

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

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 61 (1983)

Heft: 8

Artikel: Messung der Übertragungsbandbreite von Glasfasern

Autor: Steffen, Werner Anton / Kotyczka, Willi

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-875711>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 12.01.2026

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

Messung der Übertragungsbandbreite von Glasfasern

Werner Anton STEFFEN, Bern/Neuenburg, und Willi KOTYCZKA, Jona

Zusammenfassung. Die Autoren befassen sich mit dem komplexen Gebiet der Messung der Übertragungsbandbreite von Glasfasern. Ausgehend von den glasfaserspezifischen Problemen und den Anforderungen der praktischen Messtechnik, werden der hard- und der softwaremässige Aufbau eines feldtauglichen optischen Wobbelmessplatzes hoher Dynamik beschrieben. In einem besonderen Kapitel werden die damit an der Glasfaserkabelanlage Altdorf—Erstfeld durchgeführten Messungen kommentiert.

Mesure de la largeur de bande de transmission des fibres optiques.

Résumé. Les auteurs abordent le domaine complexe de la mesure de la largeur de bande de transmission des fibres optiques. En partant des problèmes spécifiques des fibres optiques et des exigences des techniques de mesure pratiques, ils décrivent la construction, tant du point de vue du matériel que de celui du logiciel, d'une place de mesure optique avec wobulateur à dynamique élevée, utilisable en campagne. Les mesures exécutées avec cet appareil sur l'installation de câble à fibres optiques Altdorf—Erstfeld sont commentées dans un chapitre particulier.

Misurazione della larghezza di banda di trasmissione delle fibre ottiche

Riassunto. Gli autori trattano la complessa materia della misurazione della larghezza di banda di trasmissione delle fibre ottiche. Partendo dai problemi specifici alle fibre ottiche e dalle esigenze delle tecniche di misurazione pratiche, essi descrivono la struttura hardware e software di un posto di misurazione ottico con wobulatore di alta dinamica, utilizzabile in campo. In un capitolo speciale essi illustrano le misurazioni eseguite con questo sistema all'impianto di cavi in fibra ottica Altdorf—Erstfeld.

1 Einleitung

Die Messung der Übertragungsbandbreite von Glasfasern ist aus verschiedenen Gründen von grundlegender Bedeutung. Die experimentellen Untersuchungen an praktischen Glasfaseranlagen, die Kontrollmessungen der Glasfaserfabrikanten und die Erfahrungswerte der Systemingenieure müssen durch die ausschlaggebende Bedeutung des Preis/Leistung-Verhältnisses der heutigen Glasfasern ergänzt werden.

Es werden Messmethoden benötigt, die gleichzeitig praktisch und zuverlässig sind. Diese Zielsetzung, die der besprochenen Feldmessenanlage zugrunde gelegt wurde, ist ergänzt durch die zwei Forderungen, mit der gleichen Grundmessenanlage bei verschiedenen optischen Wellenlängen messen zu können und über einen hohen Messdynamikbereich zu verfügen. In der nachfolgend beschriebenen ersten Ausführung des Messplatzes können Streckendämpfungen bis zu mehr als 60 dB im ersten Glasfaserdurchlass-«Fenster» überprüft werden.

Bei der genauen Messung der Übertragungseigenschaften von Glasfasern tauchen grundlegende Probleme auf, die darin begründet sind, dass die einzelnen Ausbreitungsmoden (Ausbreitungswellen) in der Multimodefaser (Mehrwellenfaser) individuellen Verlust- und Verzögerungsmechanismen unterworfen sind. Überdies kann auf dem gesamten Ausbreitungsweg Energie von einem Mode auf einen anderen transferiert werden (mode coupling).

Dieser ständige Energietransfer zwischen den Moden wird durch Fehler im Faseraufbau und in der Fasergeometrie hervorgerufen. In guten Fasern wird dieser Transfer und damit die Modekopplung primär durch Mikrokrümmungen (microbending) verursacht. Dazu kommen die Einflüsse der Stecker und der Spleissungen.

Die Konsequenzen dieses nicht voraussagbaren Verhaltens der Ausbreitungsmoden lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Dämpfung und die Übertragungsbandbreite der Multimodefasern hängen von den Anregungsbedingungen der Moden am Faseranfang und von äusseren Einflüssen ab (Verkabelung, Mikrokrümmungen, Stecker, Spleissungen usw.).
- Die Dämpfung und die Übertragungsbandbreite der Multimodefasern sind nicht linear von der Faserlänge abhängig, Extrapolationen der Messdaten auf grössere bzw. kleinere Längen sind sehr vorsichtig anzuwenden.

Abhängig von der Intensität der Modekopplung entsteht nach einer bestimmten Faserlänge eine Art Gleichgewichtszustand zwischen den Ausbreitungsmoden. Da sich ab dieser Länge die Energieverteilung zwischen den Moden kaum mehr verändert, erhält man wohldefinierte Werte für die Faserdämpfung. Die Messung der Faserdämpfung im Gleichgewichtszustand scheint vielversprechend zu sein. Am einfachsten simuliert man diesen Zustand, indem Testfaser und Quelle mit einer langen Hilfsfaser, dem Faservorspann (dummy fibre), verbunden werden.

Obwohl man mit guten Fasern auf diese Weise auch gute Resultate erhalten hat, sind die Verhältnisse für die Übertragungsbandbreite weniger ideal.

Ähnlich wie bei Dämpfungsmessungen ist es auch bei Bandbreitenmessungen wichtig, die Moden so anzuregen, dass die stationäre Leistungsverteilung angenähert wird. Andernfalls könnte sich die gemessene Form der Übertragungsfunktion deutlich ändern, wenn beispielsweise Moden mit weit vom Durchschnitt abweichender Ausbreitungsgeschwindigkeit bevorzugt angeregt würden. Im Gegensatz zur Dämpfungsmessung spielt dabei aber auch die zeitliche Verteilung der Lichtleistung über die Moden eine Rolle, die durch Modenmischeffekte beeinflusst wird und bewirkt, dass die Bandbreite von Fasern unter 1...2 km Länge linear mit der Faserlänge abnimmt, bei sehr langen Fasern aber nur mit der Wurzel

aus der Faserlänge. Die dabei wirksamen komplizierten Vorgänge erschweren es, aus Bandbreitenmessungen an kurzen Fasern die Bandbreite langer, womöglich aus unterschiedlichen Teilstücken zusammengesetzter Fasern vorherzusagen.

Bei praktischen Arbeiten muss dieser Tatsache insofern Rechnung getragen werden, als für gewisse Anwendungen die Angabe des sonst üblichen 3-dB-Punktes nicht mehr genügt, weil die optische Dämpfung nicht immer kontinuierlich mit der Frequenz abnimmt. Der Bereich bis zum 3-dB-Punkt kann bei den heute üblichen Fasern eine nicht zu vernachlässigende Welligkeit aufweisen. Bei der Verwendung von Wobbelmessplätzen (Messung der Übertragungsbandbreite als Funktion der Frequenz) erhält man diese Information direkt aus dem Verlauf der Übertragungsfunktion.

Allerdings braucht die Bandbreite bei Digital-Übertragungsstrecken nur näherungsweise bekannt zu sein, denn entscheidend ist bei ihnen nur, dass am Empfangsort ein Augendiagramm mit ausreichender Augenöffnung entsteht. Ein solches Diagramm stellt die Überlagerung der zeitlichen Signalverläufe für alle vorkommenden Eins-Null-Eins-Folgen dar und lässt erkennen, wie gut die beiden Signalstufen im ungünstigsten Fall noch unterschieden werden können.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Möglichkeiten für die Messung des Frequenzganges dargestellt und der verwirklichte Messplatz näher beschrieben.

2 Messmethoden

Viele aus der Literatur bekannte Pulsverbreitungsmechanismen, wie Modendispersion, Material- und Wellenleiterdispersion, beeinflussen das Impulsübertragungsverhalten von Glasfasern. Auch externe Faktoren, wie Wellenlänge und Ankopplung der Messquelle an die Messfaser, können das Übertragungsverhalten wesentlich beeinflussen. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, müssen daher die Messbedingungen sehr sorgfältig festgehalten werden.

Die Messung der Übertragungsbandbreite einer Glasfaser geschieht grundsätzlich entweder im Zeitbereich oder im Frequenzbereich. Man geht dabei von der Hypothese des leistungsinvarianten Übertragungsverhaltens aus, das heisst, man nimmt an, das Übertragungsverhalten sei unabhängig von der eingespeisten optischen Leistung. Zur Messung der Faserbandbreite im Zeitbereich speist man am Faseranfang einen kurzen Lichtimpuls ein, der am Faserende verbreitert erscheint. Die physikalischen Ursachen dafür sind Laufzeitunterschiede zwischen den in den verschiedenen Moden der Faser geführten Teillichtimpulsen sowie die Verbreiterungen der Teillichtimpulse selbst, vorwiegend durch Materialdispersion. Um diesen Vorgang zu messen, verwendet man intensive Laserimpulse sehr kurzer Dauer (etwa 0,1 ns). Der Impuls am Faserende hat dann je nach Bandbreite der Faser eine Dauer von weniger als einer bis zu mehreren Nanosekunden. Seine Gestalt ist bei Gradientenfasern glockenförmig, ähnlich einem Gauss-Impuls, aber meist etwas schief und bei Fasern mit mangelhaftem Aufbau mit überlagerten Verzerrungen.

Es hat sich eingebürgert, die durch eine bestimmte Faserlänge hervorgerufene Impulsverlängerung (in ns)

durch die Faserlänge (in km) zu dividieren. Wie schon angetönt, besteht hingegen nur unter bestimmten Voraussetzungen eine lineare Abhängigkeit zwischen Faserlänge und Impulsverlängerung, so dass eine Spezifikation, z. B. 3 ns/km, sehr sorgfältig interpretiert werden muss.

Für theoretische Untersuchungen an Empfängern eignet sich die Darstellung der Faserbandbreite im Frequenzbereich besser als die entsprechende Darstellung im Zeitbereich. Durch mathematische Auswertung der vorhin beschriebenen Fasereingangs- und -ausgangsimpulse erhält man die Faserbandbreite im Frequenzbereich. Umwandlungs- und Rechenfehler beeinträchtigen jedoch die Genauigkeit dieser Methode. Der nicht zu unterschätzende Material- und Softwareaufwand dieser Methode erschwert den Aufbau einer einfachen, feldtauglichen Anlage zur Messung der Faserbandbreite im Zeitbereich. Da für die Messung im Frequenzbereich hingegen die erforderlichen Instrumente kommerziell erhältlich sind und eine feldtaugliche Anlage benötigt wurde, wird nachfolgend nicht mehr näher auf die Messung im Zeitbereich eingegangen.

Der wichtigste Vertreter der Messungen im Frequenzbereich ist die Wobbelmethode (Fig. 1). Die Lichtleistung des Lasersenders (elektrooptischer Konverter E/O) wird sinusförmig mit einer Frequenz moduliert, die von der tiefsten bis zur höchsten interessierenden Signalfrequenz (z. B. 0,01...1 GHz) langsam erhöht wird. Die Modulationsamplitude soll dabei möglichst bei allen Frequenzen gleich gross sein. Das Verhältnis der Signalamplituden am Eingang und am Ausgang, Übertragungsfunktion der Faser genannt, verhält sich bei typischen Fasern (siehe z. B. Fig. 10) ähnlich wie bei einem Gauss-Tiefpass. Die Frequenz f , bei der diese Funktion auf die Hälfte des Wertes bei $f=0$ Hz abgefallen ist, nennt man die Bandbreite B der Faser. Die in Figur 10 dargestellte Faser hat somit eine Bandbreite von 210 MHz.

Auf der Empfängerseite (optoelektrischer Konverter O/E) wird das Licht aus dem Faserende einer Avalanche-Fotodiode (APD) zugeführt, die mit einer 50-Ohm-Impedanz belastet ist. Die Spannung über die 50-Ohm-Impedanz wird mit einem rauscharmen, breitbandigen Verstärker verstärkt und dem elektrischen Leistungsmessgerät zugeführt. Vor einer eigentlichen Bandbreitenmessung werden Sender- und Empfängerteil zusammengebracht, um den «Eigenfrequenzgang» festzuhalten. Zu diesem Zweck verbindet man den Ausgang des

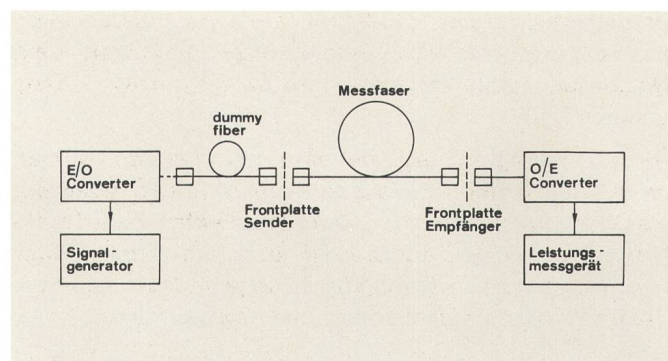


Fig. 1
Messplatz mit Messgerät für die elektrische Leistung

Faservorspanns direkt mit der APD. Während dieser Kalibrierung werden der Laserstrom, der APD-Arbeitspunkt und die nachfolgende Verstärkung so eingestellt, dass die gemessene Leistung über das ganze Frequenzband möglichst gross ist. Nach der Kalibrierung werden Sender- und Empfängerteil getrennt, die zu messende Glasfaser dazwischengeschaltet und die Messung durchgeführt.

3 Theoretische Grundlagen

Die maximal messbare Dämpfung bei einer bestimmten Modulationsfrequenz ω wird in erster Linie durch die Empfindlichkeit und die Dynamik des Detektors bestimmt.

Für die Detektion von optischen Signalen können im Prinzip pin-Fotodioden oder Avalanche-Fotodioden (APD) eingesetzt werden. Wegen der grossen Bandbreite und der gewünschten hohen Empfindlichkeit kommt jedoch nur die APD als detektierendes Element in Frage. Für die theoretische Bestimmung der maximal messbaren Dämpfung beziehungsweise der maximalen Empfindlichkeit bei einem Wobbelbereich von 800 MHz wird nachfolgend der Rauschabstand der Empfänger-schaltung theoretisch untersucht und entsprechend optimiert.

31 Rauschabstand und Multiplikationsfaktor

Durch die Sinusmodulation des Laserstroms erzeugen die auffallenden Photonen in der APD den primären Fotostrom $i_{ph}(t)$, der intern mit dem Multiplikationsfaktor M verstärkt wird.

$$i_{ph}(t) = i_{ph0} (1 + m \sin \omega t)$$

wobei

$$i_{ph0} = \frac{e \eta}{h \nu} P_d$$

Der Rauschabstand im Detektor, definiert als das Verhältnis der mittleren Quadrate des Signalstroms zum Rauschstrom (S/N: signal-to-noise ratio), beträgt

$$\frac{S}{N} = \frac{1}{2} \left[\frac{m^2 \bar{M}^2 i_{ph0}^2}{i_v^2 \Delta f + 2e \cdot (i_{ph0} + i_D) \cdot \bar{M}^2 \cdot F \cdot \Delta f} \right] [1, 2]$$

dabei sind:

- m Modulationsindex des Lichtes
- ω Kreisfrequenz (Modulationsfrequenz)
- e Elektronenladung
- η Quantenwirkungsgrad der APD
- h Plancksche Konstante
- ν optische Frequenz
- P_d mittlere detektierte Lichtleistung
- i_v^2 mittleres Rauschstromquadrat des nachfolgenden Verstärkers inkl. thermisches Rauschen der APD-Last
- i_D Dunkelstrom der APD
- Δf Rauschbandbreite
- F Rauschfaktor der APD

Die Existenz eines optimalen Wertes von M kann unter Zuhilfenahme der Formel für S/N bewiesen werden. Für

$M=1$ und für sehr schwache optische Signale (i_{ph} sehr klein) dominiert das Verstärkerrauschen. Wird nun durch die Änderung der Klemmenspannung an der APD der Faktor M vergrössert, so nimmt der Rauschabstand S/N zunächst mit \bar{M}^2 zu. Mit weiter zunehmendem M wird der rechte Term im Nenner des Ausdruckes für S/N (Schottrauschen) zunehmen und mit dem linken Term (Verstärkerrauschen) vergleichbar werden. Wird nun M weiter erhöht, fällt das Verstärkerrauschen gegenüber dem Schottrauschen des Fotostromes weniger ins Gewicht, und S/N sinkt proportional zu $1/f$. Für einen gewissen Wert von M existiert also ein maximales S/N-Verhältnis.

Die Detektorschaltung besteht grundsätzlich aus der Avalanche-Diode in einem Mikrowellengehäuse, der 50-Ohm-Lastimpedanz und einem breitbandigen Verstärker, der das Signal verstärkt zum Spektrumanalyzer führt. Unter der Annahme, dass der Verstärker eine Rauschzahl (noise figure) von etwa 7 dB hat, lässt sich der Rauschstrom i_v (linker Term im Nenner der Formel für S/N) bestimmen [3].

$$\frac{i_v^2}{(\Delta f)} = \frac{(F_{opt}-1)}{R_s} 2 \cdot k \cdot T = 7 \cdot 10^{-22} [A^2/Hz]$$

Unter den Annahmen

$i_D = 5$ nA (BPW 28 AEG, Wert aus Herstellerangaben entsprechend $M=100$)

$F = \bar{M}^x$, $x \approx 1$ (mittlerer Wert aus Literaturangaben für Si APD's)

$\eta = 0,57$ (Herstellerangaben für $\lambda = 0,82 \mu m$ BPW 28 AEG)

$i_{ph0} = 3,8$ nA für $P_d = 10^{-8}$ W mittlere detektierte Leistung

P_f = am Fasereingang eingekoppelte mittlere Strahlungsleistung = 1 mW

α_{tot} = erwartete totale Faserdämpfung inklusive Kopplungsverluste = 50 dB ($P_d = P_f \cdot 10^{-5}$)

wird der Rauschstrom i_n infolge des Detektionsprozesses (rechter Term im Nenner der Formel für S/N)

$$i_n^2 = 2,8 \cdot 10^{-27} [A^2/Hz]$$

Mit Hilfe einer grafischen Darstellung lässt sich aus der Signalleistung (Zählerausdruck in der Formel für S/N) und dem Rauschstrom ($i_v^2 + i_n^2$) ein optimaler Multiplikationsfaktor bestimmen. Mit vorstehenden Annahmen ergibt die grafische Auswertung ein M_{opt} von 65.

Massgebend für die Bestimmung des M_{opt} sind das Verstärkerrauschen und die APD-Eigenschaften. Da diese Parameter in kommerziellen Produkten stark streuen, wird der optimale Wert von M je nach APD-Typ und Verstärkerkonfiguration auch streuen. Die Bestimmung von M_{opt} nach der erwähnten Methode kann jedoch für jede APD-Verstärkerkombination durchgeführt werden. Mit diesen Zahlen kann nun der Rauschabstand bestimmt werden, vorausgesetzt, dass die effektive Rauschbandbreite des Systems bekannt ist. In erster Näherung kann man die Rauschbandbreite etwa gleich der Messbandbreite des nachfolgenden Leistungsmessgerätes setzen. Wie die Formel für S/N zeigt, ist der Rauschabstand umgekehrt proportional zur Rauschbandbreite. Die Wahl einer kleinen Messbandbreite wird das S/N-Ver-

hältnis günstig beeinflussen. Die Messbandbreite sollte jedoch nicht allzu klein gewählt werden, sonst besteht die Gefahr, dass während einer Messung aus Stabilitätsgründen das Ergebnis verfälscht wird. Als Kompromiss wird daher eine Messbandbreite von 1 kHz gewählt.

Mit einem Modulationsgrad von $m=0,5$ und einem optimalen Multiplikationsfaktor $M_{opt}=65$ resultiert für 10 nW ($P_d=10^{-8}$ W) detektierte Leistung bei einer Bandbreite von 1 kHz ein Signal/Rausch-Verhältnis

$$S/N = 37 \text{ dB}$$

Wird für die untere Detektionsgrenze aus Gründen der Detektions- und der Messsicherheit ein Rauschabstand von $S/N=10$ dB zugrunde gelegt, so lässt sich die zu detektierende mittlere optische Leistung mit etwa 0,4 nW berechnen. Unter der konservativen Annahme, dass die mittlere vom Laser in die Faser eingekoppelte Leistung 1 mW beträgt, ergibt sich eine total messbare Faserdämpfung (einschliesslich Kopplungsverluste) von ungefähr 64 dB! Diese sehr beachtliche Dynamik der Messanlage kann durch folgende Massnahmen noch erweitert werden:

- höhere Laserleistung
- grösserer Modulationsgrad
- besseres S/N-Verhältnis
- kleinere Messbandbreite

4 Messaufbauten

Zur Messung der Dämpfung nach der Wobbelmethode können verschiedene mehr oder weniger aufwendige Messplätze aufgebaut werden. In diesem Kapitel sollen ein Messaufbau mit Spektrumanalyzer kurz erläutert und eine computergesteuerte Messanlage eingehend behandelt werden. Bei allen Messanordnungen können die gleichen Sender und Empfänger verwendet werden. Es ist zudem jederzeit möglich, Sender und Empfänger für bestimmte Betriebswellenlängen einzusetzen. Lediglich der Signalgenerator, das Leistungsmessgerät und die Kommunikation (Steuerung) zwischen den beiden Geräten unterscheiden sich in den verschiedenen Aufbauten.

41 Sender

Der Sender hat die Aufgabe, die elektrischen Signale der Signalquelle möglichst verzerrungsarm in optische Signale umzuwandeln. Für Bandbreitenmessungen bei Frequenzen bis 1 GHz kommen als Senderelemente nur Laserdioden in Frage.

Figur 2 zeigt die DC-Lichtstromkennlinie einer Laserdiode vom Typ *Hitachi CSP*. Die Kennlinie weist für Diodenströme oberhalb des Laser-Schwellstromes I_{th} eine gute Linearität auf. Da die Lichtspannungskennlinie nicht linear ist, müssen für eine lineare elektrooptische Umwandlung die Laserdiode von einem Stromgenerator gesteuert und der Arbeitspunkt auf der Kennlinie oberhalb der Laserschwelle angesetzt werden.

Die einfachste und in der Praxis am meisten verwendete Methode für die Stromsteuerung besteht darin, die Laserdiode in Serie mit einem Widerstand von etwa 47 Ohm zu schalten und mit einem 50-Ohm-Signalgene-

rator zu modulieren. Da die Laserdioden in vielen Fällen interne Impedanzen von 2...4 Ohm besitzen, wird mit dieser Anordnung die Stromsteuerung ziemlich gut verwirklicht. Diese Methode funktioniert allerdings nicht für Laserdioden mit höherer Impedanz, wie Buried-heterostructure-Typen, die Impedanzen von etwa 10...20 Ohm aufweisen können.

Als Sender wurde für die Messungen eine bei den Schweizerischen PTT-Betrieben entwickelte Schaltung mit einer optisch und thermisch stabilisierten Laserdiode verwendet.

42 Empfänger

Der Empfänger hat die Aufgabe, das Lichtsignal vom Ende der Glasfaser in ein messbares elektrisches Signal umzuwandeln. Der elektrooptische Wandler muss die nötige Bandbreite, Linearität, Dynamik und Empfindlichkeit aufweisen und in einem geeigneten mechanischen Aufbau positioniert werden können.

Wie bereits bei den theoretischen Grundlagen erwähnt, fiel die Wahl für das Detektorelement auf eine Silizium-Avalanche-Fotodiode (APD), weil diese die Vorteile der grossen Empfindlichkeit (hoher Quantenwirkungsgrad bei der Wellenlänge des einfallenden Lichtes 0,8...0,9 μm), der guten Linearität und der relativ rauscharmen internen Signalverstärkung bis zu einigen Gigahertz vereinigt.

Für den Empfänger wurde eine in einem Mikrowellengehäuse eingebaute Avalanche-Fotodiode vom Typ BPW 28 AEG verwendet. Messungen im Labor zeigen, dass die erforderliche Messempfindlichkeit für die Einhaltung der festgelegten Spezifikationen nur mit einem nachfol-

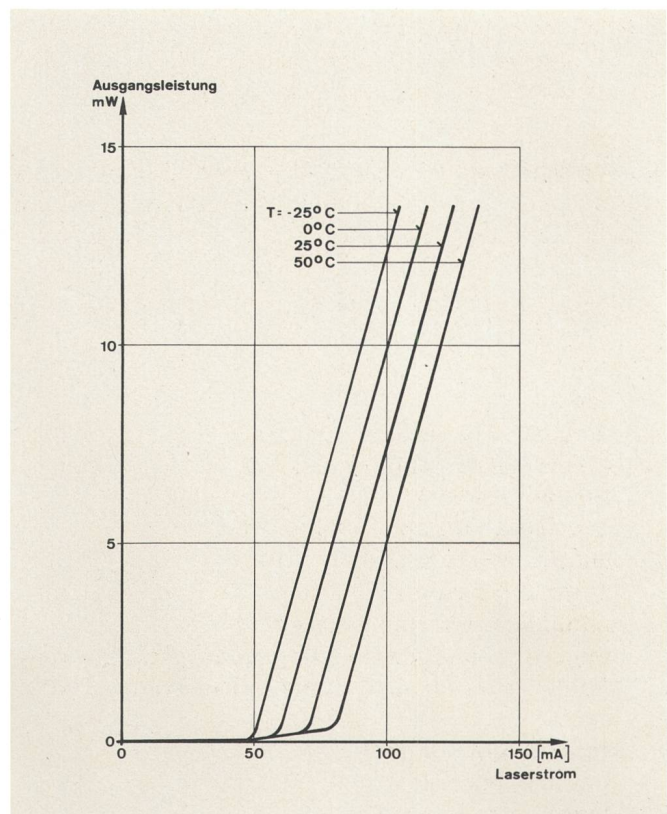


Fig. 2
Typisches DC-Lichtstrom-Kennlinienfeld eines Hitachi-CSP-Lasers für verschiedene Gehäusetemperaturen

genden Breitbandverstärker erreicht werden kann. Der Empfänger besteht somit aus einer Avalanche-Fotodiode und einem nachfolgenden Breitbandverstärker (etwa 30 dB Verstärkung bis 1,5 GHz).

43 Messaufbau mit selektivem Messgerät

Bei diesem Messaufbau wird anstelle des Leistungsmessgerätes ein selektives Messgerät verwendet. Im Gegensatz zum Leistungsmessgerät, das breitbandig misst, werden die störenden Fremdfrequenzanteile mit dem selektiven Messgerät eliminiert. Für den Frequenzbereich von etwa 1 MHz...1 GHz sind bis jetzt keine geeigneten selektiven Voltmeter auf dem Markt erhältlich. Es kommen also nur Vektorvoltmeter, Netzwerk- und Spektrumanalyzer in Frage, wobei das letztere Gerät in bezug auf Bedienung und Komfort Vorteile bietet. Die Messungen mit dem Netzwerk- oder Spektrumanalyzer erfolgen im Prinzip gleich wie mit dem Leistungsmessgerät. Das System wird kalibriert, indem in einem ersten Schritt die Signalgeneratoramplituden bei bestimmten festen Frequenzen so eingestellt werden, dass alle diskreten Linien auf dem Spektrumanalyzer, die den programmierten Frequenzen entsprechen, gleiche Höhen aufweisen. Im zweiten Schritt, nach Einschaltung der Messfaser, erscheinen auf dem Spektrumanalyzer diskrete Linien, deren Amplituden infolge von Dämpfung und Dispersion des Prüflings abgenommen haben. Die Frequenzcharakteristik kann somit direkt abgelesen werden. Selbstverständlich muss in der Praxis die zeitliche Programmierung der verschiedenen Frequenzen so erfolgen, dass auf der Empfängerseite Gewissheit über die gerade zu messende Frequenz besteht.

Die beschriebene Messanlage arbeitet bei festen, diskreten Frequenzen und hat somit den Nachteil, dass Einflüsse, die zwischen den festgelegten Frequenzen liegen, nicht erfasst werden können. Im weiteren sind Fehlermöglichkeiten durch die manuelle Bedienung und die Frequenzeinstellung nicht auszuschliessen.

44 Computergesteuerte Messanlage

Das Messprinzip des computergesteuerten Systems ist im wesentlichen gleich wie beim Messplatz ohne Rech-

ner. Im Gegensatz zum Aufbau ohne Rechner, wo der Signalgenerator und das Messgerät auf der Empfängerseite manuell bedient werden müssen, kommunizieren jetzt hier die beiden Instrumente miteinander über einen Computer.

Mit dem Computer (HP 85) werden die Frequenz und die Amplitude des Signalgenerators festgelegt, und die Laserdiode im Sender wird mit dem entsprechenden Signal moduliert. Auf der Empfangsseite wird das Signal mit einem Spektrumanalyzer gemessen, der über den Rechner den Befehl erhält, das Maximum der gemessenen Bandbreite zu suchen und die entsprechende Amplitude dem Computer zu übermitteln. Die Einstellung der Messbandbreite des Spektrumanalyzers erfolgt ebenfalls über den Rechner.

Die im Kapitel 6 beschriebene Software ermöglicht die automatische Messung der Dämpfung von 10...800 MHz in 10-MHz-Schritten. Die Zeit für einen Messdurchlauf beträgt 4 Minuten.

Die Anlage wurde im Labor gemäss *Figur 3* ohne Modems betrieben. Mit Hilfe von Bus-Extendern können Modems problemlos angeschlossen und somit bei Feldmessungen Telefonleitungen verwendet werden (*Fig. 4*). Mit dem optischen Feldtelefon der PTT besteht zudem die Möglichkeit, die Daten über freie Glasfasern zu senden.

Im Gegensatz zur Methode ohne Rechner ist hier eine kontinuierliche Aufnahme der Dämpfung über den gesamten Frequenzbereich möglich. Die Programmierbarkeit des Rechners erlaubt auch eine genauere Untersuchung von Teilbereichen sowie die Aufnahme von statistischen Messungen.

Abgesehen von den Kosten bietet die rechnergesteuerte Version gegenüber den anderen Methoden wesentliche Vorteile bei der Kalibrierung, Messung und besonders bei der Auswertung der Ergebnisse. Mit entsprechenden Programmen kann die Auswertung der Messungen sehr komfortabel ausgeführt werden. Nebst verschiedenen Grafiken mit Protokollen können z. B. Histogramme und andere statistische Tabellen erstellt werden.

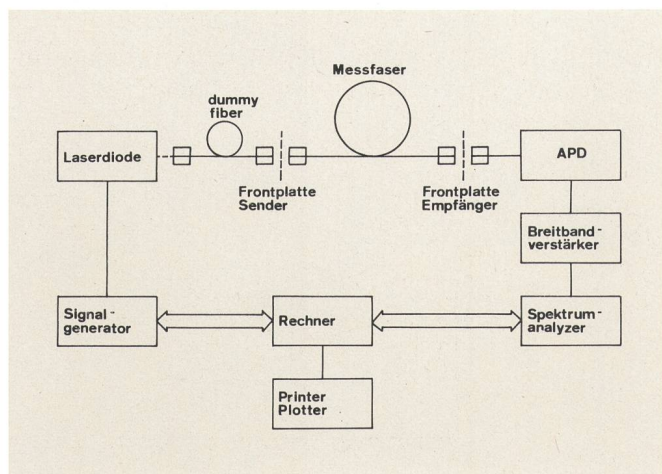


Fig. 3
Blockdiagramm der Messanordnung im Labor
◄► HP-IB-Bus

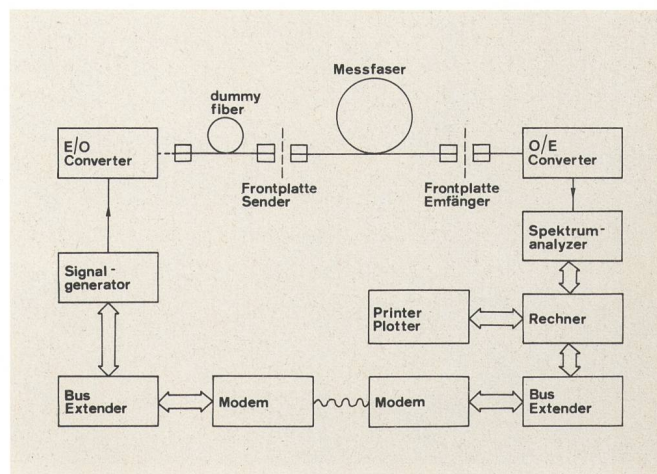


Fig. 4
Blockdiagramm der Messanordnung mit Modems
◄► HB-IB-Bus

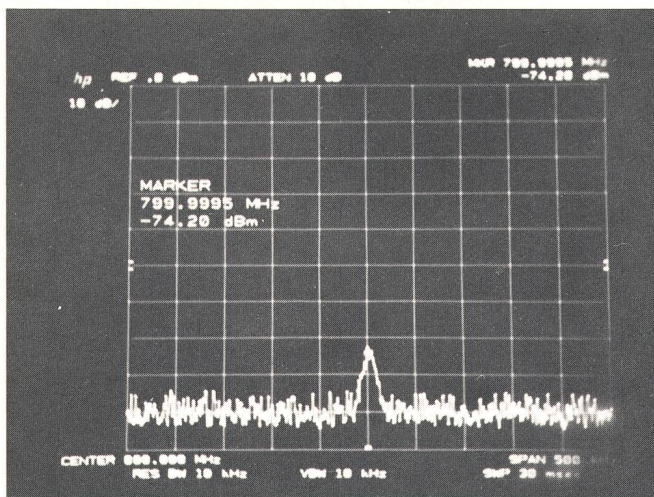


Fig. 5
Messung bei 800 MHz mit optischem Dämpfungsglied. Ausgang des Signalgenerators: 260 mV (1,3 dBm); gemessenes Signal: -74,20 dBm. Messbandbreite: 10 kHz

5 Messresultate

51 Manuelle Bedienung

Für die Bestimmung der maximal messbaren Dämpfung wurden die Messanlage manuell betrieben und der Sender auf 800 MHz gesetzt. Das ins Messsystem eingebaute optische Dämpfungsglied wurde dann schrittweise auf höhere Dämpfung eingestellt. *Figur 5* illustriert eine Messung bei 800 MHz, wobei das optische Dämpfungsglied eine Dämpfung von 58 dB aufwies. Addiert man noch die Durchgangsdämpfung von 2,8 dB, so resultiert eine überbrückte Gesamtdämpfung von etwa 60 dB bei einer Betriebswellenlänge von $\lambda = 825$ nm.

Wie in *Figur 6* ersichtlich, kann durch die Wahl der Messbandbreite die Messempfindlichkeit wesentlich verbessert werden. Die Messungen beweisen also, dass die aus der Theorie abgeleiteten Spezifikationen (siehe Kapitel 3) in der Praxis erfüllbar sind.

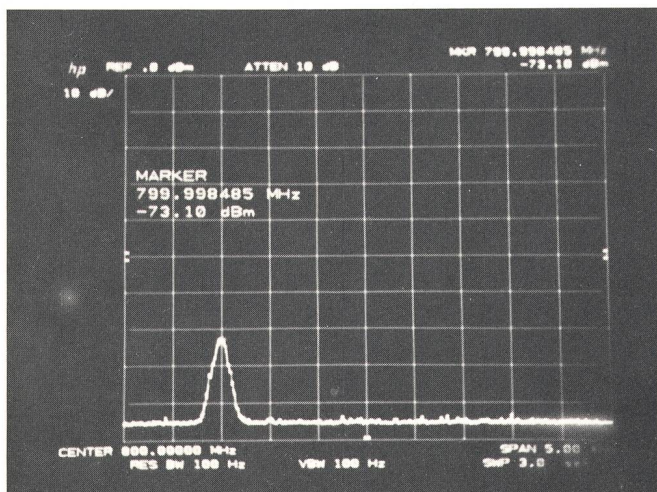


Fig. 6
Messung bei 800 MHz mit optischem Dämpfungsglied (60 dB). Ausgang des Signalgenerators: 260 mV (1,3 dBm); gemessenes Signal: -73,10 dBm. Messbandbreite: 100 Hz

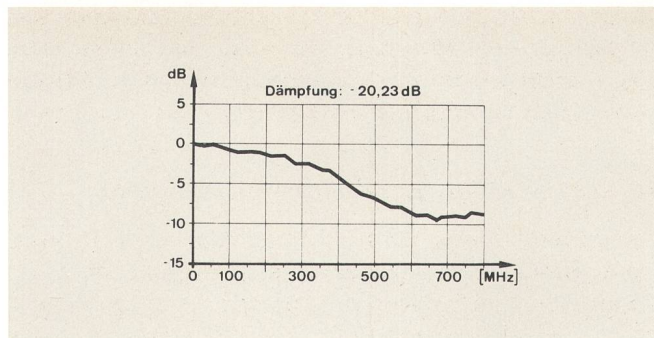


Fig. 7
Grafische Darstellung der Dämpfung der Messanlage mit Glasfaserkabel. Der ausgegebene Dämpfungswert bezieht sich auf die tiefste Messfrequenz (0 Hz)

52 Automatische Messung

Für die automatische Messung von 10...800 MHz ist es notwendig, die Messanlage zuerst zu kalibrieren. Mit Hilfe einer Kalibrationskassette, die die erforderlichen Programme enthält, wird die Anlage geeicht. Dabei ist zu bemerken, dass auf der Kassette drei Kalibrationsmessungen gespeichert werden können. Der Benutzer hat somit die Möglichkeit, die Stabilität der Messanlage insofern zu berücksichtigen, als bei zwei ungleichen Kalibrationen eine dritte Messung ausgeführt und mit den bereits durchgeführten Kalibrationen verglichen werden kann. Wird eine vierte Kalibration ausgeführt, so geht die erste verloren (first in, first out). Zwei oder drei gleiche, aufeinanderfolgende Kalibrationsmessungen bieten somit erhöhte Gewähr, dass die Kalibration stimmt.

Die Durchführung der automatischen Messung an Glasfaserkabeln und die entsprechende Datenspeicherung erfordern besonders initialisierte Datenkassetten. Mit Hilfe eines Initialisierungsprogrammes, das sich auf der Kalibrationskassette befindet, können Datenkassetten für die automatische Messung bereitgestellt werden. Bei der Initialisierung werden die letzte Kalibrationsmessung und weitere für die Auswertung notwendige Größen auf der Datenkassette gespeichert. Nach dem Einlesen des Programms auf der Messkassette können nun mit der initialisierten Datenkassette die automatischen Messungen durchgeführt werden. Die verschiedenen Mess- und Darstellungsmöglichkeiten, die der Benutzer wählen kann, werden im Kapitel 6 beschrieben.

Figur 7 zeigt die Darstellung der Dämpfung der gesamten Messanlage mit Messobjekt, während *Figur 8* die

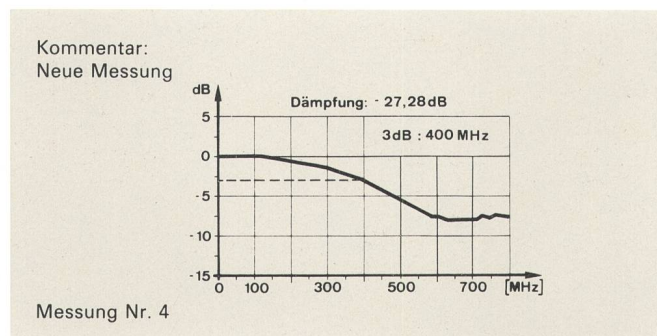


Fig. 8
Grafische Darstellung der Dämpfung eines Glasfaserkabels

aus der Messung und der Kalibration ausgewertete Dämpfung des Messobjektes allein veranschaulicht. Eine Messung wird bei der Speicherung fortlaufend nummeriert und kann zusätzlich mit einem Kommentar versehen werden. Bei der grafischen Darstellung wird der Kommentar oben links ausgedruckt. Die Dämpfungsangabe oberhalb der Grafik entspricht dem bei der tiefsten Frequenz erhaltenen Wert.

Die Messnummer sowie die Angabe, ob es sich um die Dämpfung der gesamten Anlage oder des Objektes handelt, werden links unterhalb der Grafik ausgedruckt (Fig. 8).

53 Feldmessungen

Die Firmen *Autophon AG* und *Dätwyler AG* haben mit der Unterstützung der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich und der Generaldirektion PTT ein optisches Übertragungssystem geschaffen, das zwischen Altdorf und Erstfeld erstmals in der Praxis eingesetzt wurde. Es dient dort im Rahmen eines Kabelfernsehtetzes als 4,8 km lange, zwischenverstärkerlose Zubringerleitung, die in Form eines vieradrigen Glasfaserkabels in einen Kabelkanal der Schweizerischen Bundesbahnen der Gotthardlinie zwischen Altdorf und Erstfeld einge- zogen wurde. Zur Übertragung werden analog modulierte Laser eingesetzt. Mit diesem System können auf den vier Gradientenindexfasern zwei Farbfernsehkanäle und das gesamte UKW-Spektrum übertragen werden¹.

Vor dem Verlegen der Strecke zwischen Altdorf und Erstfeld wurden im Labor der Autophon AG die einzelnen Kabelabschnitte zu einer Versuchsstrecke zusammengepleisst, damit das Übertragungssystem getestet werden konnte. Dies bot die Möglichkeit, die Dämpfung der Strecke vor dem Verlegen ein erstes Mal zu messen.

Aus *Figur 9* ist ersichtlich, wie die Versuchsstrecke aufgebaut wurde. Je Faserader sind insgesamt vier Spleissstellen vorhanden.

Alle im Labor durchgeführten Bandbreitenmessungen geschahen ohne besondere Einkoppelungsoptik. Vorausgegangene Messungen im Labor der Generaldirektion PTT hatten gezeigt, dass die Einkoppelungsbedingungen für *Siecor*-Fasern bei der vorliegenden Streckenlänge keinen Einfluss auf die Übertragungsbreite haben. Bei diesen Fasern stellt sich nach verhältnismässig kurzen Längen das Modengleichgewicht ein. Dies wurde, wie später gezeigt wird, durch die Messungen in Altdorf bestätigt.

¹ s. Techn. Mitt. PTT Nr. 9/1982, S. 421 ff.

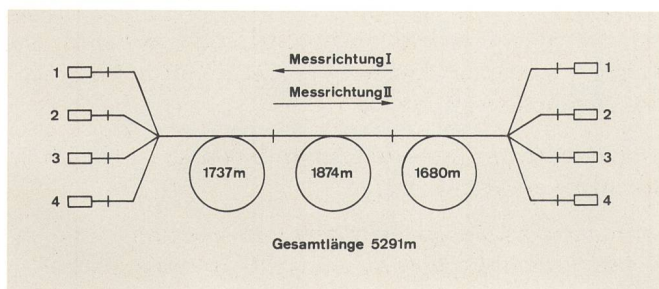


Fig. 9
Versuchsstrecke im Labor

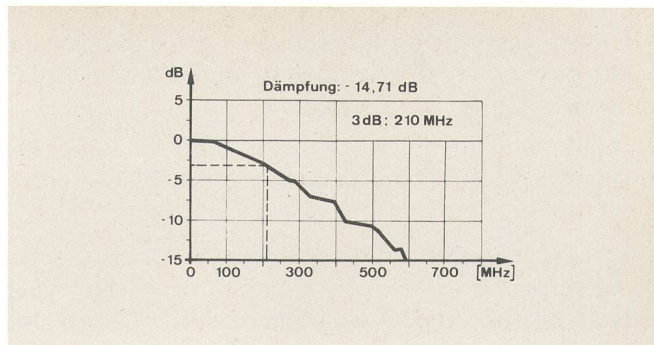


Fig. 10
Einzelfasermessung im Labor

Die Lichtwellenlänge der eingesetzten Messapparatur betrug 825 nm. Die Betriebswellenlänge des für diese Strecke vorgesehenen Übertragungssystems liegt bei 820 nm.

Die Fasern-Nrn. 1...4 wurden der Reihe nach jeweils in beiden Richtungen gemessen. Die dabei ermittelten Übertragungsbandbreiten sind in *Tabelle I* aufgeführt. *Figur 10* zeigt eine Einzelfasermessung im Labor. Interessant ist die Beobachtung, dass sich die Bandbreite einer Faser nicht mehr als 20 MHz ändert, wenn von links oder von rechts gemessen wird.

Tabelle I. Einzelfasermessung im Labor

Faser Nr.	Übertragungsbandbreite [MHz]	
	Messrichtung 1	Messrichtung 2
1	210	200
2	190	190
3	210	220
4	190	170

Kurz nach dem Einziehen und Spleissen des im Labor gemessenen Glasfaserkabelmaterials zwischen Altdorf und Erstfeld wurde im Mai 1982 die Übertragungsbandbreite der Strecke gemessen. Dazu diente wieder dieselbe Messapparatur wie im Labor bei Autophon, allerdings mit der vorher beschriebenen Fernsteueraus- rüstung ergänzt, die notwendig ist, um bei einer Punkt-zu-Punkt-Messung den optischen Sender und den Empfänger miteinander über zwei freie Glasfasern des Kabels zu synchronisieren. Im Labor, wo der optische Sender und der Empfänger nur wenige Meter nebeneinander standen, geschah diese Synchronisation direkt über den HP-IB-Bus.

In *Figur 11* ist der Aufbau der installierten Strecke schematisch dargestellt. Die Gesamtlänge beträgt 4,6 km.

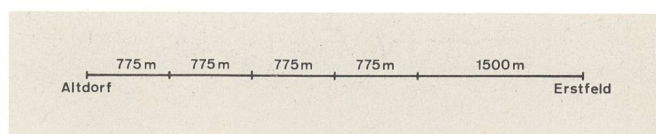


Fig. 11
Strecke Altdorf—Erstfeld

Um die einzelnen Abschnitte zusammenzufügen und zum Anbringen der Glasfaserstecker an beiden Enden, wurde jede Ader der Kabelstrecke an sechs Stellen gespleisst.

Die Bandbreitenmessung geschah wie im Labor mit einer Lasardiode, die bei 825 nm Lichtwellenlänge arbeitet.

Vergleicht man die Versuchsstrecke im Labor mit der verlegten Strecke in Altdorf, so stellt man fest, dass letztere je Ader zwei Spleissungen mehr aufweist und 600 m kürzer ist. Zudem wurde ein Teilstück der Altdorfer Strecke nicht in derselben Richtung eingespleisst wie bei der Versuchsstrecke im Labor. Wegen dieser Unterschiede kann aus den vorliegenden Messreihen keine vergleichende Aussage über das Verhalten der Übertragungsbandbreite eines Glasfaserkabels vor und nach dem Verlegen gemacht werden.

Zuerst wurden, gleich wie im Labor, die Übertragungsbandbreiten der einzelnen Adern des Streckenkabels in beiden Richtungen gemessen. Jede Messung wurde zweimal durchgeführt: einmal mit direkter Einkoppelung und einmal mit einem besonderen Faservorspann, der sogenannten 70%-Faser. Bei dieser Einkoppelungsart wurde eine 2 m lange Stufenindexfaser mit einem Kerndurchmesser von 35 µm und einer numerischen Apertur von 0,14 zwischen dem optischen Sender und der zu messenden Faser eingelegt [4].

Tabelle II. Einzelfasermessung in Altdorf

Faser Nr.	Messrichtung Altdorf → Erstfeld		Messrichtung Erstfeld → Altdorf	
	direkte Einkopplung [MHz]	70 % Einkopplung [MHz]	direkte Einkopplung [MHz]	70 % Einkopplung [MHz]
1	200	200	190	190
2	180	180	200	200
3	240	240	270	260
4	260	260	310	310

In Tabelle II sind die gemessenen Übertragungsbandbreiten der vier Glasfaseradern aufgetragen. Wie aus den Messwerten zu erkennen ist, hat die Einkopplungsart auf die Übertragungsbandbreite keinen Einfluss. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass entlang der 4,6 km langen Strecke eine genügende Modenmischung stattfindet, um die unterschiedliche Anregung der Moden bei der Einkoppelung zu verwischen.

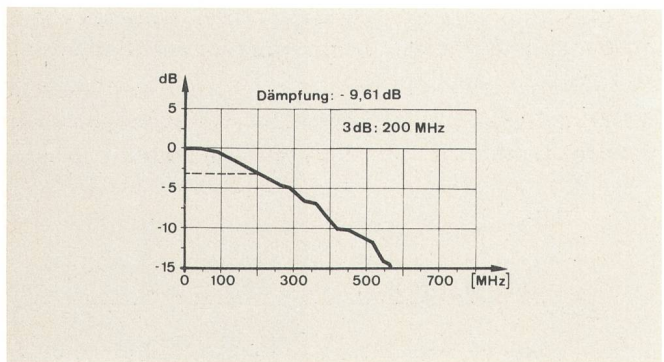


Fig. 12
Einzelfasermessung in Altdorf

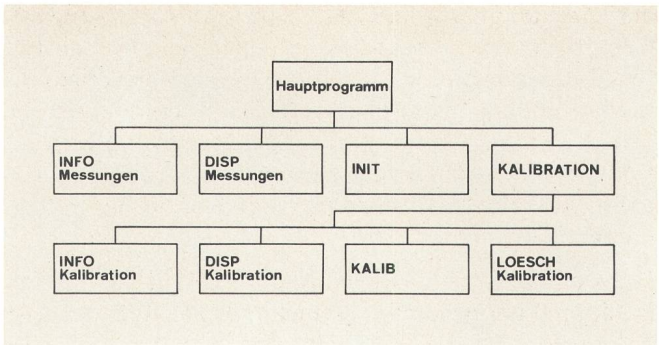


Fig. 13
Blockdiagramm des Programmes auf der Kalibrationskassette

Figur 12 zeigt die Einzelfasermessung im Felde von Altdorf bis Erstfeld. Obschon Teilstücke nicht in derselben Richtung wie im Labor eingespleisst wurden, darf die Übereinstimmung zwischen Labor- und Feldmessung als gut bezeichnet werden.

6 Software

Das vollständige Programm besteht aus zwei Hauptprogrammen, die getrennt auf der Kalibrations- und der Messkassette gespeichert sind. Die Programme, die prinzipiell gleich aufgebaut sind, laufen selbsterklärend ab, so dass der Benutzer keine aufwendigen Anleitungen braucht. Insbesondere wurde darauf geachtet, dass die einzelnen Unterprogramme auf der Messkassette über Funktionstasten initialisiert werden können. Für die Feldmessung kann somit ein Computer mit Funktionstasten eingesetzt werden.

61 Kalibrationskassette

Der Aufbau des Programms auf der Kalibrationskassette ist im Blockdiagramm (Fig. 13) dargestellt.

Das Unterprogramm INFO gibt dem Benutzer die erste Information über den Titel der Datenkassette, wie viele Messungen maximal gespeichert werden können und wie viele Messungen durchgeführt und gespeichert worden sind. Wenn der Computer über eine alphanumerische Tastatur verfügt, können noch die Anzahl Messdurchläufe für die Durchschnittsberechnung sowie der Kommentar zu den Messungen abgefragt werden. Im weiteren besteht die Möglichkeit, den Kommentar zu ändern. Es ist also möglich, eine neue Messung mit einem beliebigen Kommentar zu versehen.

Mit dem Unterprogramm DISP lässt sich ein Messblock grafisch darstellen. Für die Darstellung werden die Mittelwerte berechnet und als Funktion der Frequenz dargestellt, wobei der Dämpfungsverlauf auf die Dämpfung bei der tiefsten Frequenz (10 MHz) bezogen wird. Die Dämpfung bei der tiefsten Frequenz wird auf der Darstellung numerisch angegeben.

Folgende zwei Darstellungsmöglichkeiten können vom Benutzer gewählt werden:

- frequenzabhängige Dämpfung der Messanlage und
- frequenzabhängige Dämpfung des Messobjektes.

Bei der ersten Darstellung wird die frequenzabhängige Dämpfung der ganzen Anlage inklusive Messobjekt,

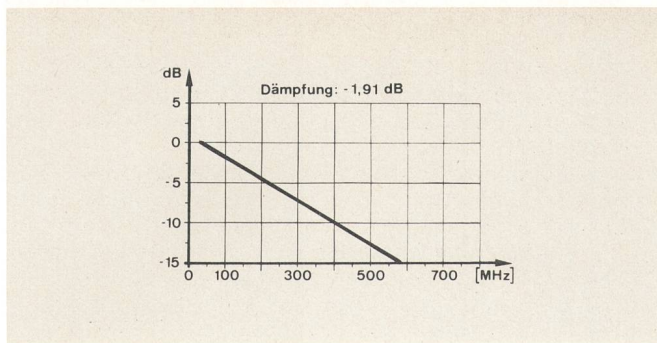


Fig. 14
Grafische Darstellung der Dämpfung der Anlage

bezogen auf den Wert bei der tiefsten Frequenz, aufgezeichnet, während bei der zweiten Darstellung die letzte Kalibration in Betracht gezogen wird. Die Dämpfung des Messobjektes wird berechnet und, wieder bezogen auf den Wert bei der tiefsten Frequenz, dargestellt. Im weiteren wird noch der 3-dB-Punkt bestimmt und sowohl grafisch als auch numerisch angegeben. *Figur 14* und *Figur 15* illustrieren die beiden Darstellungsmöglichkeiten anhand einer simulierten Übertragungsfunktion.

Das Unterprogramm INIT dient zur Initialisierung von Datenkassetten. Zuerst wird überprüft, ob sich eine für die Initialisierung notwendige Kalibrationsmessung im Speicher des Computers befindet. Wenn dies nicht der Fall ist, wird der Benutzer aufgefordert, die Kalibrationskassette einzuschieben, damit die letzte Kalibrationsmessung in den Speicher eingelesen werden kann. Ist keine Kalibration vorhanden, muss eine solche durchgeführt werden.

Bei der zu initialisierenden Kassette wird dann überprüft, ob eine Initialisierung möglich ist. Eine Initialisierung der Kalibrations- oder Messkassette wird somit verhindert. Bereits initialisierte Kassetten können auf Wunsch gelöscht und neu initialisiert werden.

Das Unterprogramm KALIBRATION enthält neben einer Informations- und einer Darstellungs-Subroutine, die gleich wie INFO und DISP für die Messungen aufgebaut sind, den eigentlichen Kalibrationsablauf. Maximal können drei Kalibrationsmessungen gespeichert werden. Ist diese Anzahl erreicht, wird die nächste Messung auf einer First-in-/First-out-Basis gespeichert, d. h., die älteste gespeicherte Kalibrationsmessung geht verloren. Der Verlust der Messung wird vor der Ausführung auf dem Bildschirm angezeigt. Für die Durchführung der Ka-

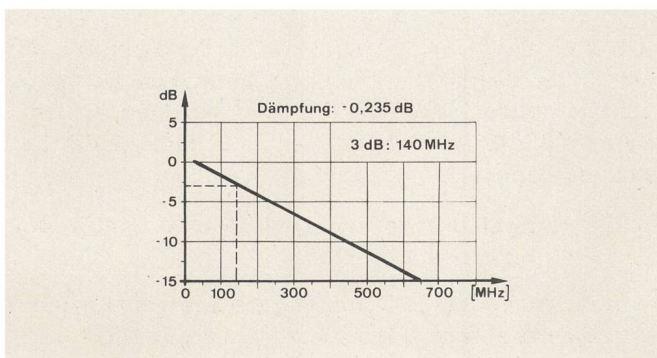


Fig. 15
Grafische Darstellung der Dämpfung des Messobjektes

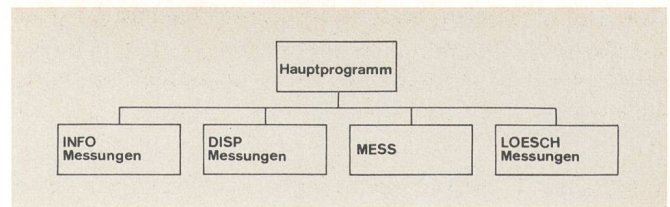


Fig. 16
Blockdiagramm des Programmes auf der Messkassette

libationsmessungen kann der Benutzer folgende Größen festlegen:

- Anzahl Messdurchläufe für die Berechnung des Durchschnittes
- Amplitude des Senders in dBm
- zusätzliche optische Dämpfung für die Kalibration

Nach der Eingabe obiger Größen, die auf Richtigkeit geprüft werden, steuert das Programm die entsprechenden Instrumente und führt die Messungen gemäss der Beschreibung in den Kapiteln 4 und 5 sowie die Speicherung der Daten auf die Kalibrationskassette aus. Einzelne oder alle Kalibrationen können mit der Subroutine LÖSCH gelöscht werden, wobei der Benutzer nochmals gefragt wird, ob er wirklich die gewählte Kalibration löschen will.

62 Messkassette

Der Aufbau des Programms auf der Messkassette ist im Blockdiagramm (*Figur 16*) dargestellt.

Neben den beiden Unterprogrammen INFO (Messungen) und DISP (Messungen), die sich ebenfalls auf der Kalibrationskassette befinden und zur Information und Darstellung von Messungen auf Datenkassetten dienen, enthält die Messkassette folgende Unterprogramme:

- MESS: Damit werden die Messungen durchgeführt und auf der Datenkassette gespeichert. Sobald die Datenkassette voll ist, können keine weiteren Messungen mehr gespeichert werden. Wie beim Unterprogramm KALIB für die Kalibrationsmessungen kann der Benutzer die Zahl der Messdurchläufe für die Durchschnittsberechnung wählen, wobei die Senderamplitude aus der Kalibrationsmessung auf der Datenkassette entnommen wird.
Nach der Eingabe der Anzahl der Messdurchläufe steuert das Programm die entsprechenden Instrumente an und führt die Messungen gemäss der Beschreibung in den Kapiteln 4 und 5 sowie die Speicherung der Messungen auf die Datenkassette aus.
- LÖSCH: Dieses Unterprogramm erlaubt dem Benutzer, die letzte Messung zu löschen. Dabei muss die Messung mit dem Programm ausgeführt worden sein, das sich im Speicher des Computers befindet. Andernfalls ist eine Löschung nicht möglich.
Zur Sicherheit wird der Benutzer nochmals abgefragt, ob er wirklich die letzte Messung löschen will.

7 Schlussfolgerungen

Im vorliegenden Artikel beschrieben die Autoren einen bei den PTT-Betrieben entwickelten computergesteuerten optischen Wobbelmessplatz mit hoher Dynamik und

grossem Wobbelbereich. Konzeption und Bedienung des Messplatzes ermöglichen einen Einsatz in Labor und Feld, wie dies an Hand der Messungen der Fernseh-zubringeranlage Erstfeld—Altdorf gezeigt werden konnte.

Adresse der Autoren:

Werner Anton *Steffen*, dipl. Ing., Optingenstr. 10, CH-3012 Bern
Willy *Kotyczka*, Dr. ing., Rebhalde 25, CH-8645 Jona

Bibliographie

- [1] *Melchior H. et al.* Photodetectors for Optical Communication Systems. New York, Proc. IEEE, 58 (1970) 10, S. 1466.
- [2] *Yariv A.* Introduction to Optical Electronics. New York (1976), S. 328.
- [3] *Motchenbacher C. D.* Low Noise Electr. Design. New York, 1973.
- [4] *Novak R. P., Pellaux J. P. P. and Steffen W. A.* Compact and Efficient Improvement of the 70 % Beam Optics. Berlin, Journal of Optical Communications, 3 (1982) 2.

Die nächste Nummer bringt unter anderem

Vous pourrez lire dans le prochain numéro

9/83

Pitteloud J.	Telepac: Pourquoi s'y connecter et quels équipements y raccorder
Münger F.	Qualitätssicherung von Fernmeldematerialien bei den PTT-Betrieben
Peter M.	Datex 300 — ein neuer Dienst der Teleinformatik
