A) \end{pmatrix} \quad (4.31)$$

zusammengefasst.

Mit der Definition des $(N \times 1)$ -dimensionalen geschätzten Kopplungsvektors

$$\hat{\mathbf{k}} = \begin{pmatrix} \hat{k}_1 \\ \hat{k}_2 \\ \vdots \\ \hat{k}_N \end{pmatrix} \quad (4.32)$$

der Regressionskoeffizienten (Kopplungskonstanten) und des $(A \times 1)$ -dimensionalen Fehlervektors

$$\boldsymbol{\varepsilon}' = \begin{pmatrix} \varepsilon'_1 \\ \varepsilon'_2 \\ \vdots \\ \varepsilon'_A \end{pmatrix} \quad (4.33)$$

lautet das lineare Regressionsmodell aus Gleichung (4.25) in Matrixnotation

$$\mathbf{S}'_{NEXT} = \mathbf{S} \hat{\mathbf{k}} + \boldsymbol{\varepsilon}'. \quad (4.34)$$

Die Elemente des Kopplungsvektors $\hat{\mathbf{k}}$ werden nach dem Gauß'schen Prinzip der kleinsten Quadrate berechnet, so dass der Ausdruck

$$\left(\mathbf{S}'_{NEXT} - \mathbf{S} \hat{\mathbf{k}} \right)^T \left(\mathbf{S}'_{NEXT} - \mathbf{S} \hat{\mathbf{k}} \right) \quad (4.35)$$

dessen Minimum zustrebt.

Nach mathematischen Umformungen folgt aus Gleichung (4.35)

$$\mathbf{S}^T \left(\mathbf{S}'_{NEXT} - \mathbf{S} \hat{\mathbf{k}} \right) = 0 \quad (4.36)$$

$$\Rightarrow \mathbf{S}^T \mathbf{S} \hat{\mathbf{k}} = \mathbf{S}^T \mathbf{S}'_{NEXT}. \quad (4.37)$$

Mit den getroffenen Voraussetzungen ist die Matrix $\mathbf{S}^T \mathbf{S}$ invertierbar, so dass sich für den geschätzten Kopplungsvektor $\hat{\mathbf{k}}$ die Gleichung

$$\hat{\mathbf{k}} = (\mathbf{S}^T \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T \mathbf{S}'_{NEXT} \quad (4.38)$$

ergibt. Die auf den Zweidrahtleitungen an den Frequenzpunkten f_j gemessenen (störenden) Signalspektren $S_i(f)$ bilden die Elemente der Matrizen \mathbf{S} und \mathbf{S}^T . Das auf einer Zweidrahtleitung an A Stützstellen gemessene Leistungsdichtespektrum der Nahnebensprechstörung dividiert durch die jeweilige Messfrequenz stellt die Elemente des Vektors \mathbf{S}'_{NEXT} dar.

Gleichung (4.38) stellt den geschätzten Kopplungsvektor für eine gestörte Zweidrahtleitung des Kabelbündels dar. Für die D Leitungspaare eines Kabelbündels folgt aus Gleichung (4.38) bei N störenden Systemen

$$\begin{pmatrix} 0 & \hat{k}_{12} & \dots & \hat{k}_{1D} \\ \hat{k}_{21} & 0 & \dots & \hat{k}_{2D} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{k}_{D1} & \hat{k}_{D2} & \dots & 0 \end{pmatrix} = (\mathbf{S}^T \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T \cdot \begin{pmatrix} S'_{NEXT,1}(f_1) & \dots & S'_{NEXT,N}(f_1) \\ S'_{NEXT,1}(f_2) & \dots & S'_{NEXT,N}(f_2) \\ \vdots & & \vdots \\ S'_{NEXT,1}(f_A) & \dots & S'_{NEXT,N}(f_A) \end{pmatrix}.$$

Werden die gemessenen Spektren der Nahnebensprechstörungen in einer Matrix $\tilde{\mathbf{S}}'_{NEXT}$ und die geschätzten Kopplungskonstanten in einer Matrix $\hat{\mathbf{k}}'$ zusammengefasst ergibt sich

$$\hat{\mathbf{k}}' = (\mathbf{S}^T \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T \cdot \tilde{\mathbf{S}}'_{NEXT}. \quad (4.39)$$

Unter der Voraussetzung, dass die Zweidrahtleitungen keine Nahnebensprechstörungen auf sich selbst verursachen (Rückwirkungsfreiheit), enthält die Matrix $\hat{\mathbf{k}}'$ auf ihrer Hauptdiagonalen ausschließlich Nullelemente. Die Dimension der Matrix $\tilde{\mathbf{S}}'_{NEXT}$ wird durch die Anzahl der spektralen Stützstellen (Messpunkte) A und der Zahl von störenden Übertragungssystemen im Kabelbündel N bestimmt. Die Elemente der Matrizen $\tilde{\mathbf{S}}'_{NEXT}$ und $\hat{\mathbf{k}}'$ werden durch Messungen der Spektren an den Zweidrahtleitungen bestimmt. Durch Anwendung von Gleichung (4.39) können aus den gemessenen Spektren die Kopplungskonstanten k_i der individuellen NEXT-Kopplungsfunktionen $|H_{ji}(f)|^2$ geschätzt werden.

4.5 Simulationsergebnisse

Die nachfolgenden Betrachtungen zeigen die Verifikation des entwickelten Nebensprechmodells. Da die Spektren \mathbf{S} und \mathbf{S}'_{NEXT} zeitgleich an den Frequenzpunkten f_j zu bestimmen sind und nur ein Spektrumanalysator zur Verfügung stand, wurde das Spektrum der Nahnebensprechstörung \mathbf{S}'_{NEXT} rechnerisch ermittelt. Dazu wurden die im Testnetz gemessenen Sendeleistungsdichten der xDSL-Systeme mit den gemessenen NEXT-Kopplungsfunktionen im Frequenzbereich multipliziert. Die so berechneten Teilnebensprechstörungen wurden zu dem Leistungsdichtespektrum der Nahnebensprechstörung aufsummiert. Als störende xDSL-Systeme wurden SHDSL-Systeme

verwendet, die ein Sendespektrum ab 0 Hz besitzen. Zwischen benachbarten Grundbündeln besteht eine mittlere Nahnebensprechdämpfung von über 10 dB. Deshalb wurden die störenden SHDSL-Systeme im gleichen Grundbündel der Referenzleitung angenommen. Die SHDSL-Systeme wurden dabei auf den Zweidrahtleitungen zwei, vier und neun betrieben. Um die Konsistenz mit den vorangegangenen Untersuchungen zu erreichen, wurde die Kupferdoppelader Nummer eins des Kabels DIN VDE 0815 J-2Y(ST) 50 x 2x 0,6 mm im Testnetz als Referenzadernpaar verwendet. Auf dieser Kupferzweidrahtleitung wurde die Nahnebensprechstörung zwischen 10 kHz und 2,0 MHz bestimmt.

Die Abbildungen 4.8 bis 4.10 zeigen die mit dem modifizierten Nahnebensprechmodell geschätzten NEXT-Kopplungsfunktionen $|H_{21}(f)|_{approx}^2$, $|H_{41}(f)|_{approx}^2$ und $|H_{91}(f)|_{approx}^2$ in Relation zu den entsprechend gemessenen NEXT-Kopplungsfunktionen.

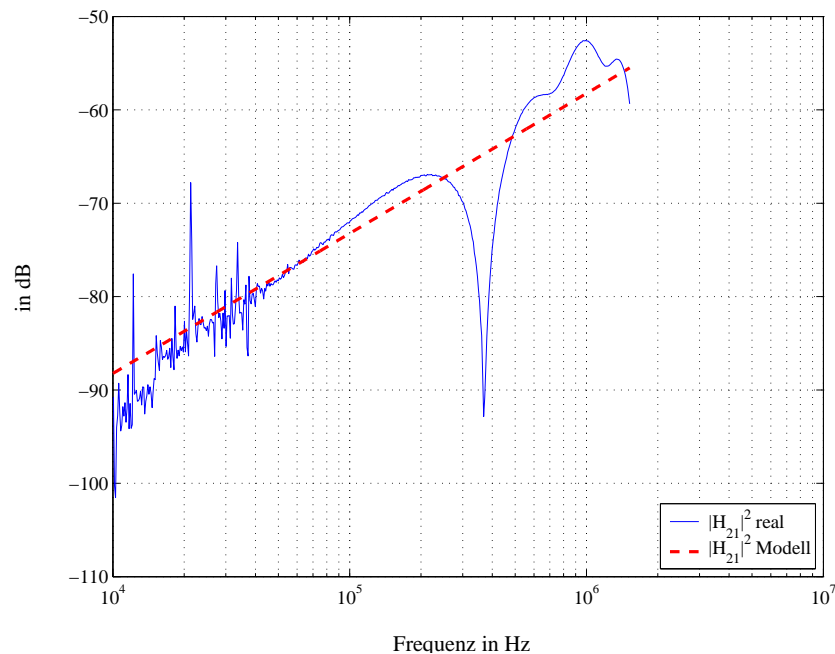


Abbildung 4.8: Gemessene und geschätzte NEXT-Kopplungsfunktion $|H_{21}(f)|^2$

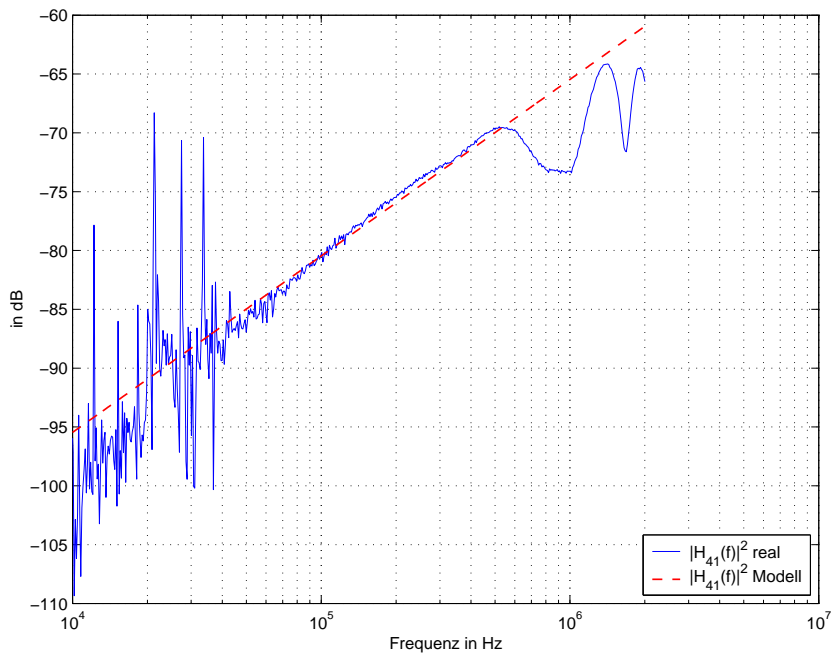


Abbildung 4.9: Gemessene und geschätzte NEXT-Kopplungsfunktion $|H_{41}(f)|^2$

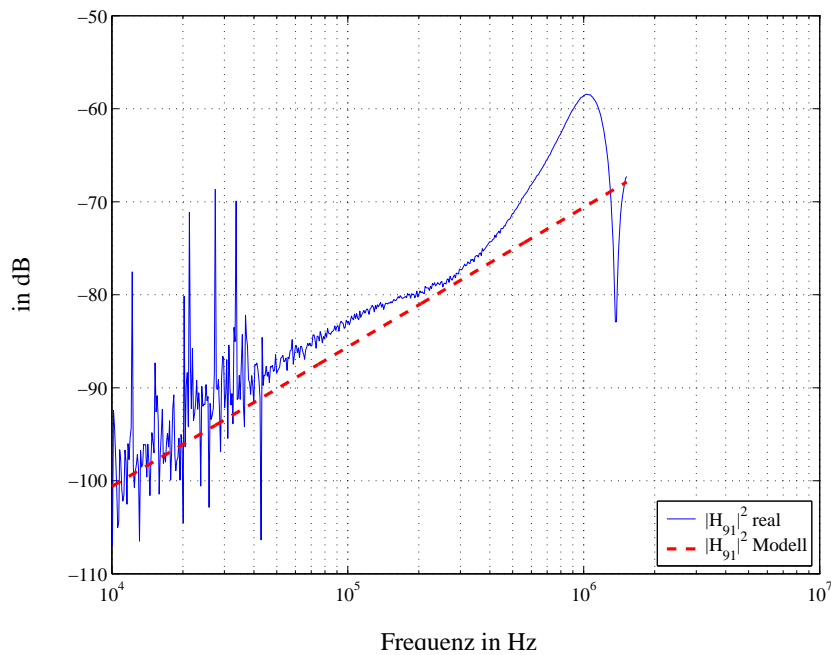


Abbildung 4.10: Gemessene und geschätzte NEXT-Kopplungsfunktion $|H_{91}(f)|^2$

Die berechneten Kopplungskonstanten und der Kreuzkorrelationskoeffizient zwischen der gemessenen und approximierten NEXT-Kopplungsfunktion sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Der Kreuzkorrelationskoeffizient wurde dabei nach

$$\rho_{ji} = \frac{A \cdot \sum_{l=1}^A (|H_i(f_l)|^2 \cdot |H_{ji}(f_l)|_{approx}^2) - \sum_{l=1}^A |H_{ji}(f_l)|^2 \cdot \sum_{l=1}^A |H_{ji}(f_l)|_{approx}^2}{\sqrt{A \cdot \sum_{l=1}^A |H_{ji}(f_l)|^2 - \left(\sum_{l=1}^A |H_{ji}(f_l)|^2\right)^2} \sqrt{A \cdot \sum_{l=1}^A |H_{ji}(f_l)|_{approx}^2 - \left(\sum_{l=1}^A |H_{ji}(f_l)|_{approx}^2\right)^2}}$$

aus der gemessenen Funktion $|H_{ji}(f)|^2$ und der angenäherten Funktion $|H_{ji}(f_l)|_{approx}^2$ berechnet.

Kopplungsfunktion	Kopplungskonstante	Korrelationskoeffizient
$ H_{21}(f) ^2$	$\hat{k}_{21} = 1,5002 \cdot 10^{-15}$	$\rho_{21} = 0,8368$
$ H_{41}(f) ^2$	$\hat{k}_{41} = 2,8426 \cdot 10^{-16}$	$\rho_{41} = 0,8428$
$ H_{91}(f) ^2$	$\hat{k}_{91} = 8,6859 \cdot 10^{-17}$	$\rho_{91} = 0,8788$

Tabelle 4.2: Berechnete Kopplungskonstanten und Korrelationskoeffizienten

Die NEXT-Kopplungsfunktion $|H_{21}(f)|^2$ besitzt zwischen 300 und 400 kHz eine Resonanzstelle. Ebenso weist die Funktion $|H_{21}(f)|^2$ in dem Frequenzintervall von 1 MHz bis 2 MHz eine Resonanzstelle auf. Diese Resonanzstellen sind auf die Biegung der Kabelbündel durch die „Trommelung“ der Kabel im Testnetz zurückzuführen¹⁴. Die schmalbandigen Spitzen im Verlauf der gemessenen NEXT-Kopplungsfunktionen bis ca. 50 kHz entstehen durch die in Abschnitt 3.2.3 diskutierten elektrischen Einrichtungen in der Umgebung der untersuchten Zweidrahtleitungen. Die Reproduktion dieser externen Störungen wird daher nicht in dem hier vorgeschlagenen Nahnebensprechmodell berücksichtigt.

Das hier vorgeschlagene Modell approximiert den Mittelwert der Nahnebensprechkopplungsfunktionen. „Ausreißer“ im Verlauf der Kopplungsfunktionen, wie die auftretenden schmalbandigen Störungen bis ca. 50 kHz und einzelne Messfehler bei der Bestimmung der Signalspektren, stören nicht die „Robustheit“ des Verfahrens. Diese Robustheit führt allerdings auch dazu, dass Überhöhungen wie die der Funktion $|H_{91}(f)|^2$ im Intervall 500 kHz bis 1,4 MHz durch das Modell nicht explizit wiedergegeben werden. Die Leistungsfähigkeit von xDSL-Systemen wird im Labor unter Berücksichtigung eines Sicherheitsabstands (margin) hinsichtlich des Signalrauschleistungsverhältnisses getestet. D. h., dass ein xDSL-System eine maximale Bitfehlerrate nicht überschreiten darf, wenn das Signalrauschleistungsverhältnis beispielsweise um 6 dB reduziert wird [84]. Partielle Differenzen zwischen der geschätzten und gemessenen NEXT-Kopplungsfunktion wirken sich deshalb nicht gravierend auf das Systemverhalten aus. Für die geschätzte NEXT-Kopplungsfunktion ergab sich ein Kreuzkorrelationskoeffizient von $\rho_{91} = 0,8788$. Die durchgeführten Untersuchungen zeigten allgemein, dass die Kreuzkorrelationskoeffizienten ρ_{ji} zwischen den gemessenen und den mit dem vorgeschlagenen Nahnebensprechmodell berechneten NEXT-Kopplungskonstanten größer

¹⁴Die Anschlussleitungen des Zugangsnetzes sind in der Regel nicht auf Kabeltrommeln aufgerollt. Die Betrachtung der darauf zurückzuführenden Resonanzeffekte wird daher im Weiteren nicht diskutiert.

als 0,8 sind. Die Abweichung zwischen Berechnung und Messung sind teilweise auf die geringe Größenordnung der Kopplungskonstanten und der fest angenommenen Steigungen der Kopplungsfunktionen von 15 dB pro Dekade zurückzuführen.

Für einen Vergleich der mit dem entwickelten Modell berechneten Funktionen in Relation zu den NEXT-Kopplungsfunktionen der Standardnebensprechmodelle wurden in den Abbildungen 4.11 und 4.12 die gemessenen und berechneten NEXT-Kopplungsfunktionen $|H_{21}(f)|^2$ und $|H_{91}(f)|^2$ mit dem ETSI-Standardnebensprechmodell dargestellt¹⁵.

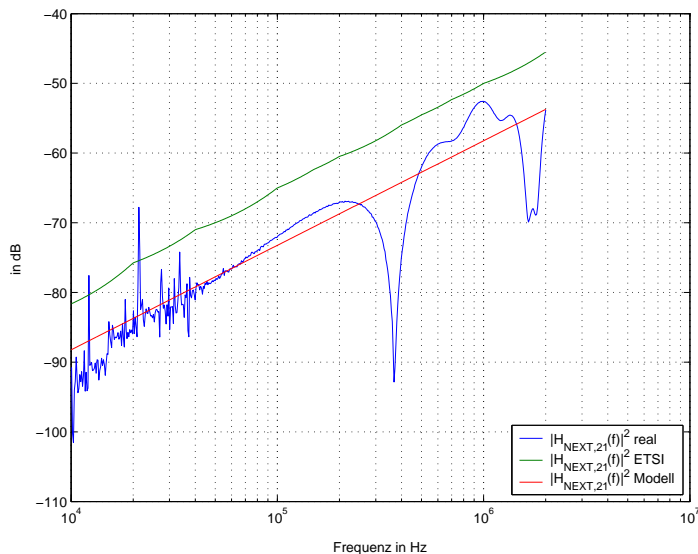


Abbildung 4.11: Gemessene und berechnete NEXT-Kopplungsfunktion $|H_{21}(f)|^2$ in Relation zur ETSI-Kopplungsfunktion

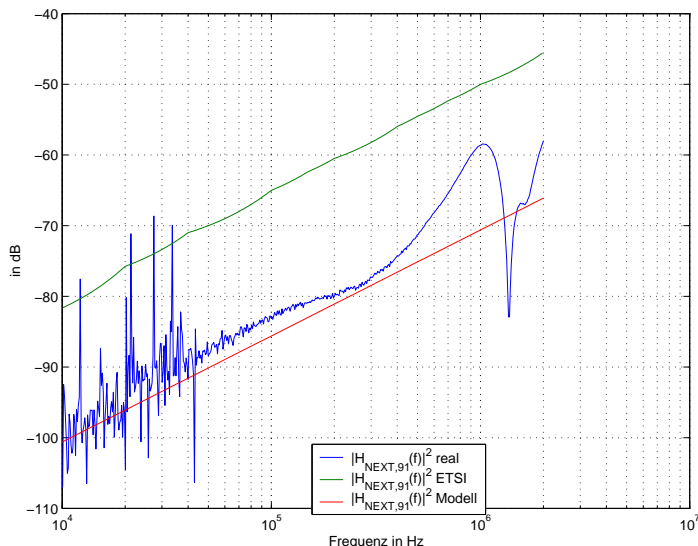


Abbildung 4.12: Gemessene und berechnete NEXT-Kopplungsfunktion $|H_{91}(f)|^2$ in Relation zur ETSI-Kopplungsfunktion

¹⁵Die schmalbandigen Spitzen innerhalb der gemessenen Übertragungsfunktionen sind wiederum auf die Einkopplung elektromagnetischer Störungen aus dem Umfeld des untersuchten Kabelbündels zurückzuführen (Beweis siehe Abschnitt 3.2.3).

Zwischen der gemessenen und mit dem Nahnebensprechmodell berechneten NEXT-Kopplungsfunktion $|H_{21}(f)|^2$ besteht eine mittlere Abweichung von 1,067 dB. Würde die hier betrachtete NEXT-Kopplungsfunktion $|H_{21}(f)|^2$ mit der des ETSI-Nahnebensprechmodells gleichgesetzt werden, ergäbe sich ein mittlerer Fehler von 8,8228 dB. Der entsprechende Sachverhalt gilt auch für die hier untersuchte NEXT-Kopplungsfunktion $|H_{91}(f)|^2$. Die Differenz zwischen der berechneten und gemessenen Funktion $|H_{91}(f)|^2$ beläuft sich im Mittel auf 3,0986 dB. Geht man von der NEXT-Kopplungsfunktion des ETSI-Modells aus, ergibt sich eine mittlere Abweichung von 14,9846 dB.

Infolge der in Abbildung 4.11 dargestellten Differenzen ergeben sich auf der betrachteten Referenzleitung Unterschiede hinsichtlich der induzierten Nahnebensprechstörleistung. In Abbildung 4.13 ist die Leistungsdichte der Nahnebensprechstörung auf der Referenzader gezeigt, wenn diese Störung mit dem ETSI- und dem entwickelten Nahnebensprechmodell simuliert wird. Als Störquelle wurde bei dieser Simulation ein SHDSL-System auf der Zweidrahtleitung zwei angenommen¹⁶.

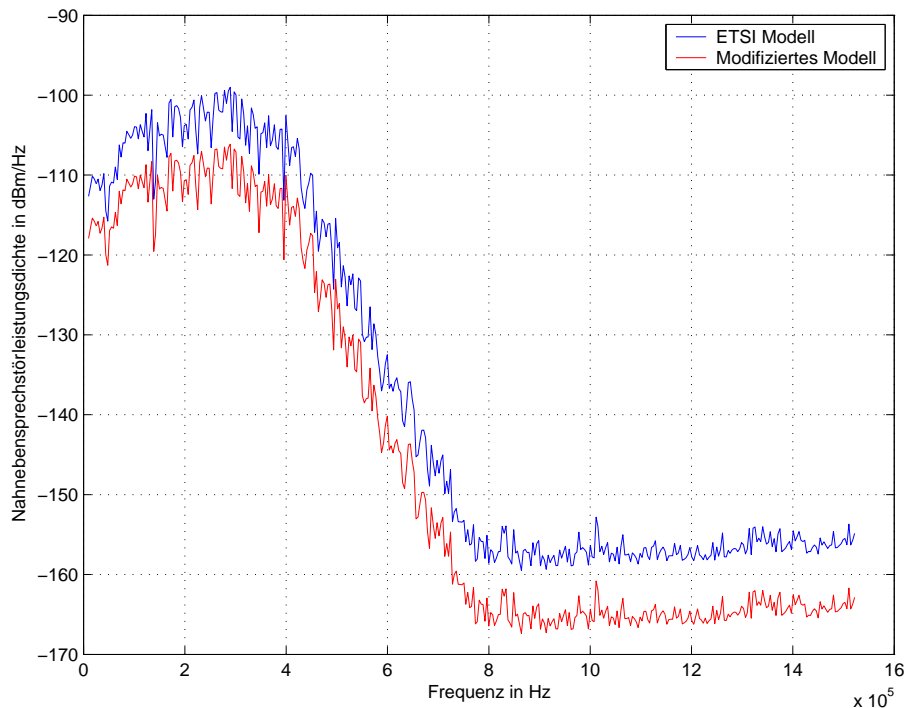


Abbildung 4.13: Nahnebensprechstörleistung auf der Referenzleitung mit dem ETSI- und dem entwickelten Nahnebensprechmodell

Aus der individuellen Schätzung der messbaren Nahnebensprechkopplungsfunktion $|H_{21}(f)|^2$ durch das modifizierte Nahnebensprechmodell (siehe Abbildung 4.11) resultiert eine Nahnebensprechstörleistung auf der Referenzleitung von $3,5251 \cdot 10^{-9}$ dBm. Im Gegensatz dazu ergibt sich nach dem Nahnebensprechmodell von ETSI TM6 für das gleiche Szenario eine pessimistischere Störleistung von $1,7281 \cdot 10^{-8}$ dBm. Werden

¹⁶SHDSL-Systeme senden in einem Frequenzband ab 0 Hz, so dass dieses Übertragungssystem in dieser Simulation als Störquelle verwendet wurde.

die dargestellten Störspektren zu Labortests herangezogen, so wird ein xDSL-System in dem hier betrachteten Fall mit dem ETSI-Modell in einer, im Vergleich zur Realität, zu pessimistischen Störumgebung getestet. Die so erhaltenen Leistungswerte des xDSL-Systems sind daher nur bedingt auf die realen Verhältnisse übertragbar. Das modifizierte Nahnebensprechmodell approximiert die in der Simulation betrachtete NEXT-Kopplungsfunktion mit einem Kreuzkorrelationskoeffizienten von 0,8368 (siehe Tabelle 4.2 und Abbildung 4.8), so dass die Nahnebensprechstörung nach dem hier vorgeschlagenen Modell repräsentativ für die tatsächlich messbare Nahnebenstörung auf der Referenzleitung ist.

Für die Untersuchung inwieweit die gemessenen NEXT-Kopplungsfunktionen allgemein durch das entwickelte Nahnebensprechmodell reproduziert werden, wurden die Kreuzkorrelationskoeffizienten ρ_{ji} zwischen den gemessenen und approximierten Funktionen betrachtet. Die Häufigkeit der Kreuzkorrelationskoeffizienten ist in Abbildung 4.14 dargestellt. Ferner zeigt Abbildung 4.14 die Häufigkeit der Kreuzkorrelationskoeffizienten des Nahnebensprechmodells nach ETSI TM6.

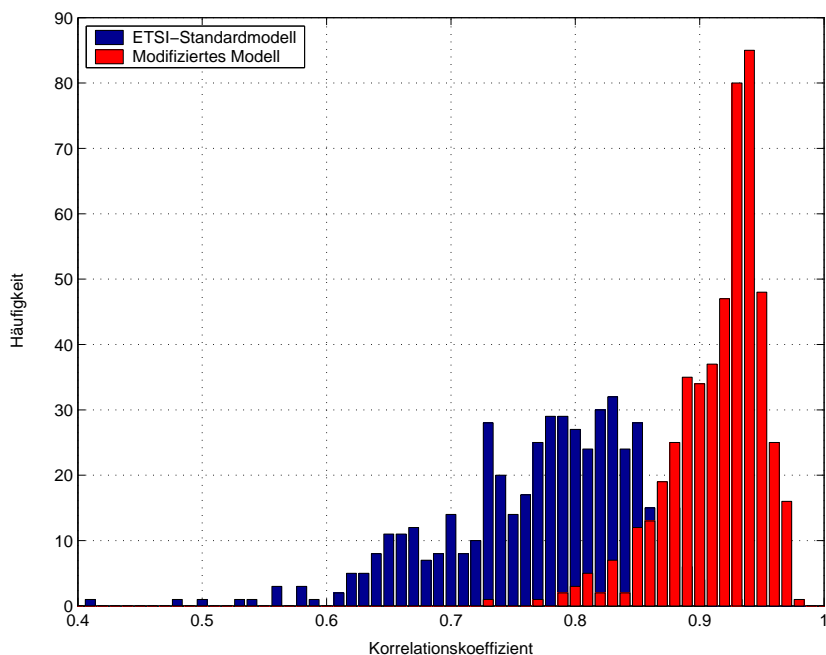


Abbildung 4.14: Häufigkeit der Kreuzkorrelationskoeffizienten der Approximation in Relation zum Nahnebensprechmodell nach ETSI

Die Analyse der Ergebnisse ergab, dass sich für das entwickelte Nahnebensprechmodell ein mittlerer Kreuzkorrelationskoeffizient von 0,9151 ergibt. Im Vergleich dazu reproduziert die NEXT-Kopplungsfunktion des ETSI-Nahnebensprechmodells die gemessenen Übersprechfunktionen nur mit einem mittleren Kreuzkorrelationskoeffizienten von 0,7731. Wie die Untersuchungsergebnisse zeigen, approximiert das hier vorgeschlagene Modell die messbaren NEXT-Kopplungsfunktionen hinsichtlich des Kreuzkorrelationskoeffizienten im Mittel um 0,142 genauer, als das Nahnebensprechmodell des ETSI TM6 SHDSL-Standards.

4.6 Diskussion und Bewertung des modifizierten Nahnebensprechmodells

Chaohuang Zeng entwickelte ein, im Vergleich zu den bisherigen Standardnebensprechmodellen, realistischeres Modell zur Abschätzung der Nebensprechsituation in einem Kabelbündel [66]. Dieses realistischere Modell arbeitet im Zeitbereich. Zur Bestimmung der Nahnebensprechkopplungsfunktionen werden vier wesentliche Prozeduren vorgenommen. Zunächst werden die übertragenen und empfangenen Signale eines xDSL-Modems über eine vorbestimmte Zeitdauer erfasst und zu einem Netzwartungszentrum übermittelt. Diese Erfassung findet durch Abtastung der Signale im Zeitbereich statt. Anschließend werden die Signale gemäß der Taktrate des gestörten Empfängers, d.h. des Empfängers an dessen Eingang die Nahnebensprechstörung berechnet werden soll, einem „Resampling-Vorgang“ unterzogen. In diesem Vorgang wird die Abtastrate mit der die gesendeten und empfangenen Signale von einem xDSL-Modem ursprünglich abgetastet wurden, auf die Abtastrate des gestörten Empfängers umgesetzt. Nachdem die parallel in einem Kabelbündel übertragenen Signale Zeitdifferenzen aufweisen, werden diese zeitlichen Unterschiede zwischen den Signalen durch eine Kreuzkorrelationsanalyse geschätzt¹⁷. Schließlich werden die Übersprechkopplungsfunktionen im Zeitbereich geschätzt. Das Resultat dieses Verfahrens ist eine Beschreibung der Überkopplung (Nebensprechkopplung) im Zeitbereich. Das Nebensprechmodell besteht dabei aus einem Sendefilter, einem nachgeschalteten Übersprechfilter und einem wiederum nachgeschalteten Empfängerfilter.

Problematisch an diesem vollständig im Zeitbereich arbeitenden Modell ist, dass auf Grund der im Zeitbereich arbeitenden aufwendigen und rechenintensiven Operationen das Modell in der Praxis nur hardwareaufwendig zu implementieren ist. Die Takt-differenz zwischen den parallel an einem Kabelbündel betriebenen xDSL-Systemen ist bei dem Zeitbereichsverfahren durch eine Kreuzkorrelationsanalyse rechenintensiv und zeitaufwendig zu bestimmen. Nach der Kreuzkorrelationsanalyse kann ein Modellfilter berechnet werden, welches im Zeitbereich die Nebensprechkopplung von einem Adernpaar auf ein anderes Adernpaar in einem Kabelbündel beschreibt.

Dem in dieser Arbeit vorgeschlagenen Nahnebensprechmodell liegt zugrunde, dass die Ermittlung der Nebensprechkopplungsfunktionen im Frequenzbereich einfacher als im Zeitbereich ist. Innerhalb des neu entwickelten Nebensprechmodells werden Multiplikationen und keine aufwendiger zu realisierenden Faltungsoperationen ausgeführt. Dementsprechend ist das hier vorgestellte Modell kosteneffizient in eine Hardware zu implementieren.

Das hier entwickelte Modell kann in einen Störsignalgenerator implementiert werden, mit dem reale Nebensprechverhältnisse im Labor für xDSL-Systemtests simuliert werden können. Der Betrieb des Störsignalgenerators ist wesentlich vereinfacht, da die Übertragungsfunktionen zwischen den einzelnen Leitungen in einem Kabelbündel lediglich durch Kopplungskonstanten charakterisiert werden. Im Gegensatz zu kompletten Sätzen von Filterkoeffizienten für Impulsantworten im Zeitbereich, sind die Kopplungskonstanten effizient abspeicherbar. Ein Störsignalgenerator kann demzufolge einfach

¹⁷Auf Grund dessen, dass nicht alle Systemtakte der an einem Kabelbündel parallel betriebenen Übertragungssysteme zu einander synchron sind, kommt es zu den beschriebenen Zeitdifferenzen.

und preisgünstig implementiert werden. Ein solcher flexibler Störsignalgenerator ist in der Lage, für variable Signalleistungen auf den benachbarten Zweidrahtleitungen das Störsignal (Leistungsdichte der Nahnebensprechstörung) auf einer Untersuchungsleitung zu berechnen und zu reproduzieren. Darüber hinaus kann jede Kupferdoppelader des Kabelbündels als Referenzleitung aufgefasst werden, während die anderen Leitungen störende Sendesignale führen.

Ein Vorteil des hier vorgeschlagenen Verfahrens besteht darin, dass eine automatische Bestimmung der Nahnebensprechkopplungsfunktionen im laufenden Betrieb eines Telefonkabelbündels möglich ist. Dabei werden die unterschiedlichen physikalischen und geometrischen Einflussfaktoren für das Nebensprechen berücksichtigt. Im Gegensatz dazu simulieren die standardisierten Nebensprechmodelle den allgemeinen ein Prozent Worst-Case Fall über eine Vielzahl von Kabelbündeln. Ferner ist mit dem vorgeschlagenen modifizierten Modell eine individuelle Reproduktion von Nebensprechstörungen realer Telefonkabelbündel für Test- und Analysezwecke durch den flexiblen Störsignalgenerator möglich. Dadurch können xDSL-Systeme in einer realistischen Umgebung dimensioniert und optimiert werden.

Außerdem können mit dem modifizierten Nahnebensprechmodell unterschiedliche Sendespektren auf störenden Zweidrahtleitungen des Bündelkabels berücksichtigt werden. Damit ist es nicht nur möglich die bisherigen xDSL-Konzepte, wie z. B. ADSL oder ISDN in die Überlegung bei der Netzplanung mit einzubeziehen, sondern es können auch die spektralen Verläufe zukünftiger Übertragungssysteme im Telefonanschlussnetz analysiert werden. Die standardisierten Nebensprechmodelle gehen im Gegensatz dazu von fest vordefinierten Störspektren (Leistungsdichteprofile) aus. Sollen die tatsächlichen Nebensprechverhältnisse in einem Kabelbündel erfasst werden, so sind derzeit umfangreiche Messungen nötig [70].

Ferner reproduzieren die ein Prozent Worst-Case Power-Sum Modelle der xDSL-Standards die maximal in europäischen und amerikanischen Kabelbündeln auftretenden Nebensprechstörungen mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 Prozent (siehe Abschnitt 3.2.2 und 3.3.2). Das vorgeschlagene Modell simuliert die Nahnebensprechstörungen für ein Bündelkabel individuell. Zur Bestimmung der einzelnen Kopplungskonstanten werden die tatsächlich in einem realen Telefonbündelkabel auftretenden Nahnebensprechübertragungsfunktionen durch das Modell geschätzt.

Das hier vorgeschlagene Nahnebensprechmodell ist ebenfalls in einem Analysetool für xDSL-Leitungen einsetzbar. Nachdem sich das hier entwickelte Nahnebensprechmodell auf die in einem Kabelbündel vorhandenen Nebensprechstörungen adaptiert hat, d.h. nachdem die Kopplungskonstanten k_i berechnet worden sind, schätzt das Analysetool die in einem betrachteten Kabelbündel auftretenden Nebensprechstörungen ab. Diese Abschätzung ermöglicht eine im Hinblick der auftretenden Nahnebensprechstörungen optimierte Belegung eines Kabelbündels mit xDSL-Systemen. Dies gilt auch für xDSL-Systeme, die in unterschiedlichen Frequenzbereichen senden und verschiedene Leistungsspektren haben, wie zum Beispiel ISDN oder ADSL. Gegenwärtig sind Abschätzungen zur optimierten Belegung von Kabelbündeln nur durch aufwendige Messungen oder durch Simulationen mit dem standardisierten Nebensprechmodell möglich.

4.7 Zusammenfassung

Die Nebensprechkopplungsfunktionen sind für die Abschätzung und Modellierung von Nebensprechstörungen von grundlegender Bedeutung. Diese Kopplungsfunktionen müssen jedoch zunächst für ein Kabelbündel bestimmt werden. Die Nebensprechmodelle der xDSL-Standards von ANSI T1E1 und ETSI TM6 leiten die Nahnebensprechkopplungsfunktion des jeweiligen Modells aus der Mittelung entsprechender Messungen ab. Infolge dieser vereinfachenden Annahme weichen die einzelnen NEXT-Kopplungsfunktionen realer Kabelbündel von den Kopplungsfunktionen der Modelle im Einzelnen ab.

Dieses Kapitels stellt ein verbessertes Modell zur Bestimmung der NEXT-Kopplungsfunktionen eines Kabelbündels vor. Dazu wurden eingangs die systemtheoretischen Grundlagen für die Modellierung von Nahnebensprechstörungen im Frequenzbereich in einem Blockschaltbild beschrieben. Die einzelnen Übersprechfunktionen werden dabei individuell durch eine NEXT-Kopplungsfunktion berücksichtigt. Anhand von entsprechenden Analysen wurde gezeigt, dass die NEXT-Kopplungsfunktionen durch Potenzfunktionen approximiert werden können.

Die Berechnung der Potenzfunktionsparameter (Übersprechfunktionen) wurde mathematisch auf ein multiples nichtlineares Regressionsmodell zurückgeführt. Durch Verwendung der in Kapitel 3 ermittelten Untersuchungsergebnisse wurde für den hier betrachteten Anwendungsfall das multiple nichtlineare Regressionsmodell in ein multiples lineares Regressionsmodell überführt. Letzteres Modell zeichnet sich gegenüber dem nichtlinearen Modell durch einen analytisch geschlossenen Lösungsansatz aus. Die Lösung des linearen Modells ist dementsprechend mit einem geringeren mathematischen Aufwand zu erreichen. Dieser Sachverhalt spielt für die praktische Implementierung des Modells eine wesentliche Rolle.

Basierend auf den durchgeführten mathematischen Ableitungen wurde das vorgeschlagene Nahnebensprechmodell simulativ verifiziert. Für eine Einschätzung des Modells wurden die Simulationsergebnisse des hier vorgeschlagenen Modells dem Nahnebensprechmodell von ETSI TM6 gegenübergestellt. Die sich einstellenden Abweichungen wurden analysiert und diskutiert. Das entwickelte Nahnebensprechmodell bestimmt automatisch und individuell die NEXT-Kopplungsfunktionen einer Telefonanschlussleitung für Test- und Analysezwecke. Kostenaufwändige Messungen vor Ort sowie das zeitweise Abschalten der Sendeanlagen für Messungen ist mit dem Einsatz des hier vorgestellten Modells unnötig. Durch die Modellierung von Nebensprechstörungen im Frequenzbereich verwendet das hier vorgestellte Nebensprechmodell Multiplikationen. Im Gegensatz dazu verwenden äquivalente Zeitbereichsmodelle zur Berechnung der NEXT-Kopplungsfunktionen aufwändiger in Hardware zu realisierende Faltungsoperationen.

5 Systemimplementierung und Einsatzbereiche des verbesserten Nebensprechmodells

In diesem Kapitel wird auf die Implementierungsaspekte für eine Hardwarerealisierung des in Kapitel 4 abgeleiteten Nahnebensprechmodells eingegangen. Das Untersuchungsergebnis bildet das Systemkonzept für die Realisierung der Messschaltung zur Bestimmung der Sendesignalspektren und des Nahnebensprechstörspektrums auf der Referenzleitung. In Abschnitt 5.1 werden die Randbedingungen für die Systemimplementierung diskutiert. Zwei mögliche Schaltungskonzepte werden in den Abschnitten 5.2.1 und 5.2.2 beschrieben. Ein mögliches Einsatzszenario für das Modell wird in Abschnitt 5.3 betrachtet. Die wesentlichen Inhalte des Kapitels sind in Abschnitt 5.4 zusammengefasst.

5.1 Einführung

Das in Kapitel 4 abgeleitete Nebensprechmodell benötigt zur Berechnung der NEXT-Kopplungsfunktionen $|H_{ji}(f)|^2$ die Spektren der störenden Sendesignale $S_i(f)$, sowie das auf der gestörten Doppelader zu messende Leistungsdichtespektrum der Nahnebensprechstörung $S_{NEXT}(f)$ (siehe Abschnitt 4.4).

Die Hardwarerealisierung des Modells wird funktional in die zwei Teilbereiche:

1. Schaltung zur Messung der störenden Sendespektren und des Leistungsdichtespektrums der Nahnebensprechstörung auf der gestörten Zweidrahtleitung
2. Analytische Einheit zur Berechnung der Nahnebensprechkopplungsfunktionen $|H_{ji}(f)|^2$ und des Nahnebensprechstörspektrums $S_{NEXT}(f)$ für verschiedene Konstellationen von Störern im Kabelbündel

gegliedert. Sind die Spektren der störenden Systeme und die NEXT-Kopplungsfunktionen des Kabelbündels bekannt, kann die Nahnebensprechstörung für unterschiedliche Beschaltungsszenarien (unterschiedliche Beschaltung des betrachteten Kabelbündels) berechnet werden.

Die derzeit auf dem Markt angebotenen Messgeräte bestimmen pro Messung lediglich die Nebensprechkopplungen zwischen zwei Kupferdoppeladern bzw. das Störspektrum auf einer einzigen Zweidrahtleitung [70], [85], [86]. Infolge dessen das sich die Signalspektren auf den störenden Zweidrahtleitungen zeitlich ändern können (Zeitvarianz),

sind für die Anwendung des in dieser Arbeit abgeleiteten Modells die spektralen Messungen zeitgleich durchzuführen. Dazu ist eine spezielle Messschaltung zu entwickeln. Mit den gemessenen Spektren werden in einem PC oder in einem digitalen Signalprozessor (DSP) die individuellen NEXT-Kopplungsfunktionen und das Nahnebensprechstörpektrum auf der Referenzleitung nach dem in Kapitel 4 beschriebenen Prinzip berechnet. Ist der DSP in einem Störsignalgenerator integriert, können die Berechnung und die Reproduktion der in einem Kabelbündel auftretenden Nahnebensprechstörungen in einem einzigen Gerät erfolgen. Dieser flexible Störsignalgenerator reproduziert dynamisch die auf den Zweidrahtleitungen auftretenden Nebensprechstörungen¹ (siehe Abschnitt 5.3.1).

Sind die Berechnungen nach dem Nahnebensprechmodell in Software realisierbar, so ist für die parallele Messung der störenden Spektren $S_i(f)$ eine Schaltung (Messschaltung) in Hardware zu realisieren. Die nachfolgenden Abschnitte spezifizieren diese Messschaltung.

5.2 Messsystem

Die Zweidrahtleitungen eines Telefonanschlusskabels sind in der Vermittlungsstelle am Hauptverteiler oder am DSLAM zugänglich. Für die Bestimmung der Spektren ist die Messschaltung am Hauptverteiler oder im DSLAM zu integrieren².

Das Spektrum von Signalen kann grundsätzlich nach dem „FFT-Prinzip“ und nach dem „Heterodyn-Prinzip“ (Überlagerungsprinzip) durchgeführt werden [73], [87]- [89]. In den folgenden Abschnitten werden diese Messprinzipien und -schaltungen hinsichtlich des hier betrachteten Anwendungsfalls untersucht.

5.2.1 Messschaltung nach dem FFT-Prinzip

Die Leistungsdichtespektren der Signale können durch Messungen im Zeitbereich und anschließender Fast-Fourier-Transformation (FFT) ermittelt werden. Dieses Prinzip ist für eine Zweidrahtleitung eines Kabelbündels in der Abbildung 5.1 grafisch dargestellt [73], [87].

¹Die Flexibilität des hier beschriebenen Störsignalgenerators bezieht sich auf die Reproduktion der individuell in Kabelbündeln auftretenden Nahnebensprechstörungen.

²In Abschnitt 5.3 wird ein mögliches Einsatzszenario dargestellt.

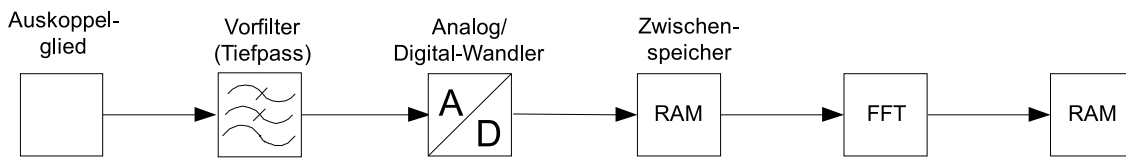


Abbildung 5.1: FFT-Analysator zur Messung der Signal- und Nahneben-sprechstörspektren

Das Auskoppelglied passt die übrige Schaltung auf die charakteristische Impedanz der Kupferdoppeladern von 135 Ohm an. Dieses Auskoppelglied stellt einen hochohmi-gen Schaltkreis dar, über den das zu messende Signal (Sendesignal oder Nahneben-sprechstörung) entnommen wird. Die hohe Eingangsimpedanz des Auskoppelglieds verhindert idealerweise die Beeinflussung der auf den Kupferdoppeladern vorhandenen Signale.

Das in Abbildung 5.1 dargestellte Vorfilter (Tiefpass) beschränkt den Eingangsfre-quenzbereich auf den für die xDSL-Technik relevanten Frequenzbereich (siehe Tabelle 5.1). Mit diesem Filter wird die Einhaltung des Abtasttheorems sichergestellt [87], [90]. Für die weitere Signalverarbeitung wird das Eingangssignal der Schaltung einem Analog-Digital-Wandler (A-D-Wandler) zugeführt. Dieser Wandler tastet das Ein-gangssignal ab und digitalisiert die Amplitude des Signals. Die digitalen Werte werden bis zur Berechnung der Fourier-Transformierten in einem RAM zwischengespeichert. Die FFT erfolgt, nachdem das Eingangssignal zu allen Abtastzeitpunkten ermittelt wurde, in einem digitalen Signalprozessor.

Analog-Digital-Wandler mit hoher Auflösung besitzen nur eine beschränkte Bandbreite. Daher ist ein Kompromiss zwischen der erreichbaren Dynamik und dem maximal mögli-chen Eingangsfrequenzbereich zu finden. Die begrenzte Bandbreite von A-D-Wandlern führt dazu, dass der in Abbildung 5.1 dargestellte FFT-Analysator lediglich zur Mes-sung niederfrequenter Signale einsetzbar ist [73]. Die Leistungsdichtespektren höherfre-quenter Signale können nach dem „Überlagerungsprinzip“ (Heterodyn-Prinzip) direkt im Frequenzbereich bestimmt werden [87], [89]. Aus den angeführten Gründen wird im folgenden Abschnitt eine Messschaltung nach dem Heterodyn-Prinzip spezifiziert.

5.2.2 Messschaltung nach dem Heterodyn-Prinzip

Bei der Anwendung des Heterodyn-Prinzips wird das zu messende Spektrum (Ein-gangssignal) in seine Frequenzkomponenten zerlegt. Das Blockschaltbild der Mess-schaltung für das hier vorgeschlagene Nahnebensprechmodell ist repräsentativ für eine Kupferzweidrahtleitung in Abbildung 5.2 dargestellt.

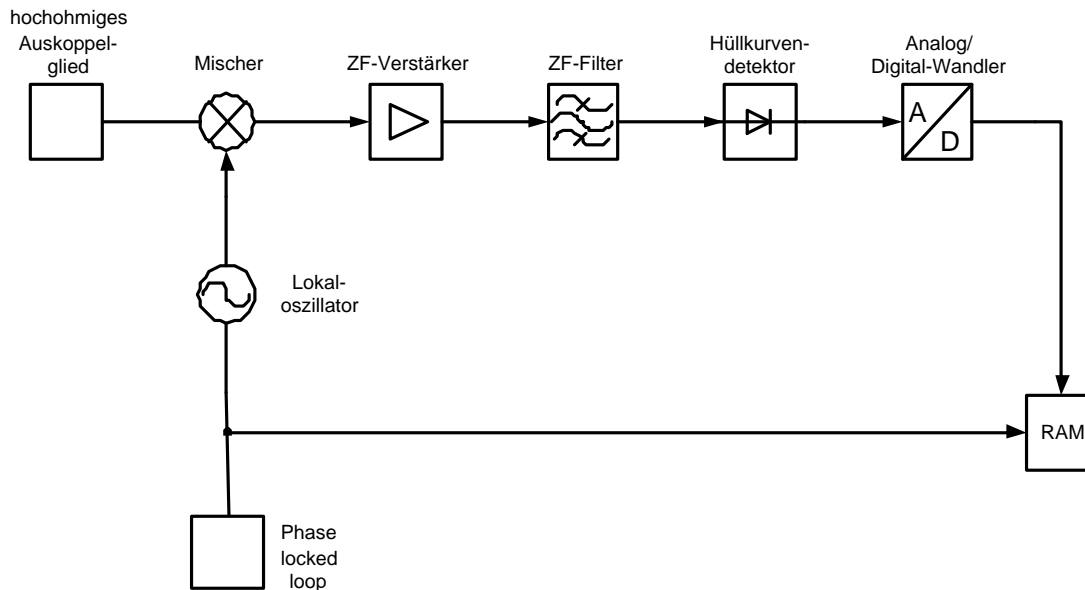


Abbildung 5.2: Messschaltung für das entwickelte Nebensprechmodell nach dem Überlagerungsprinzip (Heterodyn-Prinzip)

Das in Abbildung 5.2 eingezeichnete Auskoppelglied passt die Messschaltung auf die charakteristische Impedanz der zu untersuchenden Zweidrahtleitung an und verhindert eine Beeinflussung des zu messenden Signals durch die Messschaltung (siehe Abschnitt 5.2.1). Das ausgekoppelte Signal wird nach der Filterung mit einem Tiefpass (Vorfilter) über einen Mischer auf die Zwischenfrequenz f_{ZF} umgesetzt. Die Ansteuerung des Mixers erfolgt über einen Lokaloszillator. Die Schwingfrequenz des Lokaloszillators ist über einen digitalen Phasenregelkreis (Phase locked loop, PLL) abstimmbare, so dass der gesamte Eingangsfrequenzbereich auf eine feste Zwischenfrequenz f_{ZF} umgesetzt werden kann. Die Lokaloszillatorfrequenzen werden durch die Teilungsfaktoren des Phasenregelkreises eingestellt. Messungenauigkeiten, die sich aus abstimmbaren Filtern ergeben, werden durch ein Zwischenfrequenzfilter (ZF-Filter) mit konstanter Mittenfrequenz vermieden. Die bei der Frequenzumsetzung störenden Spiegelfrequenzen werden durch das Vorfilter unterdrückt. Dabei wird das Signal vor der Zwischenfrequenz-Filterung mit dem Zwischenfrequenz-Verstärker (ZF-Verstärker) in der Leistung verstärkt.

Der bei den Messungen zu erfassende Eingangsfrequenzbereich richtet sich in der hier betrachteten Applikation nach der maximalen Bandbreite der für das Nebensprechen verantwortlichen Analog-, ISDN- und xDSL-Signale. In Tabelle 5.1 sind die Bandbreiten dieser Übertragungssysteme zusammengefasst³ [85], [91].

³VDSL-Systeme werden durch die Schaltung nicht berücksichtigt, da bei dieser Technologie die Line Cards in der Regel nicht in der Vermittlungsstelle sondern in einem Kabelverzweiger untergebracht sind.

Technologie	physikalische Bandbreite
Analoge Telephonie	300 Hz – 3,4 kHz
ISDN (Leitungscode 4B3T)	0 Hz – 120 kHz
ADSL (up- und downstream)	40 kHz – 1100 kHz
HDSL	0 Hz – ca. 240 kHz
SHDSL	0 Hz – ca. 240 kHz

Tabelle 5.1: Bandbreiten der im deutschen Anschlussnetz betriebenen Analog-, ISDN-, ADSL-, HDSL-, SHDSL-Systeme

Unter der Annahme das in der (Orts-)Vermittlungsstelle in der Regel neben Analog- und ISDN- nur ADSL- und SHDSL-Systeme terminiert werden, reicht der von der Messschaltung zu erfassende Eingangsfrequenzbereich von $f_{E,min} = 300 \text{ Hz}$ bis ca. $f_{E,max} = 1,5 \text{ MHz}$. Die maximale Grenzfrequenz $f_{E,max}$ wird auf 2,0 MHz gesetzt, um alle für das betrachtete Nahnebensprechen relevanten Spektralanteile erfassen zu können. Die höhere Grenzfrequenz stellt auch eine „Reserve“ für die Flankensteilheit des Eingangsfilters dar. Eine dynamische Variation des von $f_{E,min}$ und $f_{E,max}$ festgelegten Eingangsfrequenzbereiches ist in der hier spezifizierten Anwendung nicht vorgesehen.

Nach der Frequenzumsetzung wird das Signal im Zwischenfrequenzbereich abgetastet und digitalisiert. Die digitalen Messwerte werden bis zur Übertragung an die Rechen-einheit, beziehungsweise bis zu einer neuen Messung, im RAM abgelegt.

Mit der in Abbildung 5.2 dargestellten Schaltung können höherfrequente Signale über einen größeren Dynamikbereich als mit der in Abbildung 5.1 skizzierten Schaltung erfasst werden [73]. Ferner benötigt die Schaltung nach dem Überlagerungsprinzip keine Rechenleistung in einem digitalen Signalprozessor zur Bestimmung der NEXT-Kopplungsfunktionen. Auf Grund dieser Vorteile wird im Folgenden die in Abbildung 5.2 dargestellte Schaltung nach dem Heterodyn-Prinzip detailliert betrachtet. Die in dieser Schaltung eingesetzten Komponenten werden in den nachfolgenden Abschnitten nach ihrer Funktion spezifiziert. Das in dieser Messschaltung verwendete Prinzip der Frequenzumsetzung wird im Hinblick auf die hier betrachtete Anwendung näher untersucht.

Frequenzumsetzung

Das auf der jeweiligen Kupferzweidrahtleitung zu messende Leistungsdichtespektrum wird nach dem Heterodyn-Prinzip auf die Zwischenfrequenz f_{ZF} umgesetzt. Für die Frequenzumsetzung gilt allgemein die Gleichung [71]

$$f_{ZF} = |m \cdot f_{LO} \pm n \cdot f_E| \quad (5.1)$$

mit: $m, n \in [1, 2, \dots]$
 f_{LO} Lokaloszillatorfrequenz
 f_E Eingangsfrequenz der Messschaltung
 f_{ZF} Zwischenfrequenz.

Unter der Annahme $m = n = 1$ vereinfacht sich Gleichung (5.1) zu

$$f_{ZF} = |f_{LO} \pm f_E|. \quad (5.2)$$

Neben dem gewünschten Eingangssignal der Frequenz f_E , wird die Bedingung nach Gleichung (5.2) auch von der Spiegelfrequenz

$$f_{SP} = f_{ZF} - f_{LO} \quad (5.3)$$

erfüllt. Um einer Umsetzung der Spiegelfrequenzen in den Zwischenfrequenzbereich vorzubeugen, werden die Spiegelfrequenzanteile durch das Vorfilter (Tiefpass) der Messschaltung unterdrückt (siehe Abbildung 5.2). Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich für $f_{E,max} > 2 \cdot f_{ZF}$ der Eingangs- und Spiegelfrequenzbereich überlappen. Für die Unterdrückung der zur jeweiligen Eingangsfrequenz f_E äquivalent vorhandenen Spiegelfrequenz f_{SP} wäre ein in der Frequenz abstimmbares Vorfilter nötig. Um auf das realisierungsaufwendige abstimmbare Vorfilter verzichten zu können, wird in der hier spezifizierten Messschaltung zusätzlich von dem „Prinzip der hohen Zwischenfrequenz“ Gebrauch gemacht [71], [87]. Dabei liegt die Frequenz f_{ZF} über dem Eingangsfrequenzbereich von $f_{E,min} \leq f \leq f_{E,max}$. Die Zwischenfrequenz berechnet sich für den hier diskutierten Fall nach der Gleichung

$$f_{ZF} = f_{LO} - f_E. \quad (5.4)$$

Abbildung 5.3 verdeutlicht das in der Messschaltung angewandte Prinzip grafisch.

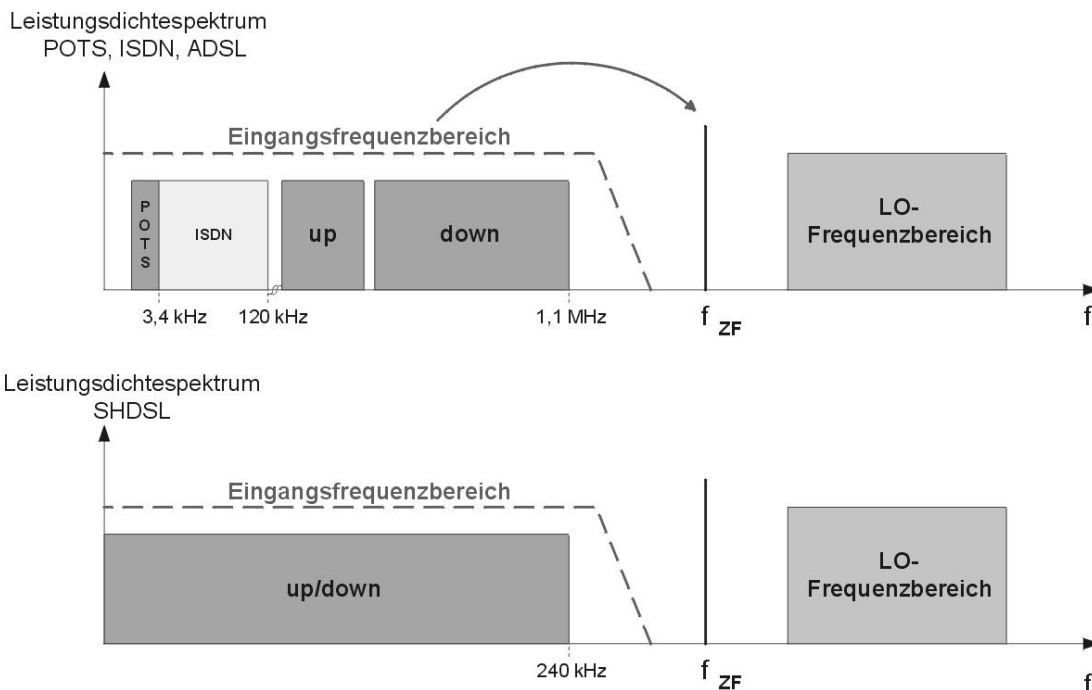


Abbildung 5.3: Anwendung des Prinzips der hohen Zwischenfrequenz für die Messschaltung des modifizierten Nahnebensprechmodells

Bei dem Einsatz der SHDSL-Technologie wird das analoge Telefon- und ISDN-Signal innerhalb der SHDSL-Verbindung (mit-)übertragen [56]. Die Analog-, ISDN-, ADSL- und SHDSL-Signale am Eingang der Messschaltung werden mittels des eingesetzten Mischers auf die festgelegte Zwischenfrequenz f_{ZF} umgesetzt. Der Eingangsfrequenzbereich wird durch das Vorfilter begrenzt. Der Lokaloszillatorfrequenzbereich $f_{LO,min} \leq f_{LO} \leq f_{LO,max}$ ist durch die auf dem Markt verfügbaren Oszillatoren vorgegeben. Die Fertigung von Oszillatoren mit speziellen Schwingfrequenzen ist aus Sicht der Kosten nur für große Stückzahlen rentabel und wird daher im Folgenden nicht näher betrachtet.

Die Zwischenfrequenz ist nach Gleichung (5.4) abzuleiten und charakterisiert die Mittenfrequenz des zugehörigen ZF-Filters. Der Lokaloszillatorfrequenzbereich liegt dabei über der Zwischenfrequenz.

Zwischenfrequenzfilter

Mittels des Zwischenfrequenzfilters wird das auf f_{ZF} umgesetzte Signal selektiert. Die Bandbreite des Zwischenfrequenzfilters bestimmt das Auflösungsvermögen (Frequenzselektivität) der Messschaltung [73]. Auf Grund der relativ langen Einschwingzeit von Rechteckfiltern wird in der hier spezifizierten Messschaltung ein Gauß-Filter mit einer endlichen Flankensteilheit verwendet [72]. Als Flankensteilheit wird in diesem Zusammenhang das Verhältnis

$$\frac{B_{60dB}}{B_{3dB}} \quad (5.5)$$

der B_{60dB} -Bandbreite zur B_{3dB} -Bandbreite (Formfaktor) betrachtet⁴. Ein Gauß-Filter weist im Vergleich zum Rechteckfilter eine geringere Einschwingdauer auf [72]. Dementsprechend schneller kann durch den Einsatz eines Gauß-Filters die Frequenz des Lokaloszillators variiert und damit die Messdauer reduziert werden.

Für die weitere Verarbeitung der gemessenen Spektren $S_i(f)$ und $S_{NEXT}(f)$ in der Einheit [dBm/Hz], muss das gemessene Signal auf die äquivalente Rauschbandbreite des Zwischenfrequenzfilters bezogen werden. Die äquivalente Rauschbandbreite des verwendeten ZF-Filters ist durch die Gleichung

$$B_{R,ZF} = \frac{1}{H_{ZF}^2(f = f_{ZF})} \cdot \int_0^\infty H_{ZF}^2(f) df \quad [\text{Hz}] \quad (5.6)$$

mit:

$$\begin{aligned} H_{ZF}(f) & \quad \text{Spannungsübertragungsfunktion des Zwischenfrequenzfilters} \\ H_{ZF}(f = f_{ZF}) & \quad \text{Spannungsübertragungsfunktion bei der Mittenfrequenz } f_{ZF} \end{aligned}$$

gegeben.

⁴Auf Grund der endlichen Flankensteilheit des Gauß-Filters wird die B_{3dB} -Bandbreite zur Definition des Filters verwendet.

Für das weiterzuverarbeitende Spektrum ergibt sich mit Gleichung (5.6) der Ausdruck

$$\frac{S_m}{B_{R,ZF}} = \frac{S_m}{H_{ZF,0}} \cdot \int_0^\infty H_{ZF}^2(f) df \quad [\text{dBm}] \quad (5.7)$$

Der in Gleichung (5.7) definierte Ausdruck stellt die Eingangsgröße des modifizierten Nahnebensprechmodells dar. S_m repräsentiert das auf der gestörten Kupferdoppelader bestimmte Leistungsdichtespektrum der Nahnebensprechstörung $S_{NEXT}(f)$ bzw. die jeweilige Sendeleistungsdichte $S_i(f)$ auf den benachbarten Zweidrahtleitungen i .

Vorfilter

Bei dem hier eingesetzten Vorfilter handelt es sich um einen Tiefpass der den Eingangsfrequenzbereich auf die maximale Frequenz der zu messenden xDSL-Signale beschränkt. Nach dem in Tabelle 5.1 angenommenen Eingangsfrequenzbereich von maximal 1,1 MHz, muss die Grenzfrequenz des Vorfilters größer als 1,1 MHz sein. Da Rechteckfilter in der Realität nur aufwendig zu realisieren sind, wird als Eingangsfiler ebenfalls ein Gauß-Filter verwendet. Mit einer entsprechenden Reserve wird die maximale Grenzfrequenz des Vorfilters auf $f_{E,max} = 2,0$ MHz festgelegt.

Hüllkurvendetektor

Bei dem eingesetzten Hüllkurvendetektor handelt es sich um eine Spitzengleichrichtung. Das Prinzip des Hüllkurvendetektors ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

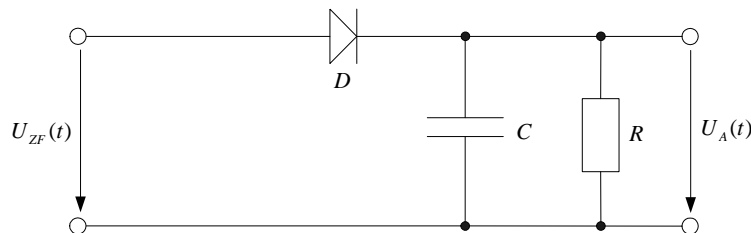


Abbildung 5.4: Prinzip des Hüllkurvendetektors

Am Eingang des Hüllkurvendetektors liegt in der hier betrachteten Anwendung das Ausgangssignal des Zwischenfrequenzfilters an. Der Kondensator wird innerhalb der positiven Halbwelle auf die Spitzenspannung aufgeladen. Die Diode sperrt nachdem das zu messende Signal den Spitzenwert überschritten hat. Der Kondensator entlädt sich anschließend über den Widerstand R der Schaltung.

Speicher der Messschaltung

Für die praktische Anwendung des in Abschnitt 4.4 abgeleiteten Modells sind die Spektren $S_i(f)$ (mit $i \in \{1, \dots, N\}$) und $S_{NEXT}(f)$ zeitgleich an den Frequenzpunkten f_i zu bestimmen. Durch diese Parallelität ist im realisierungsaufwendigsten Fall für jede der $N + 1$ zu betrachtenden Zweidrahtleitung des Kabelbündels ein separater Speicherbaustein (RAM) vorzusehen. Werden die digitalisierten Messwerte in $N + 1$ Registern des Controllers zwischengespeichert und anschließend sequentiell ausgelesen, können alle auf den betrachteten Kupferdoppeladern gemessenen Spektren in einem einzigen RAM-Baustein abgelegt werden. Durch die Zwischenspeicherung werden N einzelne Speicherbausteine durch einen einzigen großen Speicher eingespart. Die für den hier betrachteten Anwendungsfall konzipierte Gesamtschaltung ist in Abbildung 5.5 exemplarisch für zwei Leitungspaare eines Kabelbündels dargestellt.

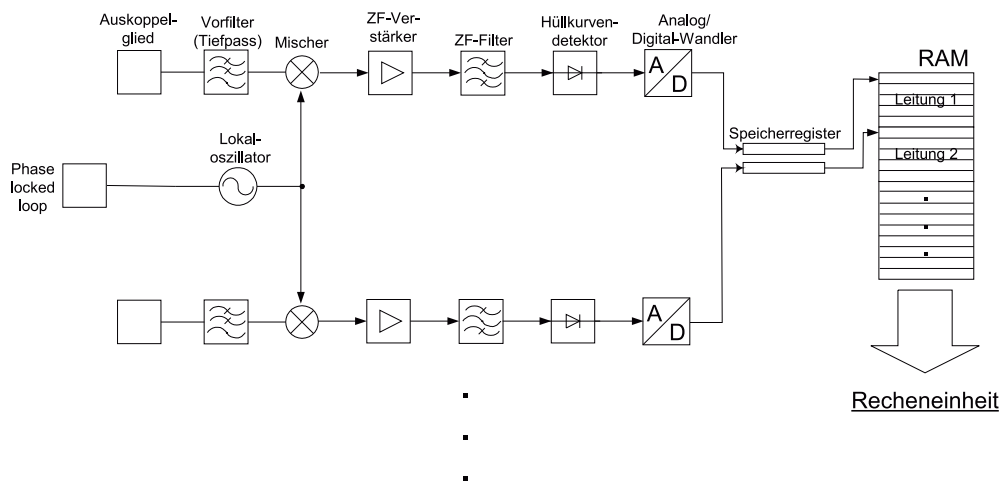


Abbildung 5.5: ZF-Signalverarbeitung und Speicherstruktur

Die Ansteuerung der $N + 1$ Mischer der Messschaltung erfolgt durch einen einzigen Lokaloszillator. Der Eingangsfrequenzbereich wird nach dem beschriebenen Prinzip der Frequenzumsetzung in den Zwischenfrequenzbereich umgesetzt. Das Ausgangssignal des Hüllkurvendetektors wird mittels Analog-Digital-Wandler digitalisiert. Dieser Vorgang erfolgt parallel für alle betrachteten Zweidrahtleitungen des Kabelbündels. Die digitalen Messwerte werden parallel in Registern zwischengespeichert, wobei für jede Zweidrahtleitung ein eigenes Register vorgesehen ist. Enthalten die Speicherregister des Controllers alle signifikanten Ziffern der Messwerte, werden die Registerinhalte sequentiell in den RAM der Messschaltung übertragen. Im RAM ist für jede Zweidrahtleitung ein gesonderter Speicherbereich reserviert. Die Adressierung der jeweiligen Speicheradresse erfolgt durch den Controller der Messschaltung (siehe folgenden Abschnitt).

Durch die gemeinsame Ansteuerung der $N + 1$ Mischer durch einen einzigen Lokaloszillator kann auf N einzelne Oszillatoren verzichtet werden. Ferner erübrigt sich eine Synchronisation der Lokaloszillatoren für die $N + 1$ zu betrachtenden Kupferdoppeladern.

Wurden die Spektren über den definierten Eingangsfrequenzbereich vollständig bestimmt, wird der Speicherinhalt an die Recheneinheit zur weiteren Verarbeitung übertragen⁵. Daraus leitet sich der positive Aspekt ab, dass die Messdatenrate ausschließlich durch die Komponenten der Messschaltung festgelegt wird. Die Datenübertragung zur Recheneinheit, die Verarbeitungsgeschwindigkeit in der Recheneinheit und die Speicherung der berechneten NEXT-Kopplungsfunktionen besitzen keinen Einfluss auf die Messdatenrate. Von Vorteil ist ferner, dass nur einmalig nach Abschluss der Messungen eine Netzlast zur Übertragung der Messdaten generiert wird. Während der Messungen bzw. in den Phasen, in denen keine Messungen durchgeführt werden, wird von der Messschaltung keine Bandbreite belegt.

Alternativ zu dem einmaligen Auslesen des RAMs nach Abschluss der Messungen, könnte der RAM als FIFO (First In First Out) ausgeführt werden. Die einzelnen Messwerte werden in dem FIFO lediglich zwischengespeichert. Der Speicherinhalt wird bei dieser Speicherrealisierung während der Messung als kontinuierlicher Datenstrom an die Recheneinheit übertragen. Durch die sofortige Datenübertragung zur Recheneinheit kann auf der Messschaltung nur ein kleiner Speicher vorgesehen werden. Die Messdatenrate ist bei der hier beschriebenen Verwendung eines FIFO von der Transferate zur Auswertungsseinheit und der Größe des FIFOs abhängig, so dass in der hier spezifizierten Messschaltung kein Speicher nach dem FIFO-Prinzip eingesetzt wird.

In der Messung wird der von $f_{E,min}$ bis $f_{E,max}$ reichende Frequenzbereich mit einer endlichen Auflösung erfasst. Die maximale Messdauer und die Anzahl der zu erfassenden Frequenzpunkte werden durch die Speichergröße des RAMs in Verbindung mit der Simulationsgenauigkeit des Nahnebensprechmodells vorgegeben. Die in Abschnitt 3.2.3 dargestellten Messungen und die durchgeführten Simulationen zeigten, dass für die digitalisierten Messwerte acht dezimale Ziffern nötig sind, um die gezeigten Korrelationskoeffizienten zu erreichen (siehe Abschnitt 4.5). Die Spektren wurden mit einer Auflösung von 400 Frequenzpunkten f_i innerhalb des definierten Eingangsfrequenzbereichs bestimmt. Aus diesen Angaben leitet sich pro betrachtete Zweidrahtleitung eine Speichersegmentgröße im RAM der Messschaltung von 400 Zellen zu 8 Byte ab.

Controller

Als zentrale Steuereinheit der Messschaltung wird ein digitaler Signalprozessor (DSP) als Controller eingesetzt. Dieser Prozessor stellt die jeweiligen Teilungsfaktoren am digitalen Phasenregelkreis ein, wodurch das jeweilige Eingangssignal der Messschaltung auf die Zwischenfrequenz f_{ZF} umgesetzt wird. Das aus der ZF-Signalverarbeitung resultierende Signal wird nach der Digitalisierung im Prozessor zwischengespeichert (siehe Abbildung 5.5). Dazu werden von dem eingesetzten Controller entsprechende Register zur Verfügung gestellt. Die Generierung der jeweiligen Speicheradresse zur Abspeicherung der Messwerte im RAM der Messschaltung erfolgt ebenfalls durch den Prozessor. Der Datentransfer aus den internen Registern des DSPs in das RAM wird durch die Ausgabe von Steuersignalen vom Prozessor eingeleitet.

⁵Die weitere Signalverarbeitung in der Recheneinheit beinhaltet sowohl die Berechnung der NEXT-Kopplungsfunktionen als auch die Simulation des Nahnebensprechstörpektrums auf einer Kupferzweidrahtleitung.

Die Messung der auf den Zweidrahtleitungen eines Telefonanschlusskabels vorhandenen Spektren erfolgt in der Vermittlungsstelle. Die Berechnung der NEXT-Kopplungsfunktionen durch das abgeleitete Nahnebensprechmodell erfolgt für mehrere Vermittlungsstellen an einem zentralen Ort (siehe Abschnitt 5.6). Für den kosteneffizienten und praktischen Einsatz des Modells sind die Spektren automatisch zu bestimmen. Dazu muss die Messschaltung fernsteuerbar sein. Die Fernsteuerung der Messschaltung erfolgt durch den Controller. Die Steuerkommandos werden von dem Controller ausgewertet und in Signale zur Ansteuerung der jeweiligen Komponenten der Messschaltung umgesetzt.

Nach Abschluss der Messung initiiert der Prozessor den Datentransfer aus dem Speicher der Messschaltung zur Recheneinheit. Dazu ist der Speicherinhalt in Pakete des verwendeten Transportprotokolls umzusetzen und zu versenden. Im folgenden Abschnitt wird der beschriebene Ablauf an einem praktischen Einsatzszenario diskutiert.

5.3 Einsatzszenario

Die Doppeladernpaare der Telefonanschlussleitungen sind am Hauptverteiler (HVt) in der Ortsvermittlungsstelle zugänglich. Zur Messung der Spektren ist am HVt die im Abschnitt 5.2.2 spezifizierte Messschaltung anzuschließen. Werden alle Zweidrahtleitungen eines Kabelbündels zu einem DSLAM geführt, so kann die Messschaltung alternativ im DSLAM integriert werden. Abbildung 5.6 zeigt schematisch die Bestimmung der Sende- und Nahnebensprechstörspektren am HVt der Vermittlungsstelle.

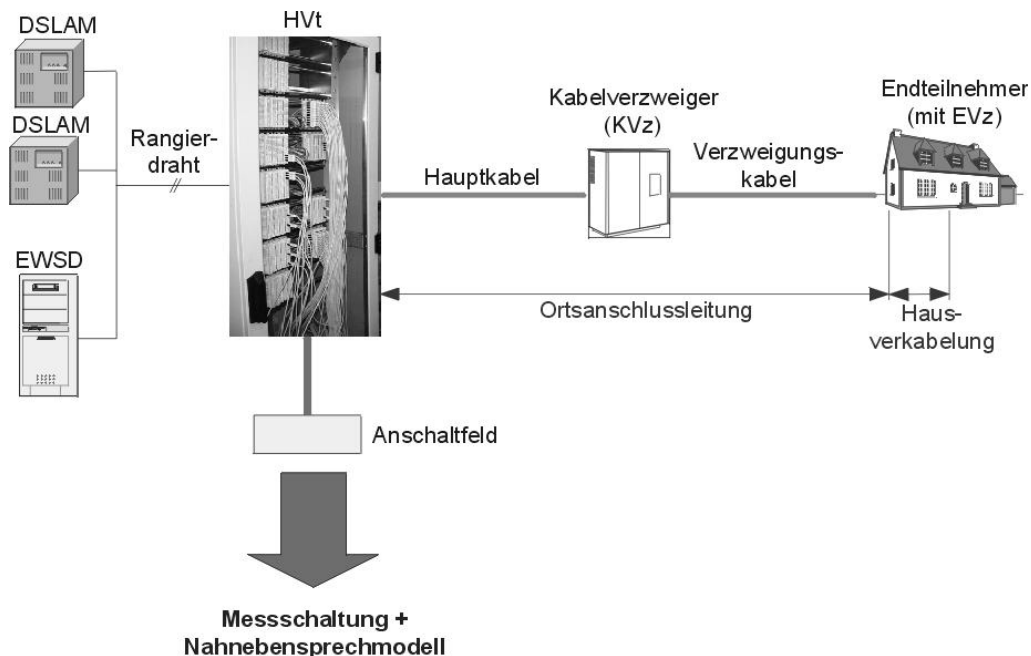


Abbildung 5.6: Anwendungsszenario für das entwickelte Nebensprechmodell

Die gemessenen Daten werden über das Vermittlungsnetz in ein Labor für den Test von xDSL-Systemen oder zu einer zentralen Stelle zur Netzplanung und -wartung übertragen. Mittels der berechneten NEXT-Kopplungsfunktionen und der gemessenen Spektren können die auf dem jeweiligen Anschlusskabel auftretenden Nebensprechstörungen mit einem flexiblen Störsignalgenerator individuell reproduziert werden. Ebenso sind die gegenseitigen Nahnebensprechstörungen in einem Kabelbündel mittels der berechneten NEXT-Kopplungsfunktionen quantifizierbar. Dieses Wissen kann in einem entsprechenden Analysetool für die effiziente Beschaltung von Kabelbündeln und für den fehlerfreien Betrieb der bestehenden Kabelinfrastruktur genutzt werden.

Die Einsatzmöglichkeiten des in dieser Arbeit abgeleiteten Nahnebensprechmodells in einem flexiblen Störsignalgenerator und in einem Analysewerkzeug für xDSL-Leitungen werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

5.3.1 Flexibler Störsignalgenerator

Das Konzept eines flexiblen Störsignalgenerators sieht eine Einheit zur Berechnung der NEXT-Kopplungsfunktionen nach dem abgeleiteten Nebensprechmodell und einen darauf aufbauenden programmierbaren Signalgenerator vor. Im Gegensatz zu den bisher auf dem Markt angebotenen Störsignalgeneratoren für den Test von xDSL-Systemen, erzeugt der flexible Störsignalgenerator die individuell auf den Doppeladern messbaren Nebensprechstörungen. Weist ein bestimmtes Kabelbündel niedrigere Nebensprechstörleistungen als durch das ein Prozent Worst-case Power-Sum Modell angenommen auf, generiert der flexible Störsignalgenerator keine zu pessimistische Störumgebung. Wird das Ausgangssignal des flexiblen Störsignalgenerators durch einen Leitungssimulator auf eine Testleitung eingekoppelt (siehe Abbildung 1.3), können die über den Leitungssimulator verbundenen xDSL-Systeme oder Testsysteme für xDSL-Transceiver-Chips in einer realistischen Störumgebung im Labor getestet und optimiert werden.

Infolgedessen, dass die einzelnen Nebensprechkopplungen zwischen den Zweidrahtleitungen und die Spektren der störenden Signale bekannt sind, kann das Verhalten von zu testenden xDSL-Systemen bei bestimmten Beschaltungskonstellationen im Kabelbündel analysiert werden. Dabei generiert der flexible Störsignalgenerator nur einen Teil der in dem Kabelbündel gemessenen Nebensprechstörungen. Durch das gezielte Zu- und Abschalten von einzelnen „Nebensprechteilstörungen“ kann das daraus resultierende Übertragungsverhalten der zu testenden xDSL-Systeme im Labor gezielt untersucht und optimiert werden.

5.3.2 Analyse von Nebensprechstörungen

Durch den Einsatz des modifizierten Nahnebensprechmodells in einem Analysewerkzeug für xDSL-Leitungen, sind die in Telefonanschlussleitungen auftretenden wechselseitigen Nebensprechbeziehungen charakterisierbar. Das Analysewerkzeug stellt im einfachsten Fall eine entsprechende Software dar, die auf einem PC betrieben wird. Mittels des Analysewerkzeugs sind im laufenden Betrieb der Telefonanschlussleitung Störungen

für xDSL-Systeme analysierbar. Aufgrund dessen, dass die Parameter des modifizierten Nebensprechmodells automatisch im laufenden Betrieb der Telefonanschlussleitung bestimmt werden, ist für die beschriebene Störcharakterisierung der Einsatz von Personal oder das Abschalten der Sendeanlagen für die Durchführung von Messungen nicht nötig. Die Messung der Spektren, wie auch die Berechnungen nach dem modifizierten Nahnebensprechmodell, sind durch die Fernsteuerbarkeit der Messschaltung zu jedem Zeitpunkt durchführbar.

Das in dem Analysewerkzeug eingesetzte modifizierte Nahnebensprechmodell ist für die Planung zukünftiger Netzstrukturen, sowie für die Qualifizierung des bestehenden Netzes (loop qualification), von Bedeutung. Mittels des in dieser Arbeit abgeleiteten Modells können potentielle Nebensprechstörungen auf einer bis dahin noch nicht für die xDSL-Technik verwendeten Kupferdoppelader abgeschätzt werden. Durch diese Vorabqualifizierung kann beurteilt werden, ob über die jeweilige Kupferdoppelader einem Kunden generell ein xDSL-Dienst angeboten werden kann, oder ob das Leitungspaar auf Grund der Nebensprechstörungen durch die bereits im Kabelbündel vorhandenen Dienste für die xDSL-Technik ungeeignet ist. Die Kosten, die sich aus dem Einsatz eines Technikers im Problemfall vor Ort ergeben, werden durch diese Vorabqualifizierung mittels des in dieser Arbeit abgeleiteten Nahnebensprechmodells reduziert. Darüber hinaus ist ein alternativer Dienstanbieter mit dem beschriebenen Analysewerkzeug in der Lage, die Übertragungsqualität der angemieteten Anschlussleitungen abzuschätzen, ohne Messungen direkt am Netz des Netzbetreibers durchführen zu müssen. Durch den Einsatz des Nahnebensprechmodells kann analysiert werden, welches der Kommunikationssysteme im Kabelbündel hauptsächlich für die auf der angemieteten Leitung auftretenden Nebensprechstörungen verantwortlich ist. Ebenso kann aus der Sicht des Netzbetreibers beurteilt werden, welche der Kupferzweidrahtleitungen am besten für die Übertragung von hochbitratigen Diensten geeignet ist.

Wird die Berechnung der Nebensprechübertragungsfunktionen auf einer in den DSLAM integrierten Messschaltung durchgeführt, so stehen die Nebensprechkopplungsfunktionen direkt im DSLAM zur Verfügung. Besteht zwischen zwei Doppeladern eines Kabelbündels eine geringe Nebensprechdämpfung, so kann eine Steuereinheit des DSLAMs eine Reduzierung der Sendeleistung der Line Cards anstoßen. Durch die Absenkung der Sendeleistung wird die gegenseitige Störung der xDSL-Systeme verringert, und die Übertragungsqualität im Kabelbündel erhöht.

5.4 Zusammenfassung

Das in Kapitel 4 abgeleitete Nahnebensprechmodell benötigt zur Berechnung der NEXT-Kopplungsfunktionen sowie zur Simulation der in einem Kabelbündel individuell auftretenden Nahnebensprechstörungen als Eingangsgrößen die Spektren der Sende- und Nahnebensprechsignale. In Kapitel 5 wurde eine Messschaltung zur Bestimmung dieser Spektren spezifiziert. Dabei wurde sowohl eine Messschaltung nach dem Prinzip eines FFT-Analysators, als auch nach dem Überlagerungsprinzip (Heterodyn-Prinzip) betrachtet. Nach dem Überlagerungsprinzip können auch höherfrequente Signale be-

stimmt werden, so dass dieses Verfahren für die Messschaltung des in dieser Arbeit aufgestellten Nahnebensprechmodells gewählt wurde. Beim Einsatz des Überlagerungsprinzips sind die daraus resultierenden Spiegelfrequenzen durch Vorfilter zu unterdrücken. Für die Realisierung des Vorfilters als Filter mit einer festen Mittenfrequenz wurde in der spezifizierten Messschaltung das „Prinzip der hohen Zwischenfrequenz“ angewandt. Die Anpassung der Schaltung auf den betrachteten Anwendungsfall wurde im Detail diskutiert. Ebenso wurden die Randbedingungen für das Zwischenfrequenzfilter beschrieben.

Für die Bestimmung der Nahnebensprechkopplungen durch das in dieser Arbeit abgeleitete Modell sind die auf den $N + 1$ Leitungen auftretenden Sende- und Störspektren parallel an einem Frequenzpunkt f_i durch die Messschaltung zu erfassen. Für eine kostengünstige Realisierung wurde die Messschaltung hinsichtlich der benötigten Bauteileanzahl optimiert. Infolge dieser Optimierung werden die $N + 1$ Mischer zur Frequenzumsetzung der zu messenden Spektren durch einen einzigen Lokaloszillator und Phasenregelkreis angesteuert. Ferner konnte durch das Zwischenspeichern der Messwerte die Verwendung eines einzigen RAMs für alle $N + 1$ betrachteten Zweidrahtleitungen erreicht werden. Im realisierungsaufwendigsten Fall wären dafür $N + 1$ einzelne Speicherbausteine vorzusehen.

Das in dieser Arbeit entwickelte Nahnebensprechmodell und die dafür spezifizierte Messschaltung sind in einem flexiblen Störsignalgenerator für den Test von xDSL-Systemen einsetzbar. Dazu werden die Signal- und Nahnebensprechstörspektren durch die Messschaltung am Hauptverteiler oder im DSLAM in der Vermittlungsstelle gemessen. Die Messwerte werden an einen flexiblen Störsignalgenerator übertragen, mit dessen Hilfe die auftretenden Nahnebensprechstörungen in Labortests reproduziert werden können. Mittels der mit dem modifizierten Nahnebensprechmodell berechneten NEXT-Kopplungen kann das Übertragungsverhalten von xDSL-Systemen bei verschiedenen Beschaltungsszenarien erprobt und optimiert werden.

Durch den Einsatz des aufgestellten Modells in einem Analysewerkzeug für xDSL-Leitungen, ist eine Vorqualifizierung von Telefonanschlussleitungen für die xDSL-Technik möglich. Darüber hinaus können die wechselseitigen Beziehungen der Nahnebensprechkopplungen in einem Kabelbündel analysiert und Störursachen beim Betrieb von xDSL-Systemen identifiziert werden. Die Auswahl der für die xDSL-Technik geeigneten Kupferzweidrahtleitungen ist mit den entwickelten Nahnebensprechmodell ebenso möglich, wie der effiziente Ausbau der bestehenden Kabelinfrastruktur.

6 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

Die Kupferzweidrahtleitungen des Telefonanschlusnetztes werden in zunehmenden Maß von der xDSL-Technik (Digital Subscriber Line) genutzt. Die auftretenden Impuls-, Funk- und Nebensprechstörungen beeinträchtigen die Leistungsfähigkeit der an den Telefonanschlusleitungen angeschlossenen xDSL-Systeme (xDSL-Modem beim Endkunden bzw. Line Card in der Vermittlungsstelle). Damit einem Endkunden ein Dienst in der dafür nötigen Güte zur Verfügung gestellt werden kann, haben die eingesetzten xDSL-Systeme Anforderungen hinsichtlich der Datenrate und Reichweite zu erfüllen. Des Weiteren ist die Übertragungsqualität der genutzten Kupferdoppeladern durch den Netzbetreiber zu prüfen.

Die Leistungsfähigkeit (Datenrate und Reichweite) von xDSL-Systemen wird vor deren praktischen Einsatz im Labor analysiert. Die bei den xDSL-Systemtests eingesetzten Störsignalgeneratoren reproduzieren Nebensprechstörungen nach Modellen der xDSL-Standards von ETSI TM 6 und ANSI T1E1. Die standardisierten Nebensprechmodelle werden auch zur simulativen Abschätzung der auf den Telefonanschlusleitungen vorhandenen Nebensprechstörungen bei der Netzplanung eingesetzt. Problematisch in diesem Zusammenhang ist, dass die auf realen Telefonanschlusleitungen messbaren Nebensprechstörungen partiell von den simulierten Nebensprechstörungen der Standardnebensprechmodelle abweichen. Durch diese Simulationsungenauigkeiten sind die im Labor ermittelten Leistungsdaten eines xDSL-Systems nur bedingt auf die realen Verhältnisse übertragbar. Ferner führen die Simulationsungenauigkeiten zu ineffizient genutzten Telefonanschlusleitungen.

Diese Problematik stellte die Motivation für diese Arbeit dar. Es sollten Nebensprechmodelle untersucht, optimiert beziehungsweise neu entwickelt werden, um eine realistische Abschätzung und Reproduktion der im Telefonanschlusnetz auftretenden Nebensprechstörungen für die xDSL-Technik zu ermöglichen. Wesentliche Randbedingungen für das zu entwickelnde Nebensprechmodell waren eine geringe Komplexität für eine kostengünstige Implementierung, sowie die automatische Adaption des Modells auf die realen Nebensprechverhältnisse im laufenden Betrieb der Telefonanschlusleitungen. Dabei soll das Nebensprechmodell bei Labortests ebenso, wie zur Netzplanung einsetzbar sein.

Zur Definition des Umfelds für die zu untersuchenden Nebensprechmodelle wurde im ersten Teil der Arbeit das in Deutschland aufgebaute Telekommunikationsnetz analysiert. xDSL-Systeme werden auf den Kupferzweidrahtleitungen (Kupferdoppeladern) des Telefonanschlusnetztes betrieben. Auf Grund der hohen Investitionskosten ist eine Anbindung von Privatkunden über Glasfaserkabel derzeit unwirtschaftlich. Die zu den Endkunden führenden Verzweigungskabel werden über den Kabelverzweiger (KVz) mit

den Hauptkabeln verbunden. Die Hauptkabel enden am Hauptverteiler (HVt) in der jeweiligen Vermittlungsstelle. Die Kombination aus Verzweigungs- und Hauptkabel wird als Telefonanschlussleitung (TAL) bezeichnet. In Europa verlegte Telefonanschlussleitungen sind größtenteils aus „Grundbündeln“ aufgebaut. Diese Grundbündel bestehen wiederum aus zu „Sternvierern“ verdrehten (verseilten) Kupferzweidrahtleitungen.

Nebensprechstörungen sind auf die fehlende Abschirmung der Telefonanschlussleitungen und die parallel daran betriebenen Übertragungssysteme zurückzuführen. Die auf den Kupferdoppeladern übertragenen Sendesignale induzieren auf benachbarten Zweidrahtleitungen Störströme beziehungsweise Störspannungen. Dieser physikalische Effekt wird als Nebensprechen (Übersprechen) bezeichnet. Nebensprechen wird nach Nahnebensprechen (Near-End Crosstalk, NEXT) und Fernnebensprechen (Far-End Crosstalk, FEXT) differenziert. Die für das Nahnebensprechen verantwortlichen Übertragungssysteme befinden sich am gleichen Kabelende wie das dadurch gestörte System. Beim Fernnebensprechen befinden sich das störende und gestörte Kommunikationssystem an gegenüberliegenden Kabelenden. Nah- und Fernnebensprechstörungen werden bei xDSL-Systemtests durch Störsignalgeneratoren reproduziert.

Die Untersuchung des Optimierungspotentials bisheriger Störsignalgeneratoren zeigte, dass relativ einfach implementierte Geräte nur repräsentativ die zwischen verschiedenen Sternvierern der Telefonanschlussleitungen auftretenden Nebensprechstörungen reproduzieren. Aufwändiger implementierte Störsignalgeneratoren erzeugen Nebensprechstörungen nach den Modellen der xDSL-Standards von ETSI TM 6 und ANSI T1E1. Darüber hinaus sind die letztgenannten Störsignalgeneratoren in der Lage, Implus-, nieder- und hochfrequente Rauschstörungen für den Test von xDSL-Systemen zu reproduzieren.

Infolge der maßgeblichen Auswirkungen von Nebensprechstörungen auf die Datenrate und Reichweite von xDSL-Systemen und der daraus resultierenden Zielsetzung für diese Arbeit, wurden in Kapitel 3 die Nebensprecheffekte auf Telefonanschlussleitungen detailliert untersucht. Das auf einer Kupferzweidrahtleitung auftretende Leistungsdichtespektrum der Nahnebensprechstörung kann durch Multiplikation der störenden Sendeleistungsdichten mit den jeweiligen Nebensprechkopplungsfunktionen modelliert werden. Die Nahnebensprechkopplungsfunktionen (NEXT-Kopplungsfunktionen) beschreiben die parasitären und frequenzabhängigen Nahnebensprechkopplungen (Leistungsübertragungen) zwischen zwei Kupferdoppeladern einer mehrpaarigen Telefonanschlussleitung. Die Nahnebensprechkopplungen mehrerer Leitungspaare auf eine Zweidrahtleitung (Referenzleitung) werden in der „Power-Sum NEXT-Kopplungsfunktion“ zusammengefasst. Die xDSL-Standards legten die Parameter dieser Funktion durch Messungen an Telefonanschlussleitungen in der Weise fest, dass 99 Prozent der untersuchten Leitungen kleinere oder maximal die mit dem Standardmodell simulierten Nahnebensprechstörungen aufweisen. Auf Grund dieser Definition wird das Standardmodell in diesem Zusammenhang auch als „Ein Prozent Worst-Case Power-Sum Modell“ bezeichnet. Die Nebensprechmodelle von ETSI TM 6 und ANSI T1E1 gehen davon aus, dass die in einem Kabelbündel betriebenen Übertragungssysteme voneinander statistisch unabhängig sind, ein fest definiertes Sendeleistungsdichtespektrum aufweisen und alle Kupferzweidrahtleitungen die gleiche Leitungscharakteristik und -länge besitzen. Alterungseffekte, unterschiedliche Verdrahtungen, Umwelteinflüsse,

Fertigungstoleranzen bei der Kabelherstellung und individuelle Kabelbeschaltungen führen dazu, dass diese Modellannahmen in der Realität nur teilweise erfüllt werden. Infolge dieser Diskrepanz wurden die Nebensprechstörungen realer Telefonanschlussleitungen und die Simulationsgenauigkeit der Standardnebensprechmodelle in dieser Arbeit im Detail untersucht.

Die an Telefonanschlussleitungen vom Typ A-2Y(L) $50 \times 2 \times 0,4$ mm und DIN VDE 0815 J-2Y(ST)Y mit einem Aderndurchmesser von 0,6 mm durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass zwischen Kupferdoppeladern im gleichen Sternvierer die größten Nahnebensprechstörungen auftreten. Die zwischen benachbarten Sternvierern gemessenen Nahnebensprechkopplungen besitzen im Mittel einen 10 dB geringeren Betrag, als die im gleichen Sternvierer gemessenen NEXT-Kopplungsfunktionen. Bei 2,25 Prozent der untersuchten Nahnebensprechbeziehungen lieferten die Kupferdoppeladern benachbarter Sternvierer einen ähnlich großen Nahnebensprechbeitrag, wie die Leitungs-paare im gleichen Sternvierer. Zwischen Kupferzweidrahtleitungen in benachbarten Grundbündeln wurde eine um 13,8760 dB größere mittlere Nahnebensprechdämpfung, als zwischen den Kupferdoppeladern im gleichen Grundbündel festgestellt. Aus diesen Untersuchungsergebnissen wird gefolgert, dass die zwischen benachbarten Grundbündeln auftretenden Nebensprechstörungen gegenüber den im Grundbündel vorhandenen Störungen näherungsweise vernachlässigt werden können. Für den praktischen Einsatz von xDSL-Systemen ergibt sich daraus, dass die Systeme nach Möglichkeit in verschiedenen Sternvierern beziehungsweise Grundbündeln zu betreiben sind, um die gegenseitigen Nahnebensprechstörungen zu reduzieren.

Die Gegenüberstellung der gemessenen und durch Regressionsgeraden approximierten Power-Sum NEXT-Kopplungsfunktionen mit der des Nahnebensprechmodells von ETSI TM 6 zeigte, dass die gemessenen Funktionen im Mittel einen ca. 2,32 dB bis 3,51 dB kleineren Betrag, als das ETSI-Standardmodell aufweisen. xDSL-Systeme werden in diesem Fall in einer, im Vergleich zur Realität, zu pessimistischen Störumgebung getestet. Ebenso wird durch die festgestellten Simulationsungenauigkeiten bei der Abschätzung der Nahnebensprechstörungen von größeren Störleistungen ausgegangen, als diese tatsächlich auf den Telefonanschlussleitungen vorhanden sind. Eine eingeschränkte Übertragbarkeit der im Labor ermittelten Datenraten und Reichweiten eines xDSL-Systems auf reale Telefonanschlussleitungen sind die Folge der Simulationsungenauigkeiten der Standardnebensprechmodelle. Ferner führen diese Ungenauigkeiten bei der Netzplanung zu einer ineffizienten Auslastung von Telefonanschlussleitungen.

Zur Untersuchung der Größenordnung der auf Kupferzweidrahtleitungen induzierten Nebensprechstörungen wurden die Leistungsdichten der Störungen gemessen. Die Konstellation der störenden Übertragungssysteme wurde im Kabelbündel bei den Messungen variiert, um die Abhängigkeit der Nebensprechstörungen von der Beschaltung der Telefonanschlussleitung feststellen zu können. Wurde im Grundbündel der Referenzleitung kein weiteres xDSL-System betrieben, ergab sich auf der betrachteten Kupferdoppelader eine maximale Nebensprechstörleistungsdichte von -102 dBm/Hz. Nach Erhöhung der Kabelbelegung auf 50 Prozent (Beschaltung jeder zweiten Kupferdoppelader des Kabelbündels) wurde auf der Referenzleitung eine maximale Nebensprechstörleistungsdichte von -95 dBm/Hz gemessen.

Die Untersuchungsergebnisse bestätigen die Ortsabhängigkeit von Nebensprechstörungen und geben Aufschluss über die Größenordnung der daraus resultierenden Störleistungen. Problematisch ist, dass die individuelle Beschaltung einer Telefonanschlussleitung durch die standardisierten Nebensprechmodelle nicht explizit berücksichtigt wird. Die Reproduktion und Betrachtung bestimmter Beschaltungsszenarien für xDSL-Systemtests und zur Netzplanung ist daher mit den Standardnebensprechmodellen nur bedingt möglich.

Um festzustellen, welche Größenordnung Fernnebensprechstörungen gegenüber den parallel auftretenden Nahnebensprechstörungen besitzen, wurden die auf Telefonanschlussleitungen vorhandenen FEXT-Störungen analytisch und messtechnisch untersucht. Die Kabeldämpfung reduziert die auf einer Kupferzweidrahtleitung induzierte Fernnebensprechstörung. Die Fernnebensprechkopplungsfunktion (FEXT-Kopplungsfunktion) modelliert die Längen- und die Frequenzabhängigkeit der auf Telefonanschlussleitungen vorhandenen Fernnebensprechstörungen. Im Fall von mehreren „Fernnebensprechquellen“ beschreibt die „Power-Sum FEXT-Kopplungsfunktion“ der standardisierten Fernnebensprechmodelle die Gesamtheit aller Fernnebensprechkopplungen auf eine Kupferzweidrahtleitung der Telefonanschlussleitung.

Die Untersuchung der Fernnebensprechkopplungen zeigte, wie im Fall der untersuchten NEXT-Kopplungen, die Abhängigkeit der FEXT-Kopplungsfunktionen von der geometrischen Lage der betrachteten Zweidrahtleitungen im Kabelbündel. Dieser Effekt wird von den standardisierten Fernnebensprechmodellen nicht explizit reproduziert. Die parallel an einem Kabelbündel eingesetzten xDSL-Systeme sind möglichst in unterschiedlichen Sternvierern oder Grundbündeln zu betreiben, um die gegenseitigen Fernnebensprechstörungen zu reduzieren. Die Analysen bewiesen, dass die im gleichen Sternvierer liegenden Übertragungssysteme den größten Beitrag zu den Fernnebensprechstörungen auf der direkt benachbarten Kupferzweidrahtleitung liefern.

Die Untersuchung der Längenabhängigkeit von Fernnebensprechstörungen ergab, dass die betrachtete FEXT-Kopplung zwischen zwei direkt benachbarten Zweidrahtleitungen bei der Frequenz 1 MHz und einer Leitungslänge von 300 m einen Betrag von -62 dB aufwies. Für eine Leitungslänge von 3050 m ergab sich für die gleiche Beziehung eine Fernnebensprechdämpfung von 105 dB. Ab einer Leitungslänge von 3800 m konnte für die gemessenen FEXT-Kopplungsfunktionen kein merklicher Größenunterschied festgestellt werden. Es ergab sich eine mittlere Fernnebensprechdämpfung von 104,226 dB.

Die Gegenüberstellung der auf den Telefonanschlussleitungen gemessenen FEXT- und NEXT-Kopplungsfunktionen zeigte, dass die Differenz zwischen den Funktionen ab einer Leitungslänge von 550 m 15 dB beträgt. Aus dieser Differenz wurde die vereinfachende Näherung abgeleitet, dass ab einer Leitungslänge von ca. 550 m Fernnebensprechen gegenüber Nahnebensprechstörungen vernachlässigt werden können. Mit abnehmender Leitungslänge nehmen die an einem Kabelende messbaren Fernnebensprechstörungen zu. Allerdings nimmt auch die Leistung des Empfangssignals am Eingang des xDSL-Systems durch die geringere Leitungsdämpfung zu. Die am empfangenden xDSL-System anliegenden Fernnebensprechstörungen wirken sich dementsprechend weniger auf die Rekonstruktion des ursprünglich gesendeten Signals aus.

Die Untersuchungsergebnisse wurden für die Ableitung eines verbesserten Nahnebensprechmodells verwendet. Mit dem in Kapitel 4 dargestellten Modell sind die Nahnebensprechkopplungen und -störungen einer Telefonanschlussleitung individuell im Frequenzbereich reproduzierbar. Im Gegensatz dazu simulieren die Modelle der xDSL-Standards den allgemeinen „Ein Prozent Worst-Case Fall“ der auftretenden Nahnebensprechkopplungen. Simulationsungenauigkeiten, die aus der Simulation des allgemeinen „Ein Prozent Worst-Case Falles“ resultieren, werden durch die individuelle Betrachtung der auf Telefonanschlussleitungen auftretenden Nahnebensprechstörungen vermieden.

Das in dieser Arbeit entwickelte Nahnebensprechmodell geht davon aus, dass sich die von den einzelnen Zweidrahtleitungen herrührenden Teilstörungen additiv zu einer (Gesamt-)Nahnebensprechstörung überlagern. Eine Teilnebensprechstörung wird in dem vorgestellten Nahnebensprechmodell durch Multiplikation der individuellen Nahnebensprechkopplungsfunktion mit der auf der Kupferdoppelader tatsächlich vorhandenen Sendeleistungsdichte berechnet.

Der Modellansatz wurde durch Messungen an realen Telefonanschlussleitungen verifiziert. Die Kreuzkorrelationsanalysen zeigten, dass die auf realen Telefonanschlussleitungen gemessenen Nahnebensprechkopplungsfunktionen auf einer logarithmisch skalierten Frequenzachse durch eine Potenzfunktion approximiert werden können. Der Kreuzkorrelationskoeffizient zwischen den gemessenen und den durch Potenzfunktionen angenäherten NEXT-Kopplungsfunktionen des entwickelten Nahnebensprechmodells betrug ca. 90 Prozent. In Relation dazu besteht zwischen der NEXT-Kopplungsfunktion des ETSI-Nahnebensprechmodells und den gemessenen Funktionen ein mittlerer Kreuzkorrelationskoeffizient von 0,7731.

Die Konzentration von xDSL-Systemen ist in der Vermittlungsstelle höher, als am Kabelende beim Endkunden. Dementsprechend treten Nahnebensprechstörungen vorwiegend in der Vermittlungsstelle auf. Dort sind die störenden Sendespektren und das daraus resultierende Spektrum der Nahnebensprechstörung auf einer Kupferzweidrahtleitung messbar. In dem entwickelten Nahnebensprechmodell werden diese Spektren zur Berechnung der Exponenten x_i und Konstanten k_i (Kopplungskonstanten) der individuellen NEXT-Kopplungsfunktionen als Eingangsgrößen verwendet.

Das hier betrachtete Nahnebensprechmodell stellt mathematisch ein nicht lineares multiples Regressionsmodell dar. Weitere Untersuchungen zeigten, dass die Steigung x_i der individuellen Nahnebensprechkopplungsfunktionen äquivalent zu den xDSL-Standards mit 15 dB pro Dekade über der logarithmisch skalierten Frequenzachse angenommen werden kann. Mit dieser Annahme wurde die Berechnung der individuellen Nahnebensprechkopplungsfunktionen auf die Lösung eines multiplen linearen Regressionsmodells überführt. Das lineare Regressionsmodell ist gegenüber dem nicht linearen Modell durch einen geschlossenen Ansatz lösbar. Die explizite Festlegung von Randbedingungen für die Bestimmung einer optimalen Lösung durch den iterativen Lösungsansatz eines nicht linearen Regressionsmodells ist im linearen Fall nicht nötig. Demzufolge ist das lineare Regressionsmodell gegenüber dem nicht linearen Modell einfacher zu implementieren.

Der Algorithmus und die Genauigkeit des hier entwickelten Nahnebensprechmodells wurden durch Messungen und Simulationen verifiziert. Der Kreuzkorrelationskoeffizient zwischen den mit dem vorgestellten Modell berechneten und den gemessenen NEXT-Kopplungsfunktionen beläuft sich auf über 80 Prozent. Die mittlere Differenz zwischen der mit dem entwickelten Modell geschätzten und tatsächlich gemessenen NEXT-Kopplungsfunktion betrug 3,0986 dB. Im Gegensatz dazu wies die NEXT-Kopplungsfunktion des ETSI-Nahnebensprechmodells eine mittlere Differenz von 14,9846 dB auf. Wie anhand von Simulationen gezeigt wurde, führt die realistische Approximation der in einem Kabelbündel vorhandenen Nahnebensprechkopplungsfunktionen durch das in dieser Arbeit entwickelte Modell zu einer optimierten Schätzung der tatsächlich auf den Zweidrahtleitung vorhandenen Nahnebensprechstörungen.

Das in dieser Arbeit entwickelte Nahnebensprechmodell basiert auf dem Sachverhalt, dass die NEXT-Kopplungsfunktionen im Frequenzbereich einfacher als im Zeitbereich berechenbar sind. Das vorgestellte Nebensprechmodell ist gegenüber äquivalenten Zeitbereichsverfahren dahingehend von Vorteil, dass lediglich Multiplikationen und keine Faltungsoperationen ausgeführt werden müssen. Das entwickelte Modell adaptiert sich automatisch im laufenden Betrieb der Sendeanlagen auf die Nahnebensprechverhältnisse von Telefonanschlussleitungen. Umfangreiche und kostenaufwändige Messungen können dadurch reduziert werden.

Für den praktischen Einsatz des vorgestellten Nahnebensprechmodells wurden in Kapitel 5 die Implementierungsaspekte des Modells analysiert. Die Realisierung des Modells wurde funktional in eine Einheit zur Berechnung der Nahnebensprechkopplungsfunktionen und in eine Messschaltung zur Bestimmung der Spektren als Eingangsgrößen des Modells aufgeteilt. Die von dem entwickelten Nahnebensprechmodell durchzuführenden Rechenschritte können in einem PC oder in einem DSP erfolgen.

Für die Messung der zur Modellierung notwendigen Spektren wurde eine Schaltung nach dem „Fast-Fourier-Prinzip“ und nach dem „Heterodyn-Prinzip“ (Überlagerungsprinzip) entwickelt. Auf Grund der begrenzten Bandbreite von Analog-Digital-Wandlern bei der Realisierung des Fast-Fourier-Prinzips, wurde die Messschaltung nach dem Heterodyn-Prinzip detailliert spezifiziert. Diese Schaltung setzt die Signale am Eingang der Messschaltung auf eine feste Zwischenfrequenz um. Für die Unterdrückung der bei der Frequenzumsetzung auftretenden und störenden Spiegelfrequenzen mit einem Vorfilter fester Mittenfrequenz, wurde das „Prinzip der hohen Zwischenfrequenz“ angewandt.

Die Messschaltung wurde dahingehend optimiert, dass alle Messdaten in einem einzigen Speicher auf der Schaltung abgelegt werden können. Durch die Zwischenspeicherung der auf den Kupferzweidrahtleitungen parallel gemessenen Spektren in Registern des Controllers der Messschaltung, können alle Messdaten in einem einzigen Speicherbaustein sequentiell abgelegt werden. Prinzipiell kann das RAM der Schaltung als FIFO ausgeführt werden. In dem FIFO wird lediglich ein Teil der Messwerte abgelegt und es werden ständig Daten aus dem Speicher zur Recheneinheit übertragen. Dieses Konzept wurde gegen die Möglichkeit abgewogen, dass alle Messwerte zunächst im RAM gespeichert werden und erst nach Abschluss der Messungen der Speicherinhalt zur wei-

teren Verarbeitung übertragen wird. Infolge der Entkopplung der Messdatenrate von der weiteren Verarbeitungsgeschwindigkeit und der nur einmaligen Netzlast wurde das zweite Speicherkonzept als geeigneter erachtet. Die entwickelte Messschaltung kann dabei generell auch für andere Anwendungsfälle der Netzwartung und Problembehebung eingesetzt werden.

Für den Einsatz des entwickelten Nahnebensprechmodells für realistische xDSL-Systemtests im Labor, wurde das Konzept eines flexiblen Störsignalgenerators erörtert¹. Die von der Messschaltung gemessenen Spektren werden an den flexiblen Störsignalgenerator übertragen, dessen interner DSP die NEXT-Kopplungsfunktionen nach dem Nahnebensprechmodell berechnet. Mittels der gemessenen Spektren und den berechneten Kopplungsfunktionen können bei Systemtests bestimmte kritische Störumgebungen reproduziert und xDSL-Systeme dahingehend gezielt optimiert werden.

Ferner wurde die Verwendung des entwickelten Nahnebensprechmodells zur Netzplanung in einem entsprechenden Software-Analysewerkzeug behandelt. Das vorgestellte Nahnebensprechmodell adaptiert sich im laufenden Betrieb der Leitungen auf die vorhandenen Nebensprechstörungen. Die mit dem verbesserten Nebensprechmodell berechneten Kopplungsfunktionen erlauben eine optimierte Beschaltung der bestehenden Kabelinfrastruktur im Hinblick der auftretenden Nebensprechstörungen.

In Kapitel 5 wurde die Systemspezifikation der Messschaltung beschrieben. Für die praktische Realisierung der Schaltung ist dieses Konzept bis zur Auswahl der benötigten Bauelemente weiterzuentwickeln. Dabei sind beispielsweise die Temperaturkompensation und die Genauigkeit der Bauelemente zu betrachten. Eine detaillierte Optimierung der Messschaltung kann letztendlich nur an einem Prototyp erfolgen. Auf Grund der beschriebenen Vorteile wird das in dieser Arbeit entwickelte Nahnebensprechmodell in der nahen Zukunft in einem industrienahen Forschungsprojekt realisiert.

¹Die Flexibilität des hier beschriebenen Störsignalgenerators bezieht sich auf die Reproduktion der individuell in Kabelbündeln auftretenden Nahnebensprechstörungen.

A Implementierte xDSL-Störmodelle

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Standards, deren Störmodelle in derzeit auf dem Markt angebotenen Störsignalgeneratoren implementiert wurden.

Störmodelle nach	Sparnex NGE	Spirent DLS 5A01	ACTERNA LS 10.xx
ETSI	ETR 152 ETR 080 ETR 328 User defined	ETR 152 ETR 080 ETR 328 ETR 388 TM(98)08 User defined	ETR 152 ETR 080 ETR 328
ANSI	T1.413 T1.408	T1.413 Issue 2 T1.601 T1E1.4/99-006R6	
ITU	G.961 TD 44-E	G.991.2 G.992.1 G.992.2 G.996.1	G.991.2 G.996.1

Tabelle A.1: In Störsignalgeneratoren implementierte xDSL-Störmodelle

B Leistungsdichtespektren

Die folgenden Abschnitte zeigen die Sendeleistungsdichtespektren von ISDN-, ADSL-, HDSL-, SDSL-Systemen gemäß den Standards T1E1.4/98-007R4 [42]. Die Sendeleistungsdichtespektren dienen in Kombination mit den in Kapitel 3 dargestellten Kopplungsfunktionen der Simulation von Nebensprechstörungen auf xDSL-Kanälen.

B.1 ISDN-Leistungsdichtespektrum

Das einseitige Sendeleistungsdichtespektrum eines ISDN-Systems mit einer Rate von 80000 2B1Q-Symbolen pro Sekunde lautet:

$$S_{ISDN}(f) = K_{ISDN} \cdot \frac{\left[\sin\left(\frac{\pi f}{f_0}\right) \right]^2}{\left(\frac{\pi f}{f_0}\right)^2} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_{3dB}}\right)^4} \quad (\text{B.1})$$

mit: $f_0 = 80$ kHz, $K_{ISDN} = \frac{5}{9} \cdot \frac{V_p^2}{R}$, $V_p = 2,50$ Volt, $R = 135$ Ω .

Die Symbole des 2B1Q-Signals besitzen identische Auftrittswahrscheinlichkeiten. Die 3dB-Grenzfrequenz f_{3dB} des Butterworth-Sendefilters zweiter Ordnung beträgt 80 kHz.

B.2 HDSL-Leistungsdichtespektrum

Das Leistungsdichtespektrum eines HDSL-Störers wird durch den analytischen Ausdruck

$$S_{HDSL}(f) = K_{HDSL} \cdot \frac{2}{f_0} \cdot \frac{\left[\sin\left(\frac{\pi f}{f_0}\right) \right]^2}{\left(\frac{\pi f}{f_0}\right)^2} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_{3dB}}\right)^8} \quad (\text{B.2})$$

mit: $f_0 = 392$ kHz, $K_{HDSL} = \frac{5}{9} \cdot \frac{V_p^2}{R}$, $V_p = 2,70$ Volt und $R = 135$ Ω beschrieben.

Das von Gleichung (B.2) beschriebene einseitige Leistungsdichtespektrum setzt gleichwahrscheinliche 2B1Q-Signale der Symbolrate 392 kSymbole/Sekunde voraus. Die 3dB-Grenzfrequenz des Butterworth-Filters vierter Ordnung zur Formung des Sendepulses beträgt $f_{3dB} = 196$ kHz.

B.3 Downstream ADSL-Leistungsdichtespektrum

Das einseitige Sendeleistungsdichtespektrum eines ADSL-Nebensprechstörer ist durch die Gleichung

$$S_{ADSL} = K_{ADSL} \cdot \frac{2}{f_0} \cdot \frac{\left[\sin \left(\frac{\pi f}{f_0} \right) \right]^2}{\left(\frac{\pi f}{f_0} \right)^2} \cdot |LPF(f)|^2 \cdot |HPF(f)|^2 \quad (\text{B.3})$$

mit: $f_0 = 2,208 \cdot 10^6$ Hz, $K_{ADSL} = 0,1104$ Watt gegeben.

K_{ADSL} repräsentiert die gesamte Sendeleistung des ADSL-Systems vor der Impulsformung. f_0 stellt die Abtastfrequenz in Hz dar.

Die Leistungsübertragungsfunktion $|LPF(f)|^2$ des Tiefpassfilters zur Impulsformung lautet:

$$|LPF(f)|^2 = \frac{f_h^\alpha}{f^\alpha + f_h^\alpha} \quad (\text{B.4})$$

mit: $f_h = 1,104 \cdot 10^6$ Hz, $\alpha = \frac{36}{10 \log(2)} = 11,96$.

Die 3dB-Grenzfrequenz des Tiefpasses beträgt 1104 kHz mit einem rolloff-Faktor von 36 dB/Oct.

Die Übertragungsfunktion $|HPF(f)|^2$ des Hochpasses zur Trennung des ADSL-Signals von dem niederfrequenten Telefonsignal (POTS-Signal) lautet:

$$|HPF(f)|^2 = \frac{f^\alpha + f_l^\alpha}{f^\alpha + f_h^\alpha} \quad (\text{B.5})$$

Das Hochpassfilter nach Gleichung (B.5) besitzt die 3dB-Grenzfrequenzpunkte bei $f_l = 4$ kHz und $f_h = 25,875$ kHz. Die Sperrdämpfung im Sprachband beträgt 57,5 dB.

B.4 Upstream ADSL-Leistungsdichtespektrum

$$S_{ADSL} = K_{ADSL} \cdot \frac{2}{f_0} \cdot \frac{\left[\sin\left(\frac{\pi f}{f_0}\right) \right]^2}{\left(\frac{\pi f}{f_0}\right)^2} \cdot |LPF(f)|^2 \cdot |HPF(f)|^2 \quad (\text{B.6})$$

mit: $f_0 = 276$ kHz, $K_{ADSL} = 0,0437$ Watt gegeben.

$$|LPF(f)|^2 = \frac{f_h^\alpha}{f^\alpha + f_h^\alpha} \quad (\text{B.7})$$

mit: $f_h = 138$ kHz, $\alpha = \frac{36}{10 \log(2)} = 11,96$.

C Leitungscharakteristik

Die folgenden Tabellen beinhalten die Leitungsbeläge der Testleitungen PE04, PE06, PVC04 und PVC06 des ETSI SDSL-Standards [28]. Mittels dieser Leitungsbeläge können die Kopplungsfunktionen der ETSI Nah- und Fernnebesprechmodelle berechnet werden.

	SDSL.PE04			SDSL.PE06		
f [Hz] $\times 10^3$	R_s [Ω/m] $\times 10^{-3}$	L_s [H/m] $\times 10^{-9}$	C_p [F/m] $\times 10^{-12}$	R_s [Ω/m] $\times 10^{-3}$	L_s [H/m] $\times 10^{-9}$	C_p [F/m] $\times 10^{-12}$
0	268	680	45.5	119	700	56
10	268	678	45.5	120	695	56
20	269	675	45.5	121	693	56
40	271	669	45.5	125	680	56
100	282	650	45.5	146	655	56
150	295	642	45.5	167	641	56
200	312	635	45.5	189	633	56
400	390	619	45.5	260	601	56
500	425	608	45.5	288	590	56
700	493	593	45.5	340	576	56
1000	582	582	45.5	405	570	56
2000	816	571	45.5	571	560	56

	SDSL.PVC04			SDSL.PVC06		
f [Hz] $\times 10^3$	R_s [Ω/m] $\times 10^{-3}$	L_s [H/m] $\times 10^{-9}$	C_p [F/m] $\times 10^{-12}$	R_s [Ω/m] $\times 10^{-3}$	L_s [H/m] $\times 10^{-9}$	C_p [F/m] $\times 10^{-12}$
0	268	650	120	108	635	120
10	268	650	120	108	635	120
20	268	650	120	108	635	120
40	268	650	120	111	630	120
100	281	635	120	141	604	120
150	295	627	120	173	584	120
200	312	619	120	207	560	120
400	391	592	120	319	492	120
500	426	579	120	361	469	120
700	494	566	120	427	450	120
1000	584	559	120	510	442	120
2000	817	550	120	720	434	120

Literaturverzeichnis

- [1] Gorz, A.: *Thesen zur Wissensgesellschaft*. Kongress der Heinrich-Böll-Stiftung, Berlin, 4. - 6. Mai 2001.
- [2] Deutsche Breitbandinitiative: URL: <http://www.breitbandinitiative.de> (12.08.2003).
- [3] DSL-Forum: *2002 Figures from the DSL Forum and Point Topic Research*. URL: http://www.dslforum.org/PressRoom/news_europe_dslgrowth_3.12.03.html (03.09.2003).
- [4] Nielsen//NetRatings: *30% der Deutschen nutzen das Internet*. URL: <http://www.nielsen-netratings.com> (10.01.2001).
- [5] ITU News 8/2000.
- [6] Romero, S.: *D.S.L. Service for Linking to Internet Is Problem Ridden*. In: The New York Times (28.12.2000).
- [7] Fitts, R.: *Service Providers need new test strategy to roll out DSL services*. In: TPI, September 2000, S. 19.
- [8] Heise Online News: *ITU: Europa im Rückstand bei ADSL-Breitbandtechnik*. In: Newsletter. URL: <http://www.heise.de> (9.05.2001).
- [9] Jupiter MMXI: *Nur 10 Millionen Haushalte werden bis zum Jahr 2003 Breitband-Zugang haben*. In: Jupiterresearch. URL: <http://www.jupiterresearch.com/bin/item.pl/> (6.04.2001).
- [10] NetworkWorld Germany: *Europas xDSL-Markt glänzt mit hohen Zuwachsraten*. In: Networkworld. URL: <http://www.tecchannel.de/netzwerk/kommunikation.html> (6.11.2000).
- [11] Vahldiek, A.: *Mit Highspeed durch das Internet*. In: c't, Heft 1, Januar 2002, S. 80 - 81.
- [12] Voglgsang, A., Heinen, I., Leibiger, M. und Steckenbiller, H.: *Gedämpfte Freude*. In: iX, Heft 8, Juli 2003, S. 99 - 103.
- [13] Voglgsang, A., Langguth, T., Steckenbiller, H., Knorr, R.: *Measurement, characterization and simulation of noise on powerline channels*. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Powerline Communications and its Applications, Limerick, April 2000.

- [14] Kimpe, M. und Hausner, J.: *Impairment Modeling for DSLs: Part I: Near End Crosstalk*. ETSI-TM6 contribution TD 43, Antwerpen, 20.-24. April 1998.
- [15] Schoen, U. und Scholz, S.: *Internet-Zugang über traditionelle Telefonnetze*. In: NetworkWorld Germany, Nr. 12, 1998.
- [16] Sparnex: *LSX 2020 User-Manual*. Revision 0, August 1997.
- [17] Sparnex: *NGE-Noise Generator User-Manual*. Revision 02, 15. September 2000.
- [18] Spirent: *DLS 5A01 Operating-Manual*. Revision 0, 8. Dezember 2000.
- [19] ACTERNA: *LS 10.xx Leitungssimulator für ISDN und xDSL*. 2001.
- [20] *Draft Proposed American National Standard, Spectrummanagement for Loop Transmission Systems*. ANSI-T1E1.4 Draft Standard, T1E1.4/2000-002R5, Savannah, GA, 13.-17. November 2000.
- [21] *Spectrum Management for Loop Transmission Systems*. Committee T1 Standard T1.417, Januar 2001.
- [22] Persico, R. und Magnone, L.: *A new analytical method for FEXT noise calculation in multi-access architectures*. ETSI-Beitrag, Antwerpen, 20.-24. April 1998.
- [23] Cook, J., Magnone, L. und Persico, R.: *Proposed working text for appendix, crosstalk combination*. ETSI-Beitrag, Arlington, 20. - 23. April 1999.
- [24] *Transmission and Multiplexing (TM); Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL); Requirements and performance*. ETSI Technical Report 328, November 1996.
- [25] *T1.413 Issue 2*. ANSI Draft Standard T1E1.4/98-007R5, Plano, Texas, 30. November - 4. Dezember 1998.
- [26] *Draft for HDSL2 Standard, Default Letter Ballot*. ANSI-T1E1.4 Draft Standard, T1E1.4/99-006R5, Baltimore, MD, 23.-27. August 1999.
- [27] *Single-pair high-speed digital subscriber line (SHDSL) transceivers - For approval-Updated*. ITU Standard G.991.2, Februar 2001.
- [28] *Transmission and Multiplexing (TM); Access transmission system on metallic access cables; Symmetrical single pair high bitrate Digital Subscriber Line (SDSL)*. ETSI Technical Specification 101 524, Version 1.1.2, August 2001.
- [29] Valenti, C.: *Cable crosstalk parameters and models*. ANSI T1E1.4/97-302, September 1997.
- [30] Valenti, C.: *NEXT and FEXT Models for Twisted-Pair North American Loop Plant*. In: IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 20, Nr. 5, Juni 2002, S. 893 - 900.

-
- [31] Maltz, G., u.a.: *Performance of Current Local Cable Designs in High Bit Rate Applications*. In: Int. Wire and Cable Symposium Proceedings (IWCS), November 1993.
- [32] Starr, T.; Cioffi, J. und Silverman, P. J.: *Understanding Digital Subscriber Line Technology*. 1. Auflage, München, Boston, San Francisco: Addison-Wesley, 2000.
- [33] Galli, S., Valenti, C. und Kerpez, K. J.: *A Frequency-Domain Approach to Crosstalk Identification in xDSL Systems*. In: IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 19, Nr. 8, August 2001, S. 1497 - 1506.
- [34] Galli, S. und Kerpez, K. J.: *Methods of Summing Crosstalk From Mixed Sources-Part I: Theoretical Analysis*. In: IEEE Transactions on Communications, Vol. 50, Nr. 3, März 2002, S. 453 - 461.
- [35] Galli, S. und Kerpez, K. J.: *Methods of Summing Crosstalk From Mixed Sources - Part II: Performance Results*. In: IEEE Transactions on Communications, Vol. 50, Nr. 4, April 2002, S. 600 - 607.
- [36] Mlecek, U.: *Grundlagen für die wirtschaftliche Nutzung bestehender Kupfernetze im Anschlußbereich durch xDSL*. In: Der Fernmelde-Ingenieur, Nr. 52, Mai/Juni 1998.
- [37] Werner, J. J.: *The HDSL Environment*. In: IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 9, Nr. 4, 1991, S. 785 - 800.
- [38] Eckert, E. J. und Darveau, M.: *G.Lite Microfilter Specification - Inter-Modulation Distortion Test Specification*. ANSI T1E1.4 Contribution T1E1.4/99-526R1, Clearwater, Florida, 6. - 10. Dezember 1999.
- [39] Gibbs, A. J. und Addie, R.: *The Covariance of Near End Crosstalk and its Application to PCM System Engineering in Multipair Cables*. In: IEEE Transactions on Communications, COM-27, Februar 1979, S. 469 - 477.
- [40] Cravis, H. und Carter, T.: *Engineering of T1 carrier system repeatered lines*. In: Bell System Technical Journal, Vol. 42, Nr. 2, Mai 1963, S. 431 - 486.
- [41] Cioffi, J.: *VDSL System Requirements Document*. ANSI Beitrag, Juni 1998.
- [42] van den Brink, R.F.M.: *Cable reference models for simulation metallic access networks*. ETSI-TM6 Contribution TM6(97)02, [970p02r3], revision 3, Lulea, Schweden, 22. - 26. Juni 1998.
- [43] *ADSL Interoperability Test Plan*. DSL-Forum Technical Report TR-048 (Formerly WT-062v9), April 2002.
- [44] ADSL Draft Standard T1E1.4/98-007R4.
- [45] Kerpez, K.: *Near-End Crosstalk is Almost Gaussian*. In: IEEE Transactions on Communications, Vol. 41, Nr. 1, Januar 1993, S. 670 - 672.
- [46] HDSL2-Draft Standard T1E1.4/99-006R5.

- [47] Unger, J. H. W.: *Near-end crosstalk model for line code studies*. In: ECSA Contribution, T1E1.3/85-244, 12. November 1985.
- [48] Klein, W.: *Die Theorie des Nebensprechens auf Leitungen*. 1. Auflage, Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag, 1955.
- [49] Cook, J. W.; Kirkby, R. H.; Both, M. und Foster, K. T.: *The Noise and Crosstalk Environment for ADSL and VDSL Systems*. In: IEEE Communication Magazine, Mai 1999, S. 73-78.
- [50] Schneider, K.: *Proposal to Drop FEXT from Crosstalk PSD Definitions*. ANSI Beitrag T1E1.4, Ottawa, Ontario, 7. - 11. Juni 1999.
- [51] Kimpe, M. und Hausner, J.: *Impairment Modelling for DSLs: Part I: Near End Crosstalk*. Antwerpen: ETSI-TM6, April 1998.
- [52] Papoulis, A.: *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*. McGraw-Hill Kogkusha Ltd. Internat. Student Edition, 1965.
- [53] Lin, S.: *Statistical Behavior of Multipair Crosstalk*. In: Bell System Technical Journal, Vol. 59, Nr. 6, Januar 1980, S. 955-974.
- [54] Fultz, K. und Penick, D.: *The T1 Carrier System*. In: Bell System Technical Journal, Vol. 44, Nr. 7, 1965, S. 1405-1451.
- [55] Pollakowski, M.: *xDSL - Hochratige Datenübertragung im Anschlussleitungsnetz*. In: Der Fernmelde-Ingenieur, Heft 7-8, Juli/August 1998.
- [56] Mertz, A. und Pollakowski, M.: *xDSL & Access Networks*. 1. Auflage, München: Prentice Hall, 2000.
- [57] Wellhausen, H. W. und Heuser, S.: *Effiziente Nutzung vorhandener Ortsanschlussleitungen*. In: Der Fernmelde-Ingenieur, Heft 8/9, 1993.
- [58] Ebrahimpour, K.; Voglgsang, A.; Hutzelmann, H. und Knorr, R.: *Charakterisierung und Modellierung von Übersprechen im Telefonanschlussnetz: Theorie und Praxis*. In: Proceedings zum ITG-Workshop, Oktober 2002.
- [59] Ziemann, O.: *Kupfer, Strom, Breitband oder Satellit: die Telefontechniken der Zukunft*. www.save.de.
- [60] Bez, T.: *Telekommunikationsnetze*. www.barnim.net/bez, 1999.
- [61] Russer, P.: *Skriptum zur Vorlesung Hochfrequenztechnik 1*. Technische Universität München: Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik, 1993.
- [62] Meinke, H. H. und Gundlach, F. W.: *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*. 5. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer, 1992.
- [63] Hauske, G.: *Skriptum zur Vorlesung Statistische Methoden der Nachrichtentechnik 1*. Technische Universität München: Lehrstuhl für Nachrichtentechnik, 1995.

-
- [64] Söder, G.: *Modellierung, Simulation und Optimierung von Nachrichtensystemen*. 1. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer, 1993.
- [65] Fliege, N.: *Systemtheorie*. 1. Auflage, Stuttgart: B.G. Teubner, 1991.
- [66] Zeng, S. C.; Aldana, C.; Salvekar, A. und Cioffi, J. M.: *Crosstalk Identification in xDSL-Systems*. In: IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 19, Nr. 8, August 2001, S. 1488 - 1496.
- [67] Meyberg, K. und Vachenauer, P.: *Höhere Mathematik 1*. 3. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1995.
- [68] Hartung, J.; Elpelt, B. und Klösner, K.-H.: *Statistik*. 9. Auflage, München, Wien: Oldenbourg Verlag, 1989.
- [69] Fahrmeir, L., Künstler, R., Pigeot, I. und Tutz, G.: *Statistik*. 2. Auflage, Berlin, New York, Barcelona, Paris: Springer Verlag, 1999.
- [70] Joyce, A.: *Effective provisioning of Broadband on the local loop*. Trend Communications Ltd.: www.trendcomms.com
- [71] Russer, P.: *Skriptum zur Vorlesung Hochfrequenztechnik 3*. Technische Universität München: Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik, 1993.
- [72] Entenmann, W.: *Skriptum zur Vorlesung Netzwerktheorie 2*. Technische Universität München: Lehrstuhl für Netzwerktheorie und Signalverarbeitung, 1996.
- [73] Rauscher, C.: *Grundlagen der Spektrumanalyse*. 1. Auflage, München: Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, 2000.
- [74] Schneider, K.: *Proposed Impulse Noise Test Criteria*. Costa Mesa, Kalifornien: T1E1.4, 8.-11. März 1999.
- [75] Cook, J. W.: *Wideband impulsive noise survey of the access network*. In: BT Technical Journal, Vol. 11, Nr. 3, Juli 1993, Seiten 155-162.
- [76] Schröter, J.: *Skriptum zur Lehrveranstaltung Telekommunikationstechnik*. <http://www.tfh-berlin.de/~schroter/index.html>.
- [77] Kommission der europäischen Gemeinschaften: *Entbündelter Zugang zum Teilnehmeranschluss*. KOM(2000)237, Brüssel: 2000.
- [78] Magesacher, T., Henkel, W., Tauböck, G. und Nordström T.: *Cable measurements supporting xDSL technologies*. In: e&i, Heft 2, Februar 2002, Seiten 37-43.
- [79] Huang, G. und Werner, J. J.: *A Cable Characterisation Method and Procedure*. ETSI-TM6 Contribution 963T23r0, Sophia Antipolis, 2. - 6. Dezember 1996.
- [80] Abdulrahman, M.: *Cyclostationary Crosstalk Suppression by Decision Feedback Equalization on Digital Subscriber Loops*. In: IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 10, Nr. 3, 1992, S. 785 - 800.

- [81] Ziemann, P.: *ADSL line qualification tests*. Wandel & Goltermann Application Note Nr. 52.
- [82] Durcansky, G.: *EMV-gerechtes Gerätedesign*. 5. Auflage, Poing: Franzis, 1999.
- [83] Lang, M.: *Kurzmanuskript zur Vorlesung Signaldarstellung*. Technische Universität München: Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, 2000.
- [84] *Description of the U-R2 Interface of ADSL Systems; 1 TR 112*. Darmstadt: Deutsche Telekom AG, Version 5.0, Mai 2003.
- [85] Schoblick, R.: *Messungen am DSL-Anschluss*. In: funkschau, Nr. 11, November 2001.
- [86] Kien, M.: *Testequipment für DSL-Services im Überblick*. In: funkschau, Nr. 3, März 2003, Seiten 54-58.
- [87] Becker, W.-J., Bonfig, K. W., Höing, K.: *Handbuch elektrische Messtechnik*. 1. Auflage, Heidelberg: Hüthig, 1998.
- [88] Witte, R. A.: *Spectrum & Network Measurements*. Prentice Hall, Englewood Cliffs NJ, 1993.
- [89] Hewlett Packard: Application Note 243, Fundamentals of Signal Analysis. Hewlett Packard, Böblingen, Januar 1995.
- [90] Kammeyer, K. D.: *Nachrichtenübertragung*. 2. Auflage, Stuttgart: Teubner, 1996.
- [91] Plate, J.: *Skriptum zur Vorlesung Datenkommunikation*. Fachhochschule München: Juni 2003.