

Rückstreu-Dämpfungsmessmethoden an Glasfasern

Autor(en): **Novak, Rostislav**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **63 (1985)**

Heft 1

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-875374>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Rückstreu-Dämpfungsmessmethode an Glasfasern

Rostislav NOVAK, Bern

Zusammenfassung. *Moderne Glasfasern mit niedriger Dämpfung, empfindliche rauscharme Photodetektoren und leistungsfähige Laserdioden ermöglichen heute eine erhebliche Ausweitung bestehender Dienstleistungen im Fernmeldewesen und die Schaffung neuer breitbandiger Systeme im zweiten und dritten optischen Fenster. Parallel dazu wächst auch der Bedarf an präzisen, schnellen und einfach zu bedienenden Messgeräten für Untersuchungen bei der Verlegung von Glasfaserkabeln und dem Betrieb solcher Anlagen. Die Rückstreu-Dämpfungsmessmethode stellt dazu ein praktisches und im Feldeinsatz bewährtes Verfahren dar. In diesem Aufsatz werden das Prinzip des optischen Reflektometers und die Theorie der Rückstreuung behandelt. Beispiele zeigen Einsatzmöglichkeiten des Gerätes auf. Die wichtigsten Eigenschaften der z. Z. erhältlichen Reflektometer sind angeführt.*

Méthode de mesure d'atténuation par rétrodiffusion appliquée aux fibres optiques

Résumé. *Aujourd'hui, grâce à des fibres optiques modernes à faible atténuation, à des photodétecteurs sensibles et à faible bruit ainsi qu'à des diodes laser performantes, il est possible d'élargir le spectre des prestations des télécommunications et de créer un nouveau système à large bande dans la deuxième et la troisième fenêtre optique. Parallèlement, il devient toujours plus nécessaire de disposer d'instruments de mesure précis, rapides et faciles à desservir pour contrôler les câbles à fibres optiques en cours de pose et pour exploiter de telles installations. La méthode de la mesure d'atténuation par rétrodiffusion représente un procédé pratique qui a donné de bons résultats sur le terrain. Le présent article traite du principe du réflectomètre optique et de la théorie de la rétrodiffusion. Des exemples montrent comment cet équipement doit être utilisé. Les principales caractéristiques des réflectomètres actuellement disponibles sont décrites.*

Misura dell'attenuazione di fibre con il metodo di «backscattering» (retrodiffusione)

Riassunto. *Un considerevole ampliamento dei servizi esistenti nelle telecomunicazioni e la creazione di nuovi sistemi a larga banda nella seconda e terza finestra ottica sono oggi possibili grazie alle fibre ottiche moderne a bassa attenuazione, ai fotorivelatori sensibili e a basso rumore e ai diodi laser efficienti. Parallelamente aumenta anche il fabbisogno di dispositivi di misurazione precisi, rapidi e di semplice uso per controlli durante la posa dei cavi ottici e durante l'esercizio degli impianti. Il metodo di backscattering per la misura dell'attenuazione è un sistema pratico già sperimentato in campo. Nell'articolo, vengono presentati il principio del riflettometro ottico e la teoria backscattering (diffusione all'indietro). Con esempi si illustrano le possibilità d'impiego dell'apparecchio. Infine si elencano le più importanti caratteristiche dei riflettometri attualmente in vendita.*

1 Einleitung

Die optische Kommunikation mit Hilfe von Glasfasern hat bereits in der ganzen Welt ihren festen Platz gefunden. Glasfaserkabel übertragen schon Telefongespräche von Zentrale zu Zentrale und leiten Fernseh-, UKW- und Telefoniesignale zu Teilnehmern. Das Hauptgewicht der gegenwärtigen Entwicklung verschiebt sich immer mehr vom ersten optischen Fenster (850 nm) zum zweiten bzw. dritten Fenster bei 1300 und 1550 nm, wo die Streckendämpfungen unter 0,5 dB/km liegen. Gleichzeitig stehen dem Anwender dank der Monomodefaser Bandbreiten von mehreren Gigahertz zur Verfügung.

In der Schweiz wurden hauptsächlich bei den PTT-Betrieben bis Mitte 1984 etwa 1000 Glasfaserkilometer verlegt und in Betrieb gesetzt. Neue Anlagen sind geplant. Dadurch wächst auch der Bedarf an präzisen, schnellen und einfach zu bedienenden Messgeräten für Untersuchungen bei der Verlegung von Glasfaserkabeln und für Messungen an fertigen Anlagen. Zu den wichtigsten Eigenschaften einer Glasfaserstrecke gehört ihre Dämpfung. Die Rückstreu-Dämpfungsmessmethode (Backscattering) stellt dazu ein praktisches und im Feldeinsatz vielfach bewährtes Verfahren dar. Das Rückstreu-Dämpfungsmessgerät, auch optisches Reflektometer genannt (OTDR = Optical Time Domain Reflectometer), erlaubt nicht nur die Dämpfung von Glasfasern zu bestimmen, sondern auch Spleiss- und Steckerverluste zu messen und Unterbrüche zu lokalisieren.

2 Messung der optischen Dämpfung

Unter der Dämpfung A (dB) optischer Komponenten (Faser, Stecker, Spleissungen usw.) einer Strecke versteht

man gemäss der CCITT-Definition [1] die Verluste des durchgehenden Lichtes, ausgedrückt als zehnfacher Logarithmus des Verhältnisses der optischen Leistungen $P_{\text{AUS}}(W)$ am Ausgang und $P_{\text{EIN}}(W)$ am Eingang dieser Komponenten, d. h.

$$A = -10 \log \frac{P_{\text{AUS}}}{P_{\text{EIN}}} \quad (1)$$

Die Dämpfung einer Glasfaser je Kilometer Länge a (dB/km) wird als Dämpfungskoeffizient bezeichnet:

$$a = \frac{A}{x} \quad (2)$$

wobei x (km) die Länge der Glasfaser ist.

Zurzeit sind zwei grundsätzliche Messverfahren bekannt, um die Dämpfung von optischen Komponenten zu messen — die Lichtdurchgangs- und die Rückstreuungsmessmethode. Im ersten Fall durchläuft das von einem optischen Sender ausgestrahlte Licht die ganze Messfaser bis zum optischen Empfänger. Aus den gemessenen Lichtleistungen auf der Sende- und Empfangsseite kann die Dämpfung gemäss (1) berechnet werden. Der Sender befindet sich dabei am einen Ende, der Empfänger auf der anderen Seite des zu messenden Objekts. Eine nähere Beschreibung dieser Methode, der dazu nötigen Messapparatur und der Erfahrungen im Feldeinsatz findet sich in [2, 3].

Bei der zweiten Methode wird die Dämpfung nur von einem Ende des zu messenden Objektes aus gemessen. Ein optisches Reflektometer nützt dabei den Rückstreuungseffekt in Glasfasern aus. Von einem in die Glasfa-

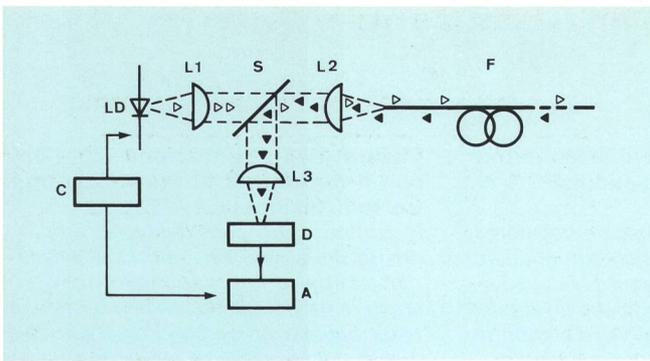


Fig. 1
Schematischer Aufbau eines Rückstremessplatzes

LD	Lasertiode	C	Ablaufsteuerung
L1, L2, L3	Linsen	F	Faser
S	Strahlteiler	▷	Vorwärtslicht
D	Detektor	◄	Rückstreulicht
A	Anzeige		

ser eingekoppelten Lichtimpuls wird ein kleiner Anteil durch das Fasermaterial gestreut. Ein geringer Anteil dieses gestreuten Lichtes läuft von jedem Faserpunkt in abgeschwächter Form zum Faseranfang zurück und wird dort vom optischen Empfänger erfasst und ausgewertet. Die Intensität des rückgestreuten Lichtes ist ein Mass für die in einer Glasfaser vorherrschende Dämpfung in Funktion des Abstandes. Der beschriebene Vorgang ermöglicht somit das Erfassen des lokalen Dämpfungsverlaufs von Glasfaser-Übertragungsstrecken, das Bestimmen von Stecker- und Spleissdämpfungen, das Orten und die Analyse von Störstellen sowie das Ermitteln der Gesamtdämpfung.

3 Prinzip der Rückstremessung

Figur 1 zeigt die prinzipielle Anordnung eines Rückstremessplatzes. Die leistungsstarken Lichtimpulse von der Lasertiode LD werden über eine optische Weiche, in

Weichentyp	Kopplungsverluste	Bemerkung
	6 dB	Glasfaser
	6 dB	Strahlteiler
	~ 6 dB	Glasfaser
	~ 6 dB	Konzentrisch angeordnete Fasern von verschiedenen Durchmessern
	~ 3 dB	Polarisationsabhängige Weiche: ↓ senkrechte Polarisation ● waagrechte Polarisation

Fig. 2
 Prinzip von optischen Weichen

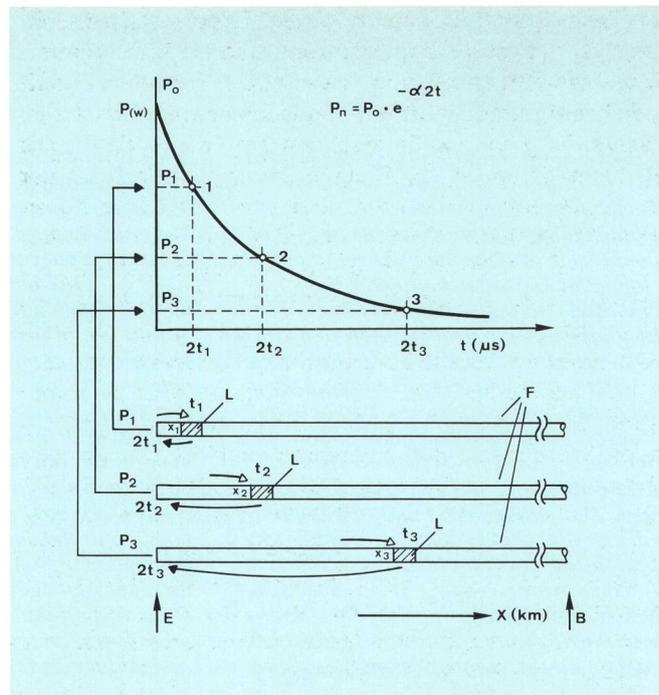


Fig. 3
Rückstreusignal in einer idealen Faser

F	Glasfaser	B	Faserende
L	Lichtimpuls	P	Rückstreuleistung
A	Faseranfang	X	Abstand vom Faseranfang

diesem Falle bestehend aus drei Linsen L1, L2, L3 und dem Strahlteiler S, in die Faser F eingekoppelt. Das in Vorwärtsrichtung verlaufende Licht ist hier symbolisch mit weissen Dreiecke (▷) bezeichnet. In der Faser entsteht nun eine Streuung dieses Lichtes. Der in Rückwärtsrichtung verlaufende Lichtanteil ist durch die schwarzen Dreiecke (◄) dargestellt. Dieses Licht wird schliesslich von dem Strahlteiler S zur Linse L3 reflektiert und in einem schnellen Fotodetektor D gesammelt. In der Anzeige A wird das Signal ausgewertet und dargestellt (z. B. mit einem Oszilloskop). Der Block C steuert den ganzen Ablauf.

Eine gut funktionierende optische Weiche ist die Hauptvoraussetzung für die optimale Funktion jedes Rückstremessplatzes. Ausser dem in Figur 1 erwähnten Weichentyp sind in der letzten Zeit verschiedene neue Systeme entstanden. Wichtig sind in erster Linie kleine Kopplungsverluste c_w (dB) einer solchen Weiche, die gemäss [4] folgendermassen definiert sind:

$$c_w = 10 \log \frac{P_0}{P_{PD}} \quad (3)$$

Darin ist $P_0(W)$ die Leistung der Lichtquelle (Laser) und $P_{PD}(W)$ die Nutzleistung, die nach einer verlustlosen Reflexion zum Fotodetektor gelangt. Zweitens muss jede Weiche womöglich hohe Dämpfung für den direkten Weg des Lichtes von der Lichtquelle zur Fotodiode aufweisen, um ihre Übersteuerung zu verhindern. Figur 2 zeigt einige typische Beispiele von verwendeten Weichen.

4 Rückstreukurve

Figur 3 zeigt, wie die Rückstrevorgänge in einer Glasfaser grafisch dargestellt werden können. Man kann hier, als Beispiel, die Entstehung des Rückstreusignals in ei-

ner Faser in den drei nacheinander folgenden Zeitpunkten t_1, t_2, t_3 beschreiben. Während sich ein Lichtimpuls L vom Fasereingang E zum Faserende B fortpflanzt, läuft gleichzeitig umgekehrt ein abgeschwächtes Signal zum Faseranfang zurück. Es erscheint am Faserende jeweils als Lichtleistung P_1, P_2, P_3 nach der doppelten Zeitdauer $2t_1, 2t_2, 2t_3$ und kann in Form einer Rückstreu­kurve auf einem Oszilloskop dargestellt werden. Im Falle einer homogenen Glasfaser verläuft diese Kurve exponentiell (Kapitel 5). Es ist üblich, sie in einem logarithmischen Massstab als eine Gerade darzustellen. *Figur 4* stellt eine typische Rückstreu­Dämpfungskurve mit verschiedenen Störstellen dar. Der normale Verlauf einzelner Streckenabschnitte 2, 4, 6, 8, 10 ist hier linear aufge­zeigt. Störungen 3 und 7 entsprechen einer Dämpfungs­änderung, wie sie bei einem Stecker oder einer Spleisung üblich sind. Kleine Luftbläschen in der Faser reflektieren das Licht, was als kleine Spitze 5 zu sehen ist. Falls zwei Fasern mit verschiedenen Streueigenschaften zusammengespleisst werden, kann sich auch eine positive Dämpfungsänderung der Rückstreu­kurve 9 ergeben, wenn die zweite Faser stärker streut.

Figur 5 stellt die Streuvorgänge in der Faser selber näher dar. Ein kurzer Lichtimpuls bestrahlt den Faserabschnitt Δx . Seine Länge ist von der Dauer dieses Impulses abhängig. An sämtlichen «Inhomogenitäten» der Faser im Abschnitt Δx wird ein Teil des Lichtes gestreut bzw. auch reflektiert. Das gestreute Licht verteilt sich nach allen Seiten, und nur ein kleiner Teil davon läuft innerhalb des Faserkerns zurück, falls seine Richtung innerhalb des in der Faser möglichen Ausbreitungswinkels, der durch die Numerische Apertur der Faser bestimmt ist, liegt (schwarze Dreiecke ◀).

Was ist nun unter «Inhomogenitäten» einer Faser zu verstehen?

– In erster Linie ist es die Streuung des Lichtes durch das Glas. Im Laufe des Herstellungsprozesses wird die Faser beim Ziehen stark abgekühlt, wenn sie die

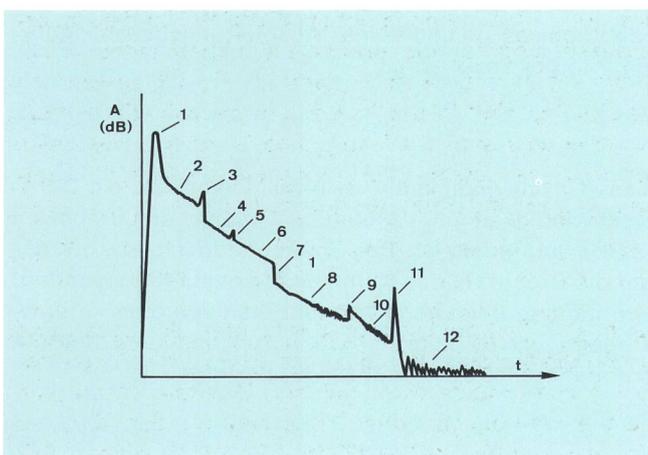


Fig. 4
Typische Rückstreu­Dämpfungskurve einer Faser

- 1 Reflexion vom Faseranfang
- 2, 4, 6, 8, 10 Normaler Dämpfungsverlauf
- 3 Dämpfungsänderung mit Reflexion (Stecker)
- 5 Interne Faserreflexion
- 7 Dämpfungsänderung ohne Reflexion (Spleissung)
- 9 Dämpfungsänderung bei Fasern mit unterschiedlicher Rückstreuung
- 11 Faserendreflexion
- 12 Rauschen

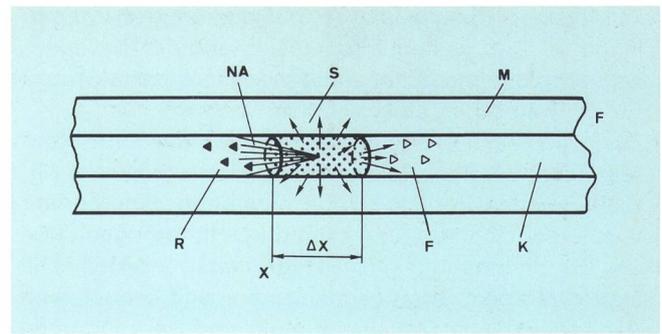


Fig. 5
Streuung in einer Glasfaser

- F Faser
- M Fasermantel
- K Faserkern
- Δx Bestrahlter Faserabschnitt
- X Faserpunkt
- R Rückstreuung
- F Vorwärtsstreuung
- S Seitliche Streuung
- NA Raumwinkel entsprechend der Numerischen Apertur
- \triangleright Vorwärtslicht
- \blacktriangleleft Rückstreulicht

Schmelzzone des Ofens verlässt. Das Material ist in der flüssigen Phase nicht vollständig homogen, sondern unterliegt winzigen Dichteschwankungen, deren Grösse von der absoluten Temperatur abhängt. Wenn das Material schliesslich in die feste amorphe Phase übergeht, erstarren diese Inhomogenitäten in Form entsprechender Mikroschwankungen des Brechungsindex des Materials, was zur eigentlichen Streuung des Lichtes, d. h. zu Verlusten führt. Sofern die geometrischen Abmessungen dieser inhomogenen Regionen wesentlich kleiner als die Wellenlänge des Lichtes λ sind, handelt es sich um die nach Lord Rayleigh genannte Rayleigh-Streuung. Sie ist zu λ^{-4} proportional und spielt die entscheidende Rolle in Verlustmechanismen einer Faser im Wellenlängenbereich 0,6...1,4 μm . *Figur 6* zeigt eine typische Dämpfungs-

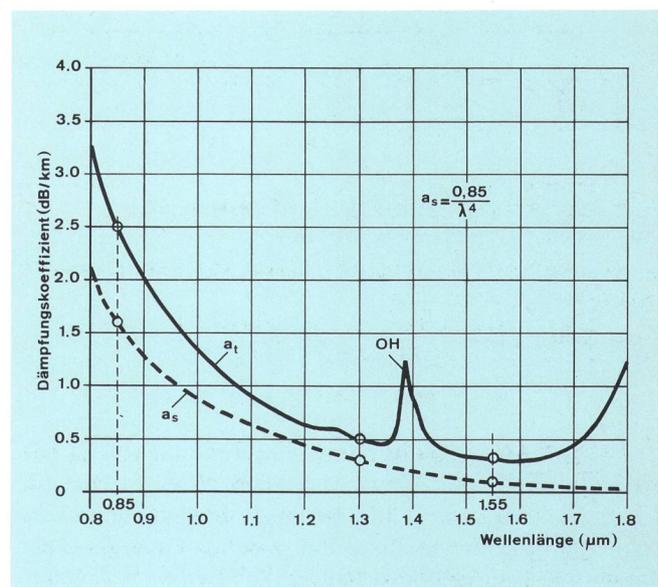


Fig. 6
Spektrale Dämpfung einer Glasfaser

- a_t Verluste total (db/km)
- a_s Streuverluste (Rayleigh-Streuung) (db/km)
- OH OH-Absorption

kurve einer Quarzglasfaser in Funktion der Wellenlänge λ . Die gestrichelte Linie stellt die Rayleigh-Streuung dar und bildet somit die theoretische Grenze für die Dämpfung einer solchen Faser.

- Zusätzlich kann Lichtstreuung auch an der Kern-Mantel-Grenze infolge geometrischer Störungen und Mikrobiegungen in dieser Zone entstehen. Eine andere Quelle der Lichtstreuung kann durch Inhomogenitäten des Brechungs-Indexprofils verursacht werden. Die letzterwähnten Streumechanismen sind jedoch von der Wellenlänge fast unabhängig und bei modernen Fasern meistens vernachlässigbar.
- In zweiter Linie gehören zu den Inhomogenitäten einer Strecke alle Faser-Faser-Dämpfungsübergänge, vor allem jene bei Spleissungen und Steckern. In diesen Fällen sind z. B. Diskontinuitäten der Brechzahl (ein Glas-Luft-Glas-Übergang) oder ein geometrischer Versatz von Fasern für die entstehenden Dämpfungssprünge der Rückstreckkurve verantwortlich. Ähnlich entstehen auch die Faserend- und Faserbruchreflexionen.
- Und schliesslich sind es sämtliche Mikro- und Makroverunreinigungen, Luftbläschen u. ä. in der Glasfaser, wo erhöhte Streuung und Reflexionen zu beobachten sind.

5 Theorie der Rückstreuung in Glasfasern

Das eine Glasfaser durchlaufende Licht unterliegt dem Gesetz der exponentiellen Dämpfung, d. h. die anfängliche Lichtleistung P_0 (W) wird nach Durchlaufen der Faserlänge x (km) auf den Wert P_x abgeschwächt [5, 6, 7]:

$$P_x = P_0 e^{-\alpha x} \quad (4)$$

α (km⁻¹) ist da Extinktionskoeffizient der Faser. Er setzt sich aus α_s (Streuung) und α_a (Absorption) zusammen:

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_a \quad (5)$$

Folglich beträgt die Dämpfung A(dB) gemäss (1), (4) und (2):

$$A = -10 \log \frac{P_x}{P_0} = -10 \log e^{-\alpha x} = \alpha x 10 \log e \quad (6)$$

und

$$\alpha = \frac{A}{x 10 \log e} = \frac{a}{10 \log e} \quad (7)$$

Im Bereich $(x + \Delta x)$ in Figur 5 wird die Leistung P_0 um ΔP abgeschwächt:

$$\begin{aligned} \Delta P &= -P_0 \alpha e^{-\alpha x} \Delta x \\ &= -P_0 \alpha_s e^{-\alpha x} \Delta x - P_0 \alpha_a e^{-\alpha x} \Delta x \end{aligned} \quad (8)$$

Das erste Glied definiert den gestreuten, das zweite den absorbierten Anteil der Lichtverluste. Man setzt dabei voraus, dass α_s und α_a über die gesamte Faserlänge konstant sind. Bei Verwendung der gleichen Faser ist diese Bedingung weitgehend erfüllt, örtlich bedingte Ausnahmen müssen gesondert behandelt werden.

Der gestreute Anteil des Lichtes breitet sich nach allen Richtungen *gleichmässig* aus (isotrope Strahlung). Ein kleiner Teil läuft, wie bereits früher erwähnt, innerhalb

des im Kern möglichen Akzeptanzkegels zurück. Dieses Rückstreusignal entspricht deshalb nur einem Teil Ω des gesamten Raumwinkels 4π . Der entsprechende Proportionalitätsfaktor G kann gemäss [5, 6] folgendermassen ausgedrückt werden:

$$G = \frac{\Omega}{4\pi} = \frac{3 NA^2}{8 n_o^2} \frac{\alpha_p}{\alpha_p + 1} \quad (9)$$

NA ist die Numerische Apertur der Faser, n_o die maximale Brechzahl im Faserkern. Der Profilexponent α_p bestimmt gemäss (10) den Verlauf der Brechzahl $n(r)$ in Funktion des Abstandes r von der Kernmitte, wobei r_k der Kernradius ist:

$$n(r) = \sqrt{n_o^2 - NA^2 \left(\frac{r}{r_k}\right)^{\alpha_p}} \quad (10)$$

α_p ist 2 für eine Gradientindexfaser mit parabolischem Brechzahlverlauf, $\alpha_p \rightarrow \infty$ für eine Stufenindexfaser [5].

So beträgt beispielsweise die Abschwächung des Rückstreusignals bei einer Gradientindexfaser (NA=0,2, $n_o=1,46$, $\alpha_p=2$) etwa $G \approx 24$ dB.

Genau gilt die Beziehung (9) nur für reine Rayleigh-Streuung. Bei dotierten Quarzgläsern liefert diese Gleichung trotz zusätzlicher Streumechanismen noch eine gute Abschätzung.

Das Rückstreusignal wird unterwegs zurück zum Faseranfang nochmals nach dem Gesetz (4) exponentiell gedämpft, bis es schliesslich als Lichtintensität $P_s(W)$ am Faseranfang erscheint:

$$P_s = (P_0 \alpha_s e^{-\alpha x} \Delta x) \cdot G \cdot e^{-\alpha x} \quad (11)$$

Der Ausdruck in Klammern stellt das gesamte Licht dar, das in den Bereich $x + \Delta x$ eintrifft, der Faktor G berücksichtigt den in Rückwärtsrichtung geleiteten Anteil, während der dritte Term die Dämpfung auf dem Rückweg zum Faseranfang darstellt.

Der Streckenabschnitt Δx hängt von der Dauer des Lichtimpulses Δt und seiner Ausbreitungsgeschwindigkeit V in der Faser ab:

$$\Delta x = V \cdot \Delta t \quad (12)$$

Diese Geschwindigkeit V ist n -mal kleiner als die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c , wobei n die Brechzahl des Glasmaterials ist. Bei Gradientindexfasern, bei denen die Brechzahl des Kerns nicht konstant ist, sondern vom Indexprofil abhängt, spricht man von einer Impuls-Gruppengeschwindigkeit V_g , die sich auf eine mittlere Gruppenbrechzahl n_g gemäss [6] bezieht:

$$V_g = \frac{c}{n_g} = \frac{c}{n_o \left(1 - \frac{\lambda}{n_o} \frac{dn_o}{d\lambda}\right)} \quad (13)$$

λ ist die Wellenlänge des Lichtes. Δx aus (11) kann nun als

$$\Delta x = \frac{c}{n_g} \Delta t \quad (14)$$

ausgedrückt werden.

Die Beziehung (13) gilt effektiv auch für Monomodefasern, die Gruppenbrechzahl n_g wird jedoch durch $n_{\text{eff}} \approx n_o$ ersetzt.

Man kann nun aus (11) die auf den Fasereingang bezogene Rückstredämpfung A_s (dB) gemäss (1) berechnen:

$$A_s = -10 \log \frac{P_s}{P_o} = -10 \log (G \cdot \Delta x \cdot \alpha_s \cdot e^{-2\alpha x}) \quad (15)$$

Nach Einsetzen von (9), (13) und (14) in (15) erhält man für eine Gradientindexfaser:

$$A_s = -10 \log \left(\frac{NA}{2n_o} \right)^2 \log \frac{c \Delta t}{n_g} - 10 \log \alpha_s - 10 \log e^{-2\alpha x} = 20 \log \frac{2n_o}{NA} + 10 \log \frac{n_g}{c \Delta t} + 10 \log \frac{1}{\alpha_s} + 2x\alpha \cdot 10 \log e \quad (16)$$

Anhand der Rückstregleichung (16) können nun die zur Verarbeitung am Fotodetektor angelangten Rückstreuimpulse quantitativ gut abgeschätzt werden. Diese Berechnungen definieren den minimalen notwendigen dynamischen Bereich des Messgerätes mit Rücksicht auf die benützte Wellenlänge des Lichtes und die Länge der Glasfaser. Von der Wellenlänge sind vor allem die Extinktionskoeffizienten α_s und α abhängig (Term 3 und 4). *Tabelle I* zeigt als Beispiel, wie sich die Rückstredämpfung

Tabelle I. Rückstredämpfung A_s (λ , x) (dB)

Koeff. α_s (km^{-1})	Koeff. α (km^{-1})	Wellenlänge λ (μm)	Faserlänge x (km)				
			1	2	5	10	25
0,37	0,58	0,85	50	55	70	95	170
0,07	0,11	1,3	53	54	57	61	76
0,03	0,07	1,55	55	56	58	61	77

fung A_s in Abhängigkeit von den in der Praxis verwendeten Wellenlängen $\lambda=0,85, 1,3$ und $1,55 \mu\text{m}$ für verschiedene Streckenlängen verändert. Die Analyse wurde für folgende Parameter durchgeführt: $NA=0,2$; $\Delta t=100 \text{ ns}$; $n_o=1,46$. Der Koeffizient α wurde aus einer typischen spektralen Kurve a_t in Figur 6 gemäss (7) berechnet. Für α_s wurde die Beziehung $a_s=0,85 \lambda^{-4}$ verwendet (Kurve a_s , Angaben des Glasfaserherstellers).

Das Ergebnis zeigt, dass es grundsätzlich möglich ist, das Rückstremessverfahren auch für die Wellenlängen $\lambda=1,3$ und $1,55 \mu\text{m}$ anzuwenden. Die geringeren Rückstrekoeffizienten bei diesen Wellenlängen werden durch die wesentlich kleineren Dämpfungen der Glasfaser mehr als kompensiert. Der notwendige dynamische Bereich des Messgerätes wird von etwa 2 km Faserlänge an sogar kleiner als bei $\lambda=0,85 \mu\text{m}$. Die Rückstregleichung (16) und Tabelle I gelten grundsätzlich auch für die Monomodefasern. Es ist nur mit einer geringfügigen Erhöhung der Rückstredämpfung um etwa 2 dB wegen des etwas kleineren Abstrahlwinkels der Monomodefasern, typisch etwa $10 \div 12^\circ$ in Term 1 der Gleichung (16), zu rechnen.

Eine andere offene Frage ist, wie hoch die Dynamik der Messgeräte dank der heute zur Verfügung stehenden Mittel gesteigert werden kann.

6 Dynamischer Bereich des Rückstremessgerätes

Im Bereich des ersten optischen Fensters ($\lambda \sim 0,85 \mu\text{m}$), kann z. B. die maximale Dynamik des Gerätes (Impulsbreite $\Delta t=100 \text{ ns}$, Bandbreite $\Delta B=5 \text{ MHz}$, Fotodetektorempfindlichkeit 1 nW , Signal-Rausch-Verhältnis $\approx 20 \text{ dB}$) rund 90...95 dB betragen. Für kürzere Impulse ($\Delta t=10 \text{ ns}$, $\Delta B=50 \text{ MHz}$) wäre die Gerätedynamik nur 75 dB. Man rechnet dabei mit Sendeleistungen von rund 10 mWpp in einer 50/125- μm -Multimodefaser und mit der Verwendung von Si-Lawinenfotodioden (Avalanche Si-PD). Im zweiten und im dritten optischen Fenster sind die Verhältnisse etwas kritischer. Die Sendeleistungen sind hier zwar beinahe identisch, die zur Detektion verwendeten Ge-Lawinenfotodioden weisen jedoch ein wesentlich stärkeres Rauschen auf, was schliesslich einen um etwa 15...20 dB kleineren dynamischen Bereich zur Folge hat. Man rechnet damit, dass erst die vor kurzem erschienenen neuen Lawinendioden auf In-Ga-As-Basis eine wirkungsvolle Abhilfe sowohl im zweiten als auch im dritten optischen Fenster bedeuten könnten.

Im Falle einer Monomodefaser muss man wegen ihres kleinen Kerndurchmessers besondere Ankopplungstechniken zwischen einem Laser und einer Faser anwenden («Taper», Linsen usw.). Leistungen von 1 mWpp und mehr sind bereits üblich. Ein grösseres Problem bei diesen Messungen ist das Justieren der Messfaser an das Gerät.

7 Rauschunterdrückung

Auf der anderen Seite benützt man bei der Erfassung des Rückstreusignals die zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses bekannten Techniken der Mittelwertbildung (Signal-Averaging). Oft wird hierbei ein spezieller Verstärker, Boxcar-Integrator genannt, eingesetzt. Er ermöglicht, mit zeitlicher Steuerung, jeweils das Signal von nur *einem Punkt* der Rückstrekurve mehrfach zwecks Mittelwertbildung (Rauschverminderung) zu erfassen. Dieser Integrationspunkt wird nach und nach entlang der gesamten Kurve verschoben. Das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert sich dabei mit \sqrt{N} , wobei N die Zahl der Mittelungen jedes Punktes bedeutet. Zu den Nachteilen dieses Verfahrens gehört die verhältnismässig lange Zeit (bis einige Minuten), die man braucht, um eine Rückstrekurve mit genügend feiner Auflösung zu erfassen. So beträgt diese Zeit z. B. für eine 7 km lange Strecke mit 25 m Schrittweite und 512 Mittelungen je Punkt bei einer Abtastfrequenz von 1000 Hz etwa 2,5 min (!). Während dieser Zeit könnten allein die Instabilitäten der Laserdiode das Ergebnis verfälschen.

In modernen Messgeräten wird deshalb ein mit einem Mikroprozessor gesteuertes mittelwertbildendes Verfahren angewendet. Die *gesamte Rückstrekurve* wird einschliesslich der Rauschanteile digitalisiert und in einem elektronischen Speicher abgelegt. Dieser Vorgang würde im vorerwähnten Fall weniger als eine Sekunde dauern. Er kann entsprechend oft wiederholt werden, die digitalisierten Messwerte werden jeweils zu den vorher erfassten addiert, wodurch das Rauschen eliminiert wird. Die gespeicherten Daten können anschliessend mit dem gleichen Rechner weiterverarbeitet werden. So kann die gesamte Streckendämpfung, Entfernung zu

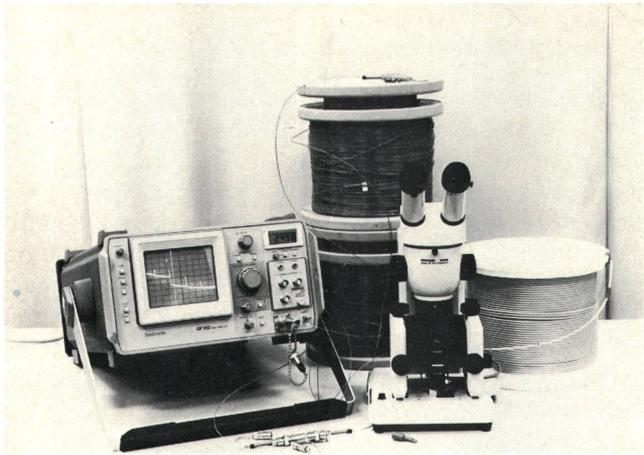


Fig. 7
Rückstreu-Dämpfungsmessplatz

den Störstellen, Spleissdämpfung usw. berechnet und dargestellt werden.

In *Tabelle II* sind die wichtigsten Eigenschaften einiger bereits kommerziell erhältlicher Rückstremessgeräte zusammengefasst. Zu beachten sind vor allem die Differenzen unter den Geräteausführungen für das erste und das zweite optische Fenster und die erreichten Parameter für Messungen an Monomodefasern. Gleichzeitig sieht man, dass es keine grossen Unterschiede zwischen den Geräten für Multi- und Monomodefasern im zweiten bzw. dritten Fenster gibt. *Figur 7* zeigt als Beispiel einen Rückstreu-Dämpfungsmessplatz in der Praxis. Die Messfasern sind hier über den optischen Stecker GFS1 von *Diamond* an das Rückstreugerät OF150 von *Tektronix* angeschlossen. Die Ankopplungsvorrichtung M540 von *Wild* ermöglicht auch lose Fasern sehr genau aufeinander auszurichten.

8 Anwendungsbeispiele

81 Messung der Glasfaserdämpfung

Die Dämpfung zwischen zwei Punkten einer Glasfaserstrecke x_1 und x_2 kann direkt aus den am Faseranfang auftretenden Lichtleistungen P_1 und P_2 (*Fig. 8*) bestimmt werden.

Es gilt:

$$A(\text{dB}) = \frac{-10 \log \frac{P_2}{P_1}}{2} = -5 \log \frac{P_2}{P_1} \quad (17)$$

Die Division durch 2 ist nötig, um die «Einwegdämpfung» zu berechnen, da der Lichtimpuls die Messstrecke zweimal zurücklegt.

Für die Berechnung des Dämpfungskoeffizienten muss zudem die Länge des Abschnittes $x_2 \dots x_1$ genau bekannt sein. Diese kann anhand von Impulslaufzeiten gemäss (14) berechnet werden.

Es gilt dann:

$$a \text{ (dB/km)} = \frac{A}{x_2 - x_1} = \frac{-10 \log \frac{P_2}{P_1}}{x_2 - x_1} \quad (18)$$

Alle modernen optischen Rückstreu-Dämpfungsmessgeräte sind heute mit einem Mikrorechner ausgerüstet, der sämtliche Berechnungen automatisch ausführt. Auf dem Bildschirm erscheint die Rückstreu- und Dämpfungskurve in Funktion der Faserlänge im logarithmischen Massstab. Mit Hilfe einer beweglichen Markierungslinie (Cursor) können nun die gewünschten Messpunkte x_1 und x_2 eingestellt werden. Gleichzeitig wird die Gruppenbrechzahl der Faser, meist Werte zwischen 1,4 und 1,6, eingegeben. Die gesamte Dämpfung, der Dämpfungskoeffizient und die Länge der Strecke erscheinen dann in digitaler Form, entweder als zusätzliche Information auf dem gleichen Bildschirm oder auf einer gesonderten Anzeige.

Die Dämpfungswerte einer Gradientindexfaser sollen gemäss den CCITT-Empfehlungen [1] unter Modengleichgewichtsbedingungen ermittelt werden. Bei der Rückstremethode ist dies jedoch nicht der Fall. Auf dem Hinweg ist die Dämpfung von Lichteinkopplungsbedingungen abhängig. Es können am Faseranfang viel Leckwellen und Mantelmoden angeregt werden. Aber auch auf dem Rückweg enthält die Rückstreuung anfänglich alle Moden, da sie im Augenblick der Streuung isotrop ist. Deswegen braucht man in beiden Richtungen eine gewisse Mindestfaserlänge, um dem stationären Modengleichgewicht nahezukommen. Genaue Messungen sind deshalb, vor allem auf den ersten Metern, nicht angebracht. Bei längeren Fasern findet man jedoch eine praktisch akzeptierbare Übereinstimmung mit den Werten im Modengleichgewicht.

82 Messungen an optischen Steckern und Spleissungen

Es ist grundsätzlich nicht möglich, die Stecker- oder Spleissdämpfungen nach dem Rückstreuverfahren genau zu messen. Der Grund liegt in der ungenügenden Auflösung der in der Praxis verwendeten Messapparatur. *Figur 9* veranschaulicht einen hypothetischen Fall, bei dem die Messung eines Steckers (Zone B-C) mit Hilfe von (unrealistisch) extrem kurzen Impulsen ($t < 10^{-15}$ s) durchgeführt würde. Das Rückstreulicht hätte dann den angedeuteten idealen Verlauf (volle Li-

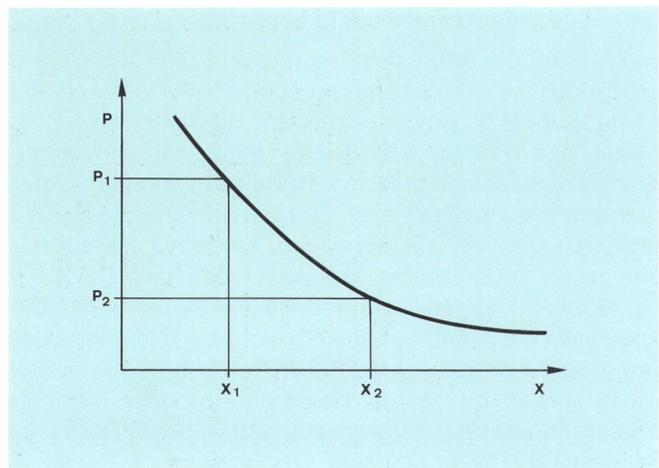


Fig. 8
Rückstreu- und Dämpfungskurve. Ermittlung der Faserdämpfung
 P_1, P_2 Rückstreuleistungen am Faseranfang
 x_1, x_2 Messpunkte

Tabelle II. Rückstromeigenschaften. Optische Eigenschaften

Firma	Modell	Wellenlänge (µm)	Glasfaser	Dyn. Bereich des Gerätes (dB)	Max. messbare Einweg-Dämpfung (dB)	Max. messbare Einweg-Fresnell-Reflexion (dB)	Pulsbreite (ns)	Frequenz (kHz)	Optische Leistung, Energie	Bemerkung
1. Tektronix, USA	OF 150	0,85	MULT	105	21,5 ¹⁾	42,5	15, 55	4,76	$\Phi \geq 25 \mu W$	¹⁾ Auflösung 0,1 dB
2. Tektronix, USA	OF 152	1,3	MULT	84	13,5 ¹⁾	35	200, 1100	1,55	$\Phi \geq 19 \mu W$	
3. Orionix, USA	SCD-202 OTDR-103C OTDR-108 OTDR-111	0,82 1,3 1,3	MULT MULT MONO		24 ²⁾ 11 ²⁾ 6 ²⁾	40 32 27	10, 100 100 100, 1000	10; 5	0,3 Wpp 50 mWpp 2 mWpp	Grundgerät für Einschübe ²⁾ Auflösung 0,2 dB
4. Photodyne, USA	5500 XF	0,83	MULT	70	17,5 ³⁾	25	20, 100	3	0,2 Wpp	³⁾ Mit «accessory scope readout»
5. Siemens, BRD	L 2225	0,85	MULT		20	30	20, 70	1	0,1 Wpp	Mittelung: 8-, 32-, 128-, 512mal
6. Felten & Guilleaume, BRD	ORM-2	0,85	MULT	80	15		20	4	$4 \cdot 10^{-9} J$	
7. RE-Instruments, Dänemark	RE 601	0,83	MULT		40	60	50	3	$\Phi \geq 15 \mu W$	«Photon counting, fast multichannel analyser»
8. ITT, England	OFR-3	~0,9	MULT		20	38	20, 100	10; 66	0,2 Wpp	
9. Anritsu, Japan	MW 98A MH 913B MH 914B MH 925B	0,85 1,3 1,3	MULT MULT MONO		22,5 13 ÷ 20 9,5 ÷ 16		100 100 ÷ 2000 100 ÷ 2000		$\geq 10 mWpp$ $\geq 2 mWpp$ $\geq 1 mWpp$	Grundgerät für Einschübe
10. Ando, Japan	AQ 1720 AQ 1721 AQ 1722 AQ 1723	0,85 1,3 1,3	MULT MULT MONO		8 ÷ 17 ⁴⁾ 6 ÷ 18 ⁴⁾ 2 ÷ 14 ⁴⁾	27 ÷ 30 20 ÷ 24 18 ÷ 22	20 ÷ 320 80 ÷ 2560 80 ÷ 2560	50 ÷ 3 50 ÷ 1,5 50 ÷ 1,5	~5 mWpp ~0,5 mWpp ~0,5 mWpp	Grundgerät für Einschübe: ⁴⁾ Mittelung 2 ⁶ ÷ 2 ¹⁶

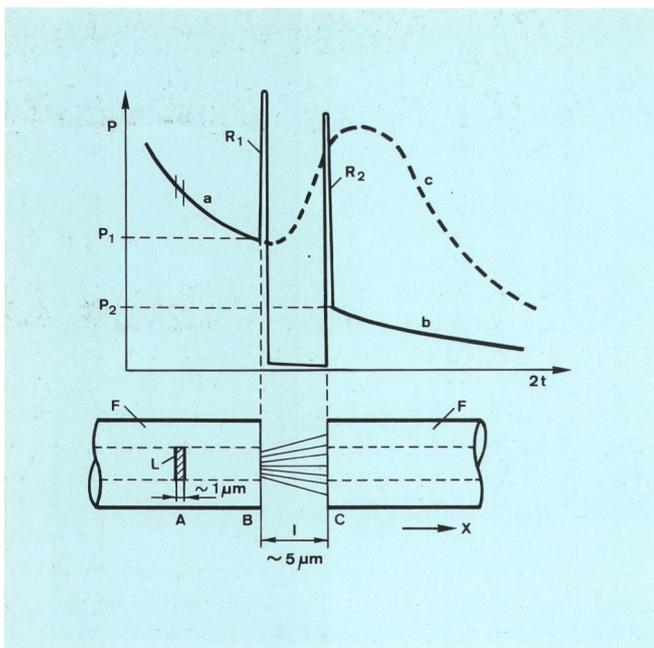


Fig. 9
Rückstreuung in einem optischen Stecker
 L Lichtimpuls
 P_1, P_2 Rückstreuleistungen am Faseranfang
 F Glasfaser (stark vergrößert)
 R_1, R_2 Reflexionen
 A, B, C Faserpunkte
 a, b, c Abschnitte der Rückstreckurve
 l Faser-Faser-Abstand im Stecker

nie). Der kurze Impuls L würde einen Faserbereich von nur etwa $1 \mu\text{m}$ bestrahlen. Bis zum Faserende (B) hätte die Rückstreckurve den Verlauf nach a. Am Ende der ersten Faser (B) erhielte man die Leistung P_1 .

Gleichzeitig würde ein Reflexionssignal R_1 entstehen. Im Bereich des Übergangs Faser-Luft-Faser (Zone B-C) würde man keine Rückstreuung registrieren können. Wegen der Steckerverluste hätte man am Anfang der zweiten Faser (C) entsprechend weniger Licht. Die Reflexion R_2 und der Anfang der Streukurve b (Leistung P_2) kämen im Falle gleicher Streueigenschaften beider Fasern tiefer zu liegen. Die Fortsetzung der Rückstreckurve würde dann nach b verlaufen. Aus den Leistungen P_1 und P_2 könnte man dann die Steckerverluste bestimmen. Um den Signalverlauf in dieser Form zu erfassen, hätte man die Impulserzeugung, Fotodetektion und Signalverarbeitung mit Bandbreiten von etwa 10^{16} Hz zu realisieren. Dies ist jedoch in der Praxis nicht zu verwirklichen.

Mit den heute zur Verfügung stehenden Geräten (Impulse $10 \dots 100$ ns, Bandbreiten etwa $50 \dots 100$ MHz) kann man Kurven aufnehmen, die ungefähr den Verlauf von c (gestrichelte Linie) haben. Jegliche Einzelheit ist hier völlig «verwaschen». Die Steckerverluste können nur durch geeignete Extrapolation ermittelt werden. In *Figur 10* sind einige typische Fälle zusammengestellt. Fall a) stellt den bereits geschilderten Verlauf einer Steckerdämpfung dar, bei dem beide Fasern gleiche Streueigenschaften haben. A_{ST} kann in diesem Falle aus der Extrapolation des Abschnittes 2 bis zum Punkt A berechnet werden. Ein Dämpfungssprung kann jedoch auch durch unterschiedliche Streuungen beider Fasern verursacht werden. Im Falle b) ist zwar keine Steckerdämpfung

vorhanden. Die Faser 2 streut jedoch stärker als die Faser 1, so dass ein «positiver» Dämpfungssprung s_1 , entsteht. Im Falle c) ist ein negativer Sprung s_2 dadurch entstanden, dass die Faser 2 weniger streut als die Faser 1. Und in d) und e) soll gezeigt werden, dass im Endeffekt durch die Kombination von Steckerverlusten A_{ST} und Erscheinungen unterschiedlicher Faserstreuung s sowohl positive als auch negative Sprünge der Rückstreckurve A_E zu erwarten sind. Man sieht also, dass es sehr schwierig, manchmal sogar unmöglich ist, eine richtige Aussage über die Verluste im Stecker selbst zu machen.

Es wird nun eine Formel abgeleitet, die allen diesen Gegebenheiten Rechnung trägt. Gemäss (1) (*Fig. 11*) gilt für das rückgestreute Signal vom Punkt A (kurz vor dem Dämpfungssprung und bezogen auf den Faseranfang):

$$P_1 = P_0 G_1 \Delta x \alpha_{s1} e^{-2\alpha_1 x_1} \quad (19)$$

Die Abschwächung der Lichtimpulse in einem Stecker oder einer Spleissung kann in Form von Transmissionen T_1 und T_2 in beiden Richtungen in Rechnung gestellt werden, wobei die Dämpfung der Störstelle A_{ST} (dB) durch

$$A_{ST1} = 10 \log \frac{1}{T_1}$$

und

$$A_{ST2} = 10 \log \frac{1}{T_2} \quad (20)$$

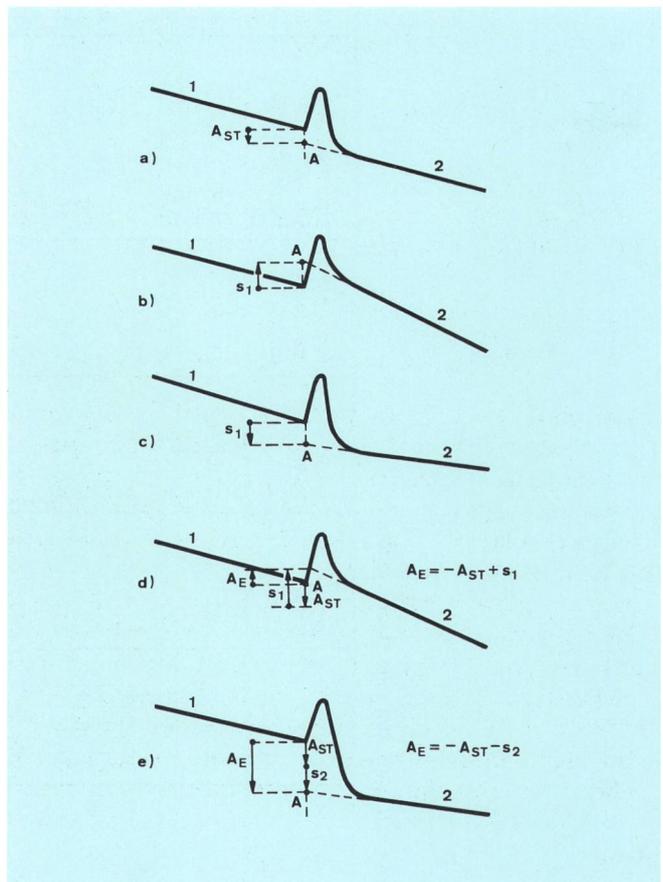


Fig. 10
Mögliche Rückstreckverläufe in einem optischen Stecker
 1, 2 Faserabschnitte
 A Extrapolierter Schnittpunkt
 A_{ST} Steckerdämpfung
 s_1, s_2 Dämpfungssprünge infolge unterschiedlicher Streuung
 A_E Resultierende Enddämpfung

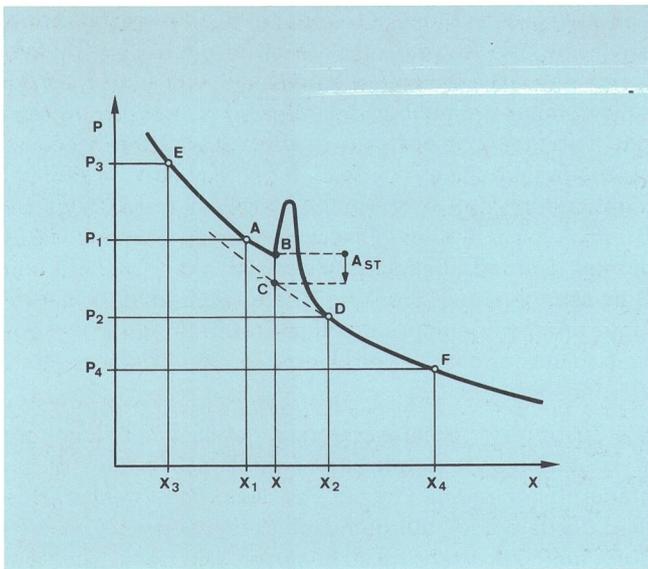


Fig. 11
Dämpfungsänderung in einem optischen Stecker
 A_{ST} Steckerdämpfung
 $x_1 \div x_4$ Messpunkte
 $P_1 \div P_4$ Rückstreuleistungen am Faseranfang
 $A \div F$ Punkte an Rückstreukurve

für beide Richtungen gegeben ist. Das Signal vom Punkt D (kurz nach dem Dämpfungssprung) hat folgende Grösse:

$$P_2 = P_0 G_2 T_1 T_2 \Delta x \alpha_{s2} e^{-2\alpha_1 x - 2\alpha_2 (x_2 - x)} \quad (21)$$

Aus (19), (20) und (21) erhält man nach Umformung:

$$10 \log \frac{P_1}{P_2} = 10 \log \frac{G_1 \alpha_{s1}}{G_2 \alpha_{s2}} + 10 \log \frac{e^{-2\alpha_1 x_1}}{e^{-2\alpha_1 x - 2\alpha_2 (x_2 - x)}} + A_{ST1} + A_{ST2} \quad (22)$$

Man kann nun die mittlere Dämpfung eines Steckers oder einer Spleissung (zwischen B und C) als

$$A_{ST} = \frac{A_{ST1} + A_{ST2}}{2} = 5 \log \frac{P_1}{P_2} - 5 \log \frac{G_2 \alpha_{s2}}{G_1 \alpha_{s1}} - [10\alpha_2(x_2 - x) \log e + 10\alpha_1(x - x_1) \log e] \quad (23)$$

definieren. Der erste Term stellt die gesamte Dämpfung des Abschnitts $x_1 \dots x_2$ dar, der zweite berücksichtigt die Streueigenschaften beider Fasern, und der dritte (in Klammern) enthält die Summe der Einzeldämpfungen der extrapolierten Faserabschnitte AB und CD im Messpunkt x (ohne Dämpfungssprung). Je nach Streuung und Numerischer Apertur beider Fasern kann das zweite Glied positiv oder negativ sein und dadurch negative oder positive Dämpfungssprünge verursachen. Die Exkoeffizienten α_1 und α_2 sind meistens unbekannt. Der Ausdruck $10 \alpha \log e$ stellt jedoch gemäss (7) den Dämpfungskoeffizienten a (dB/km) dar. Er kann mit Hilfe von zwei zusätzlich gemessenen Lichtleistungen P_3 und P_4 in den Messpunkten x_3 und x_4 leicht ermittelt werden:

$$\alpha_{z1} = \frac{5 \log \frac{P_3}{P_1}}{x_1 - x_3} \quad \alpha_{z2} = \frac{5 \log \frac{P_2}{P_4}}{x_4 - x_2} \quad (24)$$

Die Beziehung (23) nimmt schliesslich folgende definitive Form an:

$$A_{ST} = 5 \log \frac{P_1}{P_2} - 5 \log \frac{G_2 \alpha_{s2}}{G_1 \alpha_{s1}} - \left[\frac{5 \log \frac{P_2}{P_4}}{x_4 - x_2} (x_2 - x) + \frac{5 \log \frac{P_3}{P_1}}{x_1 - x_3} (x - x_1) \right] = 5 \log \frac{P_1}{P_2} - 5 \log \frac{G_2 \alpha_{s2}}{G_1 \alpha_{s1}} - A_F \quad (25)$$

wobei A_F den Ausdruck in Klammern darstellt. Der zweite Term wird zu Null, falls beide Fasern die gleichen Eigenschaften besitzen. Nur unter diesen Umständen ist die genaue Ermittlung der Spleiss- oder Steckerdämpfung von einem Faserende aus möglich. Nach Einstellung der gewünschten Punkte x_1 bis x_4 wird die Berechnung der Dämpfung A_{ST} , wie in 81 erwähnt, völlig automatisch ablaufen. Besitzen jedoch beide Fasern unterschiedliche Eigenschaften, ist die genaue Bestimmung der Spleiss- oder Steckerdämpfung von einem Faserende aus völlig unmöglich, weil die Koeffizienten G_1 , G_2 , α_{s1} und α_{s2} unbekannt sind oder nur sehr ungenau vorliegen.

Wenn die Messung jedoch nacheinander von beiden Faserenden aus durchgeführt werden kann, braucht man diese Koeffizienten nicht zu kennen. Man erhält dann folgendes Gleichungssystem:

$$A_{ST} = 5 \log \frac{P_1}{P_2} - 5 \log \frac{G_2 \alpha_{s2}}{G_1 \alpha_{s1}} - A_F \quad (26)$$

$$\overline{A_{ST}} = 5 \log \frac{\overline{P_1}}{\overline{P_2}} - 5 \log \frac{G_1 \alpha_{s1}}{G_2 \alpha_{s2}} - A_F \quad (27)$$

wobei die mit einem Strich ($\overline{\quad}$) versehenen Werte von der Gegenseite her gemessen werden. Durch Addition beider Gleichungen erhält man die mittlere Dämpfung A_{STM} :

$$A_{STM} = \frac{A_{ST} + \overline{A_{ST}}}{2} = 2,5 \log \left(\frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{\overline{P_1}}{\overline{P_2}} \right) - A_F \quad (28)$$

Die Subtraktion dagegen ergibt:

$$\frac{G_1 \alpha_{s1}}{G_2 \alpha_{s2}} = \sqrt{\frac{P_1 \overline{P_2}}{P_2 \overline{P_1}}} \quad (29)$$

Die Spleiss- oder Steckerdämpfung kann somit nach (28) mit zwei Messungen ohne Kenntnis von α_s und G ermittelt werden. Ausserdem kann aus (29) das Verhältnis der Rückstreueigenschaften beider Fasern bestimmt werden.

83 Optimierung von Spleissungen und Stecker

Die Rückstreukurve kann zum optimalen Ausrichten zweier lichtführender Faserkerne herangezogen werden. Man braucht nur den Kurventeil hinter dem Faser-Faser-Übergang auf maximalen Wert zu justieren. Im Feldeinsatz, wo der Rückstreumessplatz von der Spleissstelle weit entfernt liegt, kann über eine Hilfsleitung ein der Kurvenhöhe proportionales Signal zur Spleissstelle zurückgeführt werden. Dieses kann der Optimierung dienen.

84 Lokalisierung von Streckenunterbrüchen

Ein Streckenunterbruch ist durch einen plötzlichen Abfall der Rückstreu­kurve und oft auch durch zusätzliche Reflexionen charakterisiert. Die Position der Stör­stelle kann gemäss (14) durch Laufzeitmessung ermittelt werden. Um eine möglichst gute örtliche Auflösung zu erreichen, verwendet man hierfür kürzeste Impulse, was jedoch an der Dynamik der Messeinrichtung verloren­geht. Weiter entfernte Störstellen sind dadurch schwieriger zu lokalisieren. Starke Reflexionen, falls sie eine Stör­stelle begleiten, sind deshalb eine willkommene Erscheinung. Der Fall, dass eine Faserbruch­stelle gar keine Reflexionen aufweist, wird in der Praxis glücklicherweise eher selten beobachtet.

Das von einer Bruch­stelle reflektierte Licht hat eine wesentlich stärkere Intensität als das Streulicht vom gleichen Messpunkt. Analog der Rückstreu­gleichung (16) ergibt sich für die Reflexions­dämpfung A_R (dB) folgende Beziehung:

$$A_R = -10 \log \frac{P_r}{P_o} = -10 \log R + 2\alpha \cdot 10 \log e \quad (30)$$

P_r (W) ist die zum Faseranfang zurückreflektierte Lichtleistung, R der Reflexionsfaktor der Stör­stelle. Für eine normale gute Bruch­fläche beträgt die Fresnel-Reflexion etwa 4 %. Die Reflexions­dämpfung A_R ist deshalb, verglichen mit (16), um 20...30 dB kleiner. Hier ist der Grund zu sehen, weshalb z. B. die Reflexionen von Faserenden oder Steckern immer sehr gut zu identifizieren sind. Man sieht auch in Tabelle II, dass die «messbare Einweg-Fresnel-Reflexion» um mehr als 20 dB höher liegt als die entsprechende «messbare Einwegstreu­dämpfung».

Die Genauigkeit der Ortsbestimmung ist, wie in Abschnitt 5 erwähnt, von der Genauigkeit der Gruppen­brechzahl n_g bzw. n_{eff} abhängig. Zusätzlich muss man den Umstand berücksichtigen, dass die optischen Kabel bei gleicher Laufzeit etwas kürzer sind als die Faserlänge, da in ihnen die Fasern verseilt sind. Die nicht ummantelten Fasern in Schutzröhrchen weisen ähnliche Effekte auf.

9 Schlussbemerkungen

In diesem Aufsatz ist der Stand der heutigen Technik auf dem Gebiet der Rückstreu­Dämpfungsmessungen aufgezeigt. Ein Rückstremessplatz hat sich bereits als

unentbehrliches Messinstrument in der Glasfasertechnik erwiesen. Die mit seiner Hilfe ermittelten Dämpfungswerte einer Glasfaserstrecke weisen zwar eine gewisse Abweichung gegenüber den Werten gemessen im Modengleichgewicht auf. Auf der anderen Seite ist diese Methode jedoch sehr einfach in der Anwendung und erlaubt zudem, den «gesamten Überblick» über die ganze Strecke von nur einem Faserende aus zu gewinnen. Gesamter Dämpfungsablauf einer Strecke, Qualität von Spleissungen und Stecker, Unstetigkeiten der Fasern, Unterbrüche in entsprechenden Entfernungen usw. können leicht erfasst, kontrolliert und gut dokumentiert werden.

Die Zukunft der Glasfasertechnik gehört zweifellos dem zweiten und dritten optischen Fenster sowie dem immer stärker werdenden Einsatz der Monomodetechnik. Es sind deshalb auch auf dem Gebiet der Messtechnik entsprechende Fortschritte zu erwarten. Die Rückstremessung wird dabei mit Sicherheit ihren festen Platz auch weiterhin beibehalten. Neue, effizientere Laser- und Fotodioden werden den dynamischen Bereich erweitern, und der Einsatz von Mikrorechnern erlaubt eine komfortable Gerätebedienung mit zahlreichen automatisch ausgeführten Rechenoperationen. Die Überbrückung des gesamten Abschnittes zwischen den Verstärkern, in Zukunft 40...60 km, stellt ein grosses, wünschenswertes Ziel dar.

Bibliographie

- [1] Characteristics of 50/125 μm multimode graded index optical fibre cables. CCITT Recommendation G.651. Revised version. Geneva, May 1984.
- [2] Novák R. Präzise feldtaugliche Methode und Apparatur für die Dämpfungsmessungen an PTT-Glasfaseranlagen. NTG-Fachberichte, Berlin 75 (1980), S. 108.
- [3] Novák R. Dämpfungsmessungen an Glasfaserkabeln. Elektroniker, Aarau 20 (1981) 4.
- [4] Danielson B. L. Backscatter Measurements on Optical Fibres. National Bureau of Standards, Technical Note 1034. Boulder, Colorado (1981).
- [5] Kersten R. T. Einführung in die Optische Nachrichtentechnik. Berlin (1983), S. 190.
- [6] Schicketanz D. Theorie der Rückstreuung bei Glasfasern. Siemens Forschungs- und Entwicklungsberichte, Berlin 9 (1980) 4.
- [7] Schicketanz D. Anwendung des Rückstremessplatzes in der Lichtwellentechnik. Siemens Forschungs- und Entwicklungsberichte, Berlin 10 (1981) 1.