

Möglichkeiten und Grenzen der AM- und FM-Übertragung von Fernsehsignalen auf Glasfasern

Autor(en): **Welter, Rudolf / Berger, Hanspeter / Guekos, Georg**

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): **60 (1982)**

Heft 4

PDF erstellt am: **11.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-876157>

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.

Möglichkeiten und Grenzen der AM- und FM-Übertragung von Fernsehsignalen auf Glasfasern

Rudolf WELTER, Hanspeter BERGER, Georg GUEKOS, Andres DILL, Armin SOLLBERGER, Hans MELCHIOR, Zürich, und Werner STEFFEN, Bern

621.375.826:621.391.6:681.7.068

Zusammenfassung. In diesem Beitrag wird experimentell und theoretisch untersucht, über welche Entfernungen sich Fernseh- und Tonfrequenzsignale unter Beibehaltung strenger Qualitätskriterien in analog modulierter Form übertragen lassen. Lineare Lasersender, empfindliche Empfänger und nahezu perfekte Spleissstellen ermöglichten, vier TV- und sechs FM-Radiokanäle gleichzeitig über eine Faser von einem Kilometer Länge oder einen TV-Kanal über vier Kilometer Glasfaser zu übertragen. Mit 3,5 dB/km Faserdämpfung konnten ein Video-Rauschabstand von 40 dB und Verzerrungen von weniger als -67 dB erreicht werden.

Possibilités et limites de la transmission sur fibres optiques de signaux de télévision en modulation d'amplitude et de fréquence

Résumé. Les auteurs examinent tant sur le plan expérimental que sur le plan théorique à quelles distances des signaux vidéo et son peuvent être transmis en modulation analogique lorsqu'on désire maintenir des critères de qualité sévères. Par l'emploi d'émetteurs lasers linéaires, de récepteurs sensibles et d'épissures quasi parfaites, il a été possible de transmettre simultanément sur une fibre d'un kilomètre quatre canaux TV et six canaux de radio en modulation de fréquence ou un canal TV sur une fibre de quatre kilomètres. Compte tenu d'un affaiblissement de fibre de 3,5 dB/km, on a pu réaliser un rapport signal vidéo/bruit de 40 dB et des distorsions inférieures à -67 dB.

Possibilità e limiti della trasmissione in modulazione d'ampiezza e di frequenza di segnali televisivi su fibra ottica

Riassunto. In questo articolo gli autori indagano, sia dal lato sperimentale che dal lato teorico, su quali distanze si lasciano trasmettere, in forma modulata analogicamente, segnali televisivi e a frequenza vocale, mantenendo rigidi criteri di qualità. Trasmettitori laser lineari, ricevitori sensibili, e giunzioni pressoché perfette hanno reso possibile la trasmissione simultanea di quattro canali televisivi e sei canali radio a MF su una fibra lunga un chilometro o un canale televisivo su quattro chilometri di fibra ottica. Con un'attenuazione di fibra di 3,5 dB/km si sono potuti raggiungere un rapporto segnale-video/rumore di 40 dB e delle distorsioni inferiori a -67 dB.

1 Einleitung

Im vorangegangenen Artikel «Grundlagen zur analogen Breitbandübertragung mit Glasfasern» («Techn. Mitt. PTT» Nr. 3/1982, S. 116) wurden die Elemente einer optischen Analog-Übertragungsstrecke für Fernsehkanäle beschrieben.

In dieser Publikation wird ein realisiertes faseroptisches Analog-Übertragungssystem vorgestellt und mit gemessenen Daten dokumentiert. Nebst der einfachen Amplituden-Intensitätsmodulation untersuchte man auch die Signalqualität am Empfänger bei FM-Intensitätsmodulation.

Für die Analog-Modulation sind Laserdioden mit ausgezeichneter Qualität der Strom-Licht-Charakteristiken, guter Stabilität und geringen optischen Fluktuationen bei mehreren longitudinalen Moden Voraussetzung. Der Betriebspunkt der Laserdioden ist so zu optimieren, dass maximale Ausgangsleistung bei Einhaltung der Verzerrungslimiten und Rauschspezifikationen erreicht wird.

2 Charakteristiken von Laserdioden

Ausgedehnte Untersuchungen des Modulations- und Verzerrungsverhaltens der Laserdioden waren nötig, um Klarheit zu erhalten, welche Typen den Qualitätsanforderungen für eine Fernsehsignalübertragung genügen. In die Tests wurden sowohl Multimodelaser (beispielsweise V-Nut-Typ, proton-bombarded-stripe) als auch Laserdioden mit nur longitudinalen Emissionsmode (zum Beispiel Channeled Substrate) einbezogen. Die Charakteristiken der Emissionsspektren sind stark mit den Laserstrukturen gekoppelt. Auch lassen verschiedene Wellenleitungs-Mechanismen in den Laserkavitäten unterschiedliches elektrooptisches Verhalten erwarten [1, 2 und 3].

In Figur 1 sind einige optische und elektrooptische Charakteristiken eines Lasers mit einem seitlich durch den Stromfluss begrenzten Resonator (aktiv gain-guid-

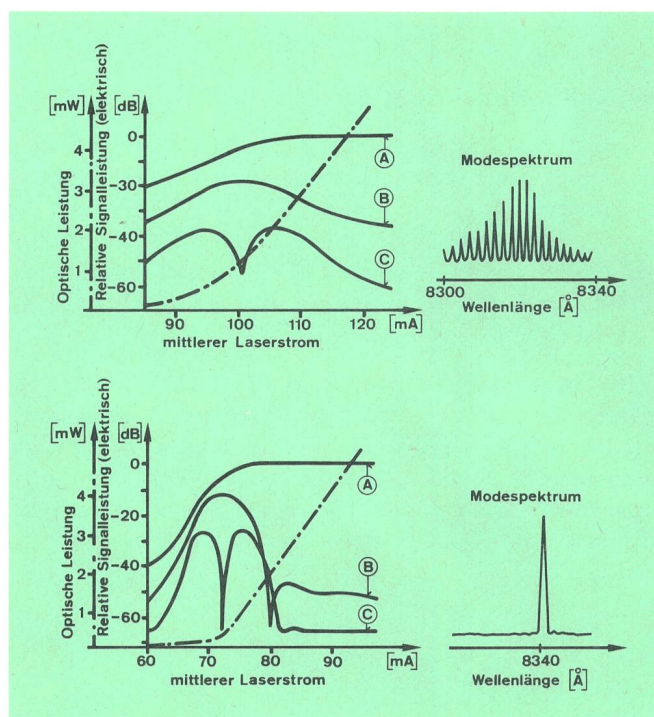


Fig. 1 Statische Licht-Strom-Kennlinien, Verzerrungen und Emissionsspektren eines V-Nut- (oben) und eines Channeled-substrate-Lasers (unten). Die Verzerrungen sind mit der 2-Sender-Methode (Anhang B) gemessen. Die Aussteuerung betrug bei beiden Lasern 10 mA peak-peak. Die Intermodulationsverzerrungen zweiter und dritter Ordnung (IM_2 beziehungsweise IM_3) nehmen im lasenden Betrieb ab und haben bei hohen Arbeitspunktströmen grosse Abstände zum Nutzsignal.
 (A) Grundfrequenzverlauf
 (B) IM_2 Intermodulationsverzerrung zweiter Ordnung
 (C) IM_3 Intermodulationsverzerrung dritter Ordnung

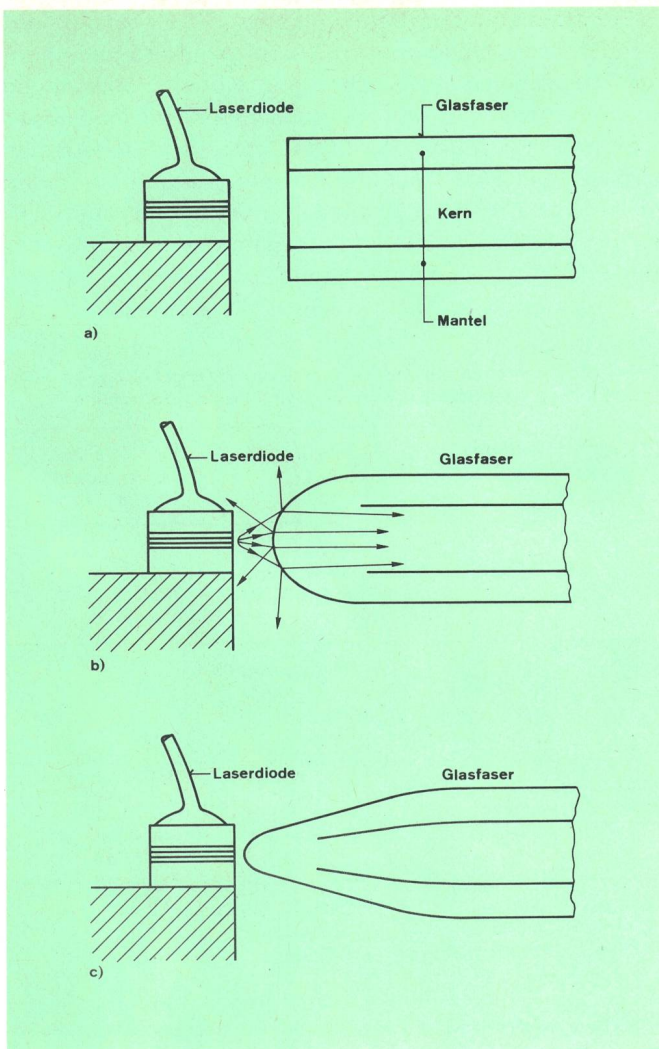


Fig. 2
Faserenden für «butt-joint»-Laser-Faser-Kopplungen
 a) Glatter Faserschnitt, Lichteinkopplungsgrad $\approx 35\%$
 b) Fasermikrolinse, Lichteinkopplungsgrad $\approx 50\%$
 c) Faserspitze, Lichteinkopplungsgrad $\approx 60\%$ bei optimalem Spitzenradius am Faserende von etwa $10\ \mu\text{m}$

ed Typ, beispielsweise V-Nut-Laser) jenem eines Lasers mit passiver dielektrischer Lichtführung (Channeled Substrate Planar [CSP]-Laser) gegenübergestellt [4, 5, 6 und 7]. Neben den verschiedenen Emissionsspektren zeigt auch das statische Licht-Strom-Verhalten Unterschiede: die DC-Charakteristik des CSP-Lasers deutet einen relativ abrupten Übergang von inkohärenter Lichtemission zum Laserbetrieb bei etwa $71\ \text{mA}$ an. Beim V-Nut-Laser dagegen erfolgt der Übergang graduell über einen breiten Strombereich.

Zur Messung der Licht-Strom-Linearität wurden die beiden Dioden nach der 2-Sender-Methode (Anhang B) mit zwei sinusförmigen Signalen von je $10\ \text{mA}$ Spitze-Spitze angesteuert. Die Transferkennlinien und Intermodulationsverzerrungen zweiter und dritter Ordnung der beiden Laser sind in Figur 1 als Funktion der Arbeitspunkte aufgezeichnet. Der CSP-Laser zeigt bei Strömen schon knapp über der Laserschwelle kleine Verzerrungen ($\text{IM}_3 < -65\ \text{dB}$, $\text{IM}_2 < -50\ \text{dB}$). Beim V-Nut-Laser sind die Verzerrungen grösser und nehmen auch gegen höhere Arbeitspunktströme hin nur langsam ab. Bei beiden Lasertypen sind die Intermodulationsprodukte zweiter Ordnung meistens einige Dezibel grösser als jene dritter Ordnung [8]. Werden die Kanäle frequenzmässig so angeordnet, dass Verzerrungsprodukte zweiter Ord-

nung ausserhalb der Nutzfrequenzbänder zu liegen kommen und somit praktisch bedeutungslos werden, so eignen sich grundsätzlich beide Lasertypen für eine direkte Strom-Licht-Analogmodulation. Der V-Nut-Laser ist dabei mit einem mittleren Diodenstrom von $125\ \text{mA}$ oder mehr zu betreiben, da in jenem Bereich die Verzerrungen klein genug sind. Für den CSP-Laser kann der Arbeitspunkt von diesem Aspekt her in einem weiten Bereich von $82\ \text{mA}$ bis $95\ \text{mA}$ gewählt werden.

3 Einkopplungseffizienz und Spleissverbindungen

Um möglichst viel Licht vom Laser zum Empfänger zu senden, mussten die Kopplungsverluste (Laser-Faser, Faser-Faser) minimalisiert werden. Durch die Formgebung des Faserendes kann der Wirkungsgrad der Lichteinkopplung vom Laser in die Faser stark variiert werden. Mit einem glatten Faserschnitt (Fig. 2a) gelang es, Einkopplungsgrade von maximal 35% zu erzielen. Eine beachtliche Erhöhung ($\sim 50\%$ beziehungsweise 60%) liess sich jedoch erreichen, wenn das Faserende zu einer Mikrolinse (Fig. 2b) oder einer Faserspitze (Fig. 2c) geschmolzen wurde [9]. Mit der Faserspitze wurden die besten Resultate gemessen. Da die Reproduzierbarkeit des Spitzenradius und damit des Einkopplungswirkungsgrades bei der Herstellung nicht befriedigend war, wurde für Systemmessungen die einfachere Mikrolinse vorgezogen.

Tests der Faser-Faser-Spleissungen mit einem optischen Reflektometer ergaben, dass sich die Kopplungsverluste zwischen $0,1$ und $0,3\ \text{dB}$ bewegten.

4 Linearitätsmessungen

Das optische System, bestehend aus Sender-Faser-Empfänger, wurde bezüglich Linearität mit verschiedenen Lasern untersucht. Die Messkurven der Modulationscharakteristik und der Verzerrungen (2-Sender-Methode) der Strecke, die mit einem V-Nut-Laser als Senderdiode aufgenommen wurde, sind in Figur 3 aufgezeichnet. Die Faserlänge zwischen Sender und Empfän-

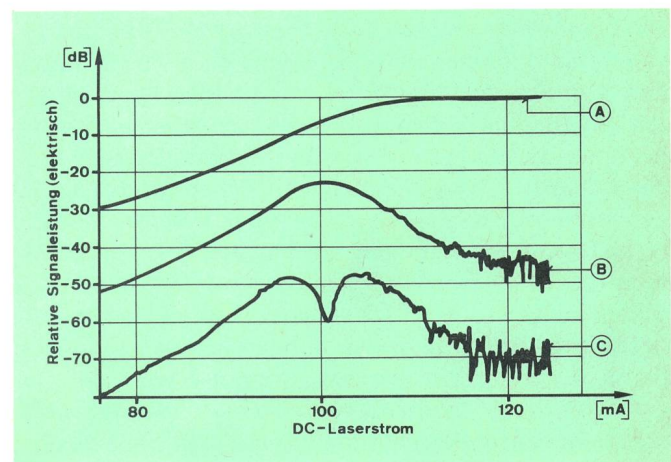


Fig. 3
 Intermodulationsverzerrungen des Übertragungssystems mit einem V-Nut-Laser als Sender und einer angekoppelten Gradientenindex-Faser von etwa $3\ \text{km}$ Länge (Laseraussteuerung: $7\ \text{mA}_{\text{p-p}}$; emittierte optische Leistung: $3\ \text{mW}_{\text{p-p}}$)
 (A) Verlauf der Grundfrequenz ($18\ \text{MHz}$)
 (B) Intermodulationsverzerrungen zweiter Ordnung ($2\ \text{MHz}$)
 (C) Intermodulationsverzerrungen dritter Ordnung ($16\ \text{MHz}$)

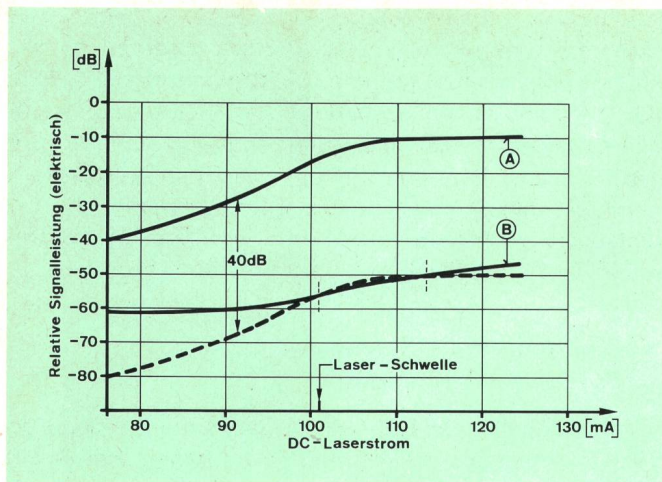


Fig. 4 Rauschabstand im Fernsehkanal (Video, unbewertet) bei der Übertragung von vier TV- und sechs UKW-Kanälen. Verwendeter Laser: V-Nut. Der Bildträger- und der Rauschpegel sind in Funktion des Laserarbeitspunktes gemessen und aufgetragen. Oberhalb der Schwelle wird der geforderte Rauschabstand von 40 dB knapp erfüllt.

Laser: V-Nut-Laser
 Faser: Gradientenindex, Typ FGI 50/125
 Programm: Vier TV- und sechs UKW-Kanäle, Signal-Power 3,7 mW_{p-p}
 (A) Bildträger (38,9 MHz)
 (B) Rauschen (Video)

ger betrug rund 3 km. Die Verzerrungsverläufe stimmen bis zu einem Laserstrom von 10 % über dem Schwellstrom mit jenen, die für den Laser allein (ohne Faser) gemessen wurden, überein. Bei höheren Strömen sind jedoch kleine Einbrüche in den Verzerrungskurven und verglichen mit den Messungen ohne Faser ist eine minimale Verschlechterung der Linearität des Systems feststellbar. Trotzdem sind die Verzerrungen dritter Ordnung bei einem Betrieb weit über der Laserschwelle ausreichend, um bei der Übertragung von vier TV-Kanälen und der FM-Programme mit derselben Aussteuerung, wie sie für die Messungen in Figur 3 gewählt wurde, die spezifizierten Linearitätswerte einzuhalten.

5 Rauschabstände

Mit Hilfe eines geeichten Spektrumanalysators wurde der HF-Rauschabstand für vier TV-Kanäle und sechs FM-Programme bei AM-IM-Betrieb als Funktion des Laserstroms aufgenommen. In Figur 4 sind die gemessenen Bildträgeramplituden und die aus den Messresultaten errechneten Videorauschpegel als Funktion des Arbeitspunktes aufgetragen. Die Spitzen-Spitzen-Aussteuerung des Lasers je Kanal ist gleich gross wie bei den Verzerrungsmessungen von Figur 3. Bildträger- und Rauschpegel nehmen mit wachsendem Arbeitspunktstrom zu. Im Betrieb unterhalb der Laserschwelle ist das Signal schwach, der Rauschpegel liegt weit über dem geforderten Wert. In einem engen Laser-Arbeitspunktbereich knapp oberhalb der Schwelle wird der gewünschte Rauschabstand von 40 dB erreicht. Bei noch grösseren Lasergleichströmen steigt der Rauschpegel weiter an, während die Signalleistung konstant bleibt, so dass der gewünschte Rauschabstand nicht mehr eingehalten werden kann. Dieses Rauschverhalten der Faserstrecke ist durch die optischen Fluktuationen des Lasers begründet, die bei den aktiven durch den Stromfluss bestimmten Wellenleitertypen (V-Nut-Laser) verhältnismässig stark sind [3].

Zur Untersuchung des Einflusses der Faserlänge auf den Rauschabstand und zur Überprüfung von gerechneten Rauschabstandverhältnissen wurden Messungen mit ein, zwei und vier TV-Kanälen bei verschiedenen Übertragungslängen durchgeführt. Als Sendedioden setzten wir zwei Multimodelaser (proton-bombardete stripe und V-Nut) ein. Diese Laser wurden gewählt, weil sie eine hohe Anzahl Longitudinalmoden besitzen, was bei einer Ankopplung zwischen Laser und Gradientenfaser von Vorteil ist. Die Messergebnisse sind in Tabelle I

Tabelle I. Zusammenstellung der gemessenen Ergebnisse der Glasfaser-Übertragungsstrecke mit 1-, 2- und 4-Kanal-Übertragung

Distanz/ Kanäle	1 TV-Kanal	2 TV-Kanäle (ZF, K2)	4 TV-Kanäle (+6 UKW-Kanäle) ¹ (ZF, K2, K3, K4)
1,08 km		SNR _{video} : 45 dB IM-Abstand: > 67 dB	SNR _{video} : 33...37 dB IM-Abstand: ≥ 57 dB
2,15 km	SNR _{video} : 51...53 dB IM-Abstand: > 82 dB	SNR _{video} : 42 dB IM-Abstand: > 64 dB	
3,2 km	SNR _{video} : 47 dB IM-Abstand: ≥ 76 dB	SNR _{video} : 40...41 dB IM-Abstand: ≥ 65 dB	SNR _{video} : 33...37 dB IM-Abstand: ≥ 57 dB
4,3 km	SNR _{video} : 44...46 dB IM-Abstand: ≥ 75 dB	SNR _{video} : 40 dB IM-Abstand: > 65 dB	

¹ Bei 4-Kanal-Übertragung wurden nur IM₃ von Bild- und Tonträgern sowie IM vierter und höherer Ordnung berücksichtigt. Die in die Kanäle fallenden IM₂- und IM₃-Produkte der Bildträger können durch entsprechende Kanalordnung vermieden werden.

zusammengefasst; je nach Kombination der verwendeten Komponenten variieren sie für gleiche Kanalzahlen und Übertragungslängen. Die erreichbaren Distanzen lassen sich jedoch gut abschätzen. Die Gesamtdämpfung der Faserstrecke für 4,3 km beträgt 14,8 dB.

6 Diskussion der Messresultate

Entscheidend für die TV-Signalqualität sind der Video-Signal-Rauschabstand und der Intermodulationsabstand. Bei der 1- und der 2-Kanal-Übertragung konnte der spezifizierte Rauschabstand von 40 dB (Tab. II) im-

Tabelle II. Auszug aus dem Pflichtenheft der Generaldirektion PTT für die Faserübertragungsstrecke (die Ziffern ohne Klammern haben für Richtstrahlzubringerverbindungen Gültigkeit; die eingeklammerten Werte sind für Punkt-zu-Punkt-Übertragungen verbindlich)

TV-Bild	
Video-Rauschabstand (unbewertet)	40 (37) dB
Intermodulationsabstand im TV-Kanal	73 (67) dB
Differentielle Amplitude	< 2 (10) %
Differentielle Phase	< 2 (10) °
UKW Hörfunkqualität (Mono)	
Ton-Geräuschabstand	> 51 (47) dB
Klirrfaktor	< 0,5 (1) %
Weitere Spezifikationen	
Gesamtamplitudengang	innerhalb 2 (4) dB
Schnittstellenimpedanz	75 Ω

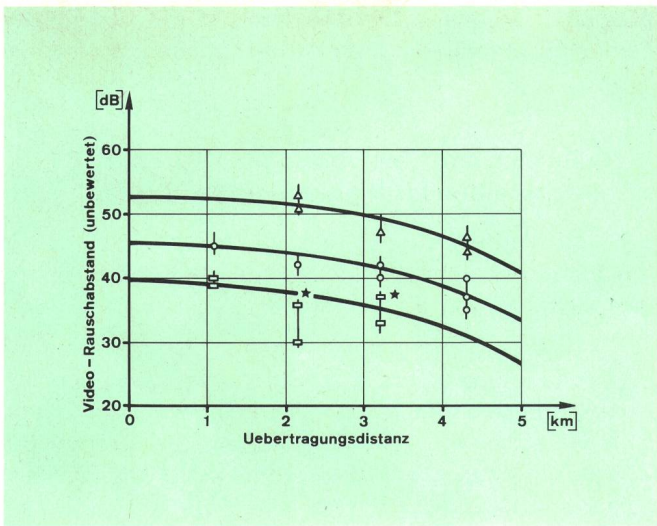


Fig. 5 Videorausgabstand als Funktion der Übertragungsdistanz. Bei der Übertragung von einem oder zwei Kanälen über eine Faser ist der geforderte Rauschabstand von 40 dB erreichbar bis zu einer Entfernung von mindestens 3 km. Verschiedene Punkte einer Sorte entsprechen den Messwerten bei verschiedenen Frequenzlagen der Kanäle.

- △ 1 Kanal
- 2 Kanäle
- 4 Kanäle

* Bei Vierkanalübertragung über mehr als 1,1 km wurde der angestrebte IM-Abstand von -67 dB nicht erreicht.

mer erreicht werden. Der IM-Abstand bei der Übertragung eines Kanals war > 67 dB, bei der 2-Kanal-Übertragung > 65 dB mit 4,3 km Faserlänge.

In Fig. 5 ist der gemessene Videorausgabstand als Funktion der Übertragungslänge dargestellt. Es zeigte sich, dass eine Übertragung von vier TV-Kanälen bei der gewünschten Qualität für Punkt-zu-Punkt-Verbindung mit den verwendeten Baublöcken bis etwa 1 km möglich war [19, 20].

Für die Übertragung eines Kanals lassen sich die gemessenen Werte extrapolieren; Übertragungsdistanzen von etwa 5 km für 1-Kanal-Übertragung scheinen realisierbar.

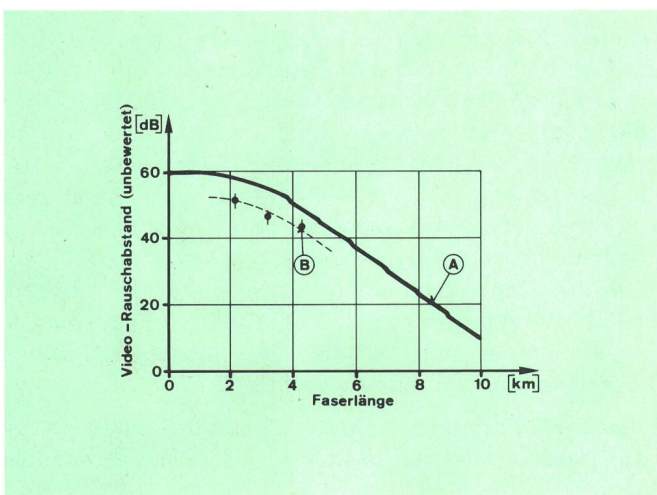


Fig. 6 Vergleich der theoretisch berechneten und der gemessenen Werte für den Video-Rauschabstand bei der Übertragung von einem TV-Kanal für den Proton-bombarded-stripe-Laser als Senderelement

- (A) Gerechnete Werte
- (B) Gemessene Werte

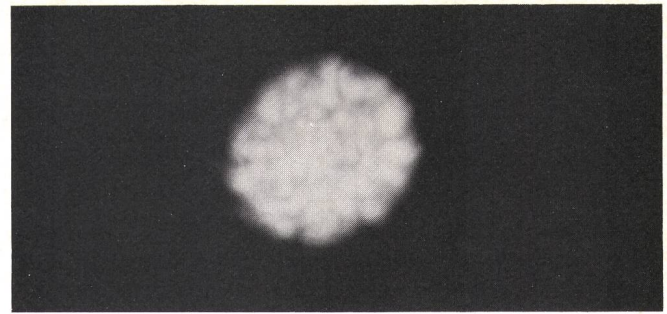


Fig. 7 Interferenzbild (speckle pattern) von Laserlicht am Ende der Faser
Verwendeter Laser: CSP
Faserlänge: 500 m
Kerndurchmesser: 50 μ m

7 Modal Noise und Reflexionen

Ein Vergleich zwischen gerechneten und gemessenen Werten der Rauschabstände (Fig. 6) zeigt, dass aufgrund der Rechnung bessere Werte zu erwarten wären. Der Unterschied der Resultate ist einem in der Rechnung nicht berücksichtigten Einfluss der Faser zuzuschreiben: Bei der Ankopplung von Fasern an Laser können nämlich Effekte auftreten, die eine erhebliche Beeinträchtigung der Signalqualität zur Folge haben. In diesem Zusammenhang sind vor allem das sogenannte Modal Noise (Rauschen erzeugt durch Interferenz der Moden, [10]) und Reflexionen von Licht an Faserenden und an Faser-Faser-Schweißungen zu erwähnen.

Modal Noise stellt in einem optischen Übertragungssystem eine von Faser- und Lasercharakteristik abhängige Rauschquelle dar. In Gradienten- und Stepindexfasern, die mehrere Lichtfortpflanzungswege (Fasermode) zulassen, können die verschiedenen Strahlen interferieren. Am Faserende sind die Interferenzbilder (Fig. 7) um so ausgeprägter, je grösser die Kohärenzlänge des eingekoppelten Lichtes ist und je kürzer die Fasern sind. Leichte Bewegungen der Faser bewirken eine Umverteilung der Ausbreitungsmoden des Lichtes, was zu einer Variation der Zahl der Interferenzen und zu einer örtlichen Verschiebung führt. Bei einer Faser-Faser-Kopplung mit kleinster Kernfehlanspassung ändert, je nach der mechanischen Beanspruchung der Verbindungsstelle, das von einer in die andere Faser gekoppelte Licht. Erhöhtes Rauschen und reduzierte Verzerrungsabstände [10, 11, 12 und 13] sind die Konsequenzen. Fig. 8 illustriert den Einfluss von Modal Noise auf die Rauschcharakteristik eines optischen Übertragungssystems mit einer Gradientenfaser von 500 m. Die verwendete Diode ist ein CSP-Lasertyp. Durch Biegung oder mechanische Vibrationen der Glasfaser wird der Rauschpegel durch zeitlich änderndes Modal Noise variiert: Die Differenzen zwischen Maximal- und Minimalwerten können in Extremfällen über 20 dB betragen.

Bei direkten Kopplungen (butt-joint) mit unverspiegelten Faserenden oder bei Faser-Faser-Schweißstellen ergeben sich leicht Reflexionen des Lichtes. Ein Teil dieses reflektierten Lichtes kann in die Laserkavität eindringen und das elektro-optische Verhalten, beispielsweise die Verzerrungscharakteristik, verändern.

Fig. 9 zeigt die Grundwelle sowie die erste und zweite Oberwelle des optischen Signals eines Lasers, der durch optische Rückkopplungen (von der Schnittflä-

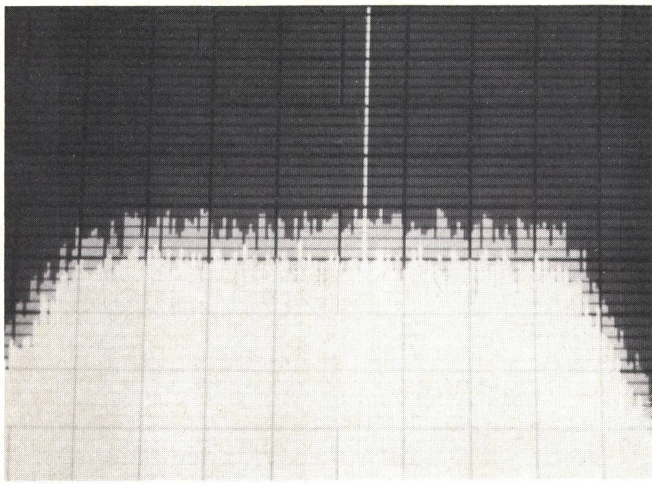


Fig. 8
Modal Noise bei einer Rauschmessung der Faserübertragungsstrecke mit einem Monomode-Laser (CSP) als optischem Sender. Durch Biegen der Faser wird das Interferenzbild in der Faser geändert. Der Rauschpegel des Übertragungssystems erhöht sich in diesem Beispiel um fast 10 dB
 Horizontal: 10 MHz/Div., Vertikal: 10 dB/Div.

che einer direkt gekoppelten Faser [butt-joint]) in seinem Betrieb gestört wird. Bei Arbeitspunktströmen über der Laserschwelle, wo der optisch unbeeinflusste Laser Verzerrungsabstände von mehr als 50 dB aufweist, nimmt in diesem Beispiel der Verzerrungsgehalt des Signals drastisch zu.

Die Erfahrungen mit Faserübertragungssystemen zeigen, dass der Effekt von Modal Noise durch die Verwendung von Lasern mit einer Vielzahl von longitudinalen Moden reduziert wird. Diese Laser weisen gegenüber Monomodelasern naturgemäss eine kleinere Kohärenz auf, was zu weniger stark ausgeprägten Interferenzen in der Faser führt. Monomodelaser, die auch verhältnismässig empfindlich auf leichte optische Reflexionen

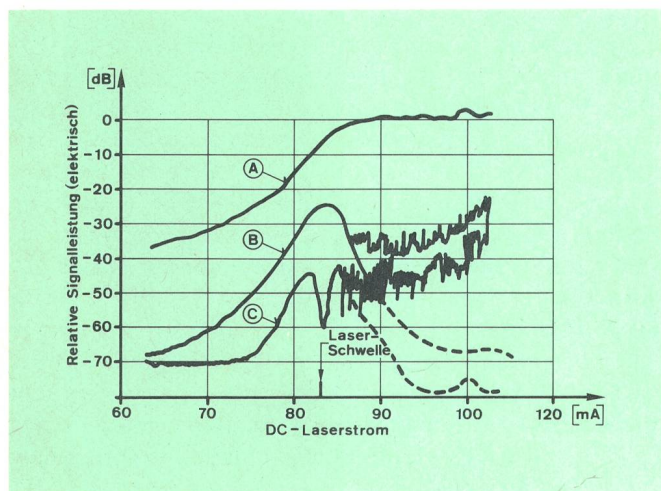


Fig. 9
Einfluss der optischen Rückkopplungen von einer angekoppelten Faser auf die Linearität der Laserstrahlung

Die gebrochene Linie deutet die Verzerrungsprodukte des optisch ungestörten Lasers an. Die optische Rückkopplung bewirkt eine starke Zunahme der Verzerrungen im lasenden Betrieb. Je nach Lage der Faser werden bessere oder schlechtere Werte gemessen.

Verwendeter Laser: Proton-bombardiert-Typ mit wenigen Longitudinalmoden

Modulationssignal: Sinussignal
 Frequenz: 20 MHz

- (A) Grundfrequenz (1. Harmonische)
- (B) 2. Harmonische
- (C) 3. Harmonische

reagieren, eignen sich daher weniger gut für AM-IM-Faserübertragungen mit direkt gekoppelten Multimodefasern.

8 Erhöhung der Übertragungsdistanz bei gleichbleibender Signalqualität

Durch Verbesserungen des Signalaufbereitungsteils des Systems kann eine signifikante Erhöhung der Übertragungsdistanz erwartet werden

1. *Phasenverkopplung der Bildträger.* Dadurch kann die Aussteuerung je Kanal erhöht werden, was zur Verbesserung des Rauschabstandes führt.
2. *Feinverschiebung der Frequenzlage der Träger.* Dadurch werden die IM-Störprodukte auf dem TV-Bild weniger sichtbar.
3. *Lage der Intermodulationsprodukte innerhalb der Kanäle.* Gemäss CCIR-Kurve können die in Tabelle I angegebenen Werte für die IM-Abstände je nach Frequenzlage der Störprodukte im Kanal um einige Dezibel gesenkt werden.

Für einen gegebenen Anwendungsfall — bekannte Distanz und festgelegte Kanalkombination — lässt sich durch Optimierung des Empfängers in bezug auf Sensitivität und Dynamik eine zusätzliche Verbesserung der Übertragungsqualität erzielen. Schliesslich wird die weitere Entwicklung von linearen Lasern mit hoher Ausgangsleistung die Übertragungsdistanz und Signalqualität günstig beeinflussen.

9 Resultate der FM-IM-Strecke

Die FM-IM-Übertragung über die beschriebene Strecke zeigte die erwartete Distanzerhöhung gegenüber dem AM-IM-System deutlich. Sowohl mit einem als auch mit zwei TV-Kanälen (Limitierung durch die Ausrüstung) konnten mehr als 10 km überbrückt werden (4 km Faser, der Rest wurde mit Graufiltern im optischen Pfad simuliert).

10 Schlussfolgerungen

Untersuchungen mit der an der ETH aufgebauten Faser-Übertragungsstrecke haben gezeigt, dass die Übermittlung von TV- und FM-Radio-Kanälen über Glasfasern mit der Methode der direkten Analogmodulation des Laserlichtes nach dem heutigen Stand der Technik möglich ist. Mit der im Labor betriebenen Strecke wurden durch eine Multimode-Gradientenindex-Faser zwei TV-Kanäle über etwa 4 km übertragen, wobei die Intermodulationsverzerrungen < -67 dB und der Video-Rauschabstand (unbewertet) am Ende der Strecke > 40 dB betragen. Vier TV- und sechs FM-Radio-Kanäle konnten unter den gleichen Qualitätsanforderungen über etwa 1 km übertragen werden.

Es stellte sich heraus, dass diese Signalqualitäten mit Multimodelasern verschiedener Bauweise erreichbar sind. Vor allem V-Nut- und Oxid-Streifen-Laser ergaben gute Resultate. Übertragungsversuche mit Monomodelasern, wie Channeled-Substrate-, Transverse Junction- und zinkdiffundierten Typen, bestätigten die Problematik ihrer Verwendung in der Multimode-Faserstrecke mit direkter Analogmodulation. Wegen erhöhtem Modal

Anhang A

Systemstudie

Figur 10 zeigt die Ergebnisse einer SNR-Rechnung für eine AM-IM- und FM-IM-Übertragung von TV- und Radioprogrammen. In diesem Abschnitt werden die verwendeten Gleichungen hergeleitet und diskutiert.

Die Abschätzung des SNR basiert auf einem Übertragungsmodell nach Figur 11. Auf der Senderseite müssen sowohl ein Nutzsignal als auch eine optische Rauschquelle berücksichtigt werden. Die Faser soll in dieser Abschätzung lediglich als passives optisches Dämpfungsglied mit einer Dämpfung α berücksichtigt werden.

Die von einem Diodenlaser emittierte optische Leistung weist statistische Schwankungen (optisches Rauschen) auf. Das Verhältnis der optischen Intensitätsrauschdichte ΔP^2 zur mittleren quadratischen optischen Leistung $(\bar{P}_o)^2$ erreicht bei der Laserschwelle ein Maximum und nimmt bei störungsfreien Lasern mit zunehmend höheren Strömen stetig ab. Als Rauschmass dient die von der Messanordnung unabhängige relative Intensitätsrauschdichte RIN [14]

$$RIN = \frac{\Delta P^2(f)}{(\bar{P}_o)^2} [s] \quad (1)$$

Die RIN-Werte bei DC-Arbeitspunkten im linearen Teil der Licht-Strom-Kennlinie liegen je nach Lasertyp zwischen 10^{-16} und 10^{-13} s. Auf der Empfängerseite addieren sich zu diesem Rauschterm noch das Schrotrauschen ($2eI_{ph} \cdot B$) der PIN-Diode (I_{ph} = DC-Fotostrom) und das Eigenrauschen des Empfängers ($2eI_N \cdot B$) (I_N = äquivalenter Rauschstrom des Empfangsverstärkers, B = Messbandbreite, e = Elektronenladung). Für die Berechnung muss zudem noch die Tatsache berücksichtigt werden, dass das Licht der Laserdiode mit einem bestimmten Wirkungskoeffizienten ξ (< 1) in die Faser eingekoppelt wird und dass jeder Detektor eine gewisse Empfindlichkeit (k_D in $A/W < 1$) hat.

AM-IM-Übertragung

$$SNR_{AM}(l) = \frac{(P_o \cdot m \cdot \xi \cdot k_T \cdot k_D \cdot e^{-\alpha l} / N)^2}{((P_o \cdot \xi \cdot e^{-\alpha l} k_D)^2 RIN + 2e(I_N + P_o \cdot \xi \cdot e^{-\alpha l} \cdot k_D)) \cdot B} \quad (2)$$

N = Anzahl äquivalenter Fernsehkanäle

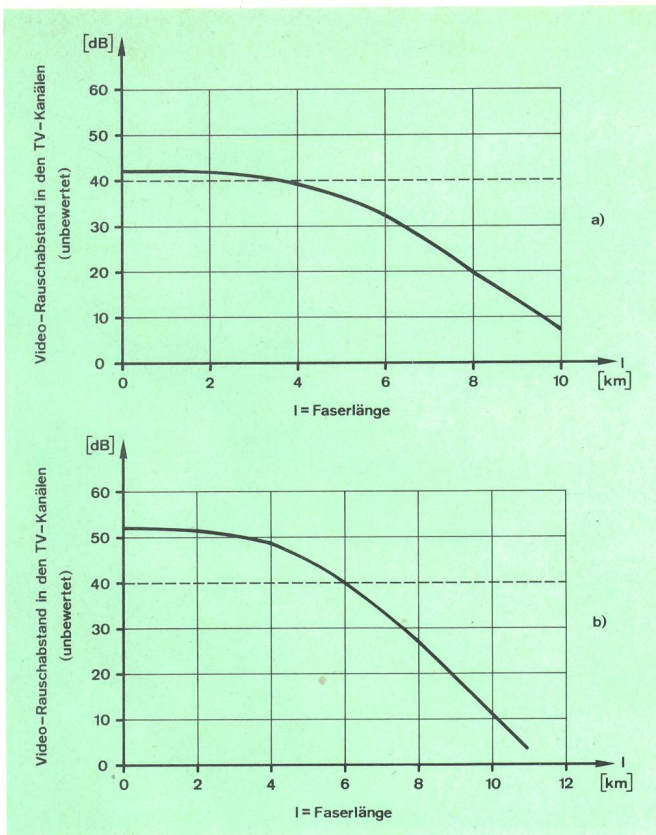


Fig. 10
Gerechnete Videorausabstände als Funktion der Faserlänge bei der Übertragung von vier TV- und sechs FM-Radiokanälen mit Amplituden- beziehungsweise Frequenzmodulation

Die Übertragung von frequenzmodulierten TV-Kanälen bringt gegenüber der Analogmodulation eine deutliche Anhebung der Rauschabstände. Der Frequenzhub ist zu 4 MHz angenommen. Das optische Rauschen der Laserdiode und die optischen Signalleistungen sind für beide Berechnungen dieselben: RIN: 10^{-14} s, optische Peak-peak-Leistung: 3 mW_{p-p}

Noise und der Sensitivität dieser Laser auf optische Rückkopplungen konnten die spezifizierten Bild- und Tonqualitäten nur knapp oder gar nicht erreicht werden.

Das untersuchte System wurde mit Lasern und Fasern im $0,8 \dots 0,9 \text{ }\mu\text{m}$ -Wellenlängengebiet aufgebaut. Um die Möglichkeiten der Analogmodulation für die TV-Übertragung abschliessend zu beurteilen, sind Arbeiten mit Monomodelasern und -fasern im $0,8 \text{ }\mu\text{m}$ - sowie mit lichtemittierenden Dioden (LED) und Lasern im $1,3 \dots 1,6 \text{ }\mu\text{m}$ -Gebiet im Gange. Der Einsatz von Fasern mit niedrigerer Dämpfung verspricht eine signifikante Distanzerhöhung bei gleichbleibender Bildqualität.

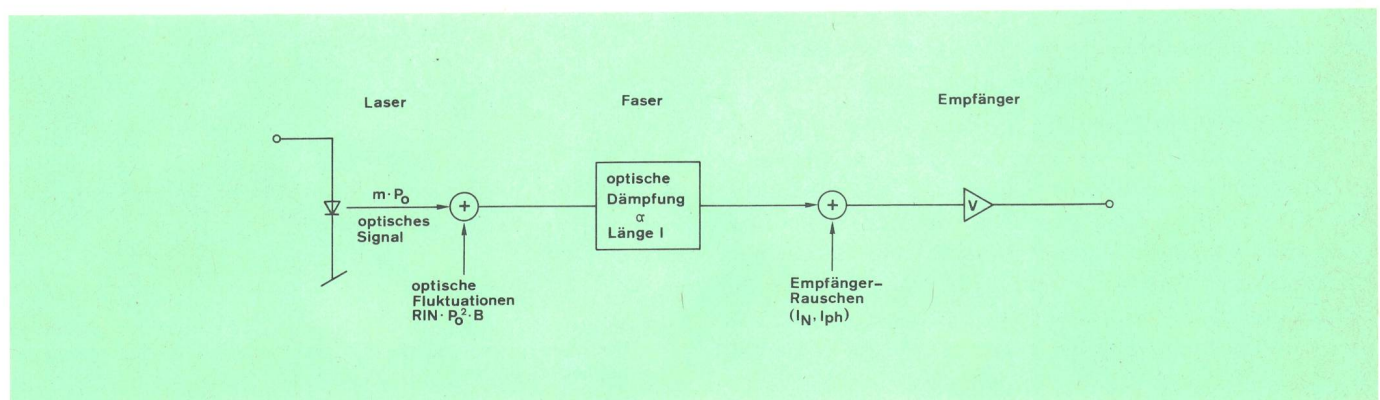


Fig. 11
Übertragungsmodell zur Berechnung des Rauschabstandes bei einer faseroptischen Analogübertragung

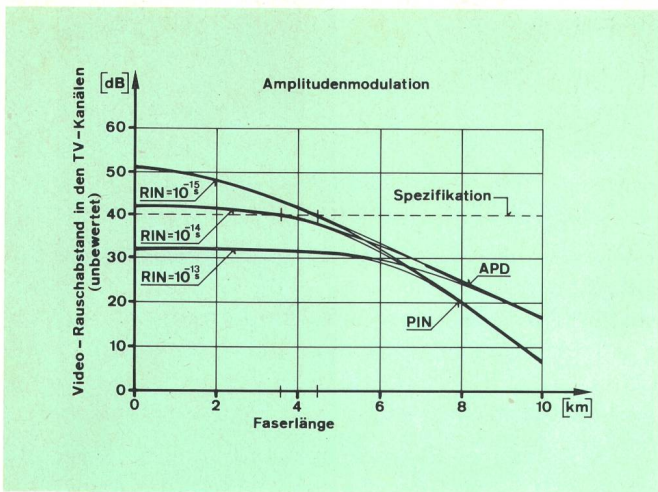


Fig. 12 Video-Rauschabstand (SNR) in den TV-Kanälen bei Übertragung von vier TV- und sechs FM-Radioprogrammen (gerechnet)

Bei kurzen Distanzen wirkt das optische Rauschen der Senderdiode (RIN) limitierend auf das SNR in den TV-Kanälen. Bei grösseren Distanzen dominiert das Empfängerrauschen. Bei guten Multimodelasern beträgt das Rauschen der Senderdiode im Arbeitspunkt $\sim 10^{-14}$ s. Der Einsatz einer Avalanche-Foto-Diode (APD) anstelle einer PIN-Diode bringt in dieser Anwendung keinen nutzbaren Gewinn an Rauschabstand.

$P_o = 5 \text{ mW}$
 $m = 0,1 \text{ je Kanal}$
 $\alpha = 0,806/\text{km} \approx 3,5 \text{ dB/km}$

$k_T =$ Leistungsanteil des Bildträgers an der gesamten optischen Signalleistung

$l =$ Länge der Strecke

HF- und Video-Rauschabstand lassen sich ineinander überführen [15]

$$\text{SNR}_{\text{video}} = \frac{1}{5} \text{SNR}_{\text{HF}} \quad (3)$$

Figur 12 zeigt die numerische Auswertung von Funktion (2) für vier TV- und sechs FM-Radio-Kanäle. Die Glasfaserdämpfung wurde mit $0,806 \text{ N/km}$ angesetzt, was einer optischen Dämpfung von $3,5 \text{ dB/km}$ entspricht. Als Parameter dienten die RIN-Werte. Für k_D und I_N wurden $0,5 \text{ A/W}$ beziehungsweise $70 \mu\text{A}$ eingesetzt. Wie aus der Darstellung hervorgeht, ist der Rauschbetrag des RIN bei kleinen Faserlängen dominant und setzt die Limite für ein maximal erreichbares SNR. Bei verhältnismässig grossen Faserlängen sind nur noch α und I_N für den Rauschabstand massgebend. I_N bestimmt den Kurvenknickpunkt bezüglich der Horizontalen, während die Steigung des abfallenden Astes im wesentlichen durch die Faserdämpfung α gegeben ist.

Um alle TV- und Audio-FM-Signale mit den geforderten Rauschabständen zu übertragen, ist nach Figur 12 ein Laser mit einem RIN von weniger als 10^{-14} s erforderlich. Eine Verbesserung des SNR ist durch eine Anhebung der optischen Signalleistung P_o oder durch eine Reduktion der Kanalzahl N möglich. Der Erhöhung der Signalamplitude sind in der Praxis Grenzen gesetzt, da dies eine Vergrösserung der Verzerrungen zur Folge hat.

Aus Figur 12 ist auch ersichtlich, wie sich das SNR verändert, falls man anstelle einer PIN-Diode eine Avalanche-Fotodiode (APD) als optischen Detektor verwenden

det. Dabei ist für den Exzessrauschfaktor F die nach [16] experimentell ermittelte Beziehung (4) eingesetzt

$$F \approx M^x; x = 0,5 \quad (4)$$

$M =$ Avalanche-Verstärkung

M wurde so optimiert, dass das SNR am Empfänger-ausgang maximal ist. Für die optimale Avalanche-Verstärkung gilt

$$M_{\text{opt}} = \left| \frac{2 \cdot I_N}{x(I_{\text{ph}} \cdot I_D)} \right| \frac{1}{2+x} \quad (5)$$

$I_D =$ Dunkelstrom

Es zeigt sich, dass die höhere Empfindlichkeit der APD im betrachteten System keine nutzbare Verbesserung des SNR bringt.

FM-IM-Übertragung

Liegt am Eingang eines idealen FM-Empfängers ein Signal mit überlagertem weissen Rauschen, so lässt sich der Signal-Rauschabstand wie folgt berechnen (zum Beispiel [17, 18])

$$\text{SNR}_{\text{video}} = 3 \cdot \left(\frac{\Delta f}{B_o k} \right)^2 \cdot \bar{x}^2(t) \cdot \frac{1}{B_o k} \frac{S_1}{\eta} \quad (6)$$

Δf maximaler Frequenzhub

B_o 3-dB-Bandbreite des NF-Filters

k Korrekturfaktor

$x(t)$ modulierendes Signal

η Rauschleistungsdichte am FM-Empfänger

S_1 elektrische Signalleistung am FM-Empfänger

Da die 3-dB-Bandbreite und die Rauschbandbreite eines realen NF-Filters nicht übereinstimmen, wurde der Korrekturfaktor k eingeführt. Die Übertragungsbandbreite B_T eines Kanals beträgt nach Carson

$$B_T \approx 2(\Delta f + B_1) \quad (7)$$

$B_1 =$ Bandbreite des modulierenden Signals

Für $x(t)$ ist in (6) der Amplitudenunterschied von 0,7 zwischen dem Schwarz- und dem Weisspegel eines TV-

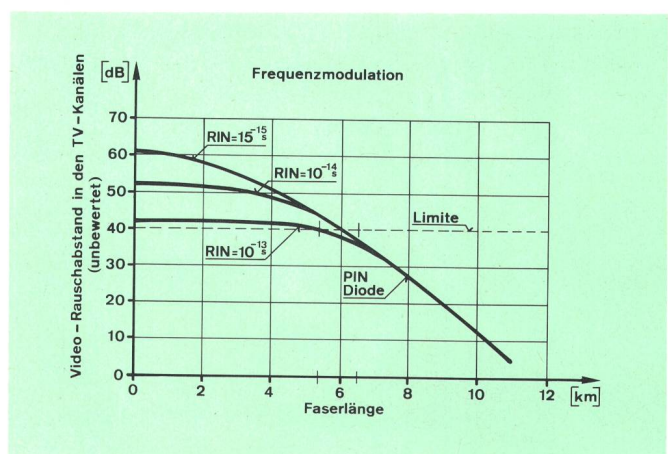


Fig. 13 Rauschabstand (SNR) in den TV-Kanälen als Funktion der Faserlänge bei der Übertragung von vier TV- und sechs FM-Radioprogrammen (gerechnet)

$P_o = 5 \text{ mW}$
 $m = 0,1 \text{ je Kanal}$
 Frequenzhub 4 MHz
 $\alpha = 0,806/\text{km} \approx 3,5 \text{ dB/km}$

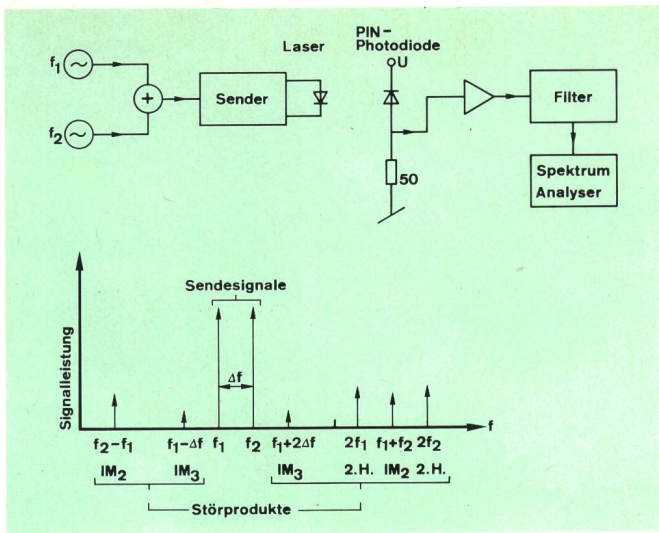


Fig. 14
Messschema zur Bestimmung der Licht-Strom-Linearität von Laserdioden

Video-Signale mit der Normamplitude 1 einzusetzen. Unter der Annahme, der FM-Demodulator habe ein Besselfilter vierter Ordnung mit der 3-dB-Bandbreite B_o , erhält k in (6) den Wert 1,317 [18].

Damit wird der Signal-Geräusch-Abstand im Videoband (6)

$$SNR_{\text{video}} = \frac{3 \cdot 2}{2,28} \left(\frac{\Delta f}{B_o} \right)^2 \cdot \frac{S_1}{B_o \eta} \quad (8)$$

Der FM-Trägerrauschabstand $\frac{S_1}{\eta}$ ergibt sich zu

$$\frac{S_1}{\eta} = \frac{(P_o \cdot m \cdot \xi \cdot k_T \cdot k_D)^2 e^{-2\alpha l} / N^2}{(P \cdot \xi \cdot e^{-\alpha l} \cdot k_D)^2 \cdot RIN + 2e(l_N + P \cdot \xi \cdot e^{-\alpha l} \cdot k_D)} \quad (9)$$

In Fig. 13 ist (8) für verschiedene RIN ausgewertet, wobei für S_1/η die Gleichung (9) eingesetzt wurde. Die optischen Parameter sind dieselben wie für die AM-IM-Übertragung in Fig. 12. Die grösseren Störabstände, die FM gegenüber AM aufweist, sind offensichtlich. Da die Faserübertragungskapazität etwa 800 MHz·km beträgt, stört der vergrößerte Bandbreitebedarf der FM-IM-Übertragung nicht.

Modal Noise ist vor allem eine Funktion der Faser, der Faser-Faser-Kopplungen sowie des Lasers. Eine allgemeine analytische Erfassung des Effekts ist sehr schwierig und wurde deshalb nicht in die Berechnungen einbezogen. In den Darstellungen der Figuren 12 und 13 hätte diese Rauschquelle eine Verschiebung der SNR-Kurven gegen tiefere Werte zur Folge.

Anhang B

Messmethode zur Bestimmung von Nicht-linearitäten optischer Komponenten

Zur Messung der Linearität nach der 2-Sender-Methode wird das zu charakterisierende Element mit zwei amplitudengleichen Sinussignalen verschiedener Frequenzen moduliert. Die durch die Nichtlinearität generierten Verzerrungen sind Intermodulationsprodukte und Harmonische der Modulationssignale. Um von der Signalqualität der Sinusgeneratoren unabhängige Resultate zu erhalten, werden nur Intermodulationsprodukte gemessen.

Fig. 14 zeigt einen schematischen Messaufbau, der für die Linearitätsmessung lichtemittierender Elemente geeignet ist.

Adressen der Autoren: Rudolf Welter, Hanspeter Berger, Georg Guekos, Andres Dill, Armin Sollberger und Hans Melchior, Gruppe Optoelektronik, Institut für angewandte Physik, ETH Hönggerberg, 8093 Zürich. Werner Steffen, Generaldirektion PTT, Abteilung Forschung und Entwicklung, 3030 Bern.

Bibliographie

- [1] Jäckel H. Lichtemissionsrauschen und dynamisches Verhalten von GaAlAs-Heterostruktur-Diodenlasern im Frequenzbereich von 10 MHz bis 8 GHz. Zürich, Dissertation ETH Nr. 6447, 1980.
- [2] Melchior H. Noise in Semiconductor Lasers: Topical Meeting on Integrated + Guided-Wave Optics. Nevada, January 30, 1980.
- [3] Paoli T. L. Intrinsic Fluctuations in the Output of Heterostructure Junction Lasers Operating Continuously at 300 °K. New York, Applied Physics Letters 24 (1974) 4, p. 187.
- [4] Aiki R. et al. Transverse Mode Stabilized $Al_xGa_{1-x}As$ Injection Lasers with Channeled Substrate-Planar Structure. New York, IEEE Journal of Quantum Electronics QE-14 (1978) 2.
- [5] Wolk C. et al. Criteria for Designing V-Groove Lasers. New York, 7th IEEE International Semiconductor Laser Conference, September 8–10, 1980.
- [6] Arnold G. Long-Term Behavior of V-Groove Lasers at Elevated Temperature. New York, 7th IEEE International Semiconductor Laser Conference, September 8–10, 1980.
- [7] Nakamura M. Single Mode Operation of Semiconductor Injection Lasers. New York, IEEE Transactions on Circuits and Systems CAS 26 (1979) 12.
- [8] Maeda M., Nagano K. and Saito K. Harmonic Distortion in Semiconductor Injection Lasers. Amsterdam, 5th European Conference on Optical Communication, September 17–19, 1979.
- [9] Kuwahara H. Efficient and Reflection Insensitive Coupling from Semiconductor Lasers into Tapered Hemispherical-End Single Mode Fibers. York, Proceedings of the 6th European Conference on Optical Communication, 1980.
- [10] Epworth R. E. The Phenomenon of Modal Noise in Analogue and Digital Optical Fiber Systems. Genua, 4th European Conference on Optical Communication, 1978.
- [11] de Marchais G. Modal Noise on Optical Fibers. York, 6th European Conference on Optical Communication, 1980.
- [12] Petermann K. Nonlinear Distortions Due to Fiber Connectors. York, 6th European Conference on Optical Communication, 1980.
- [13] Hirota O. and Suematsu Y. Noise Properties of Injection Lasers Due to Reflected Waves. New York, IEEE Journal of Quantum Electronics QE-15 (March 1979) 3.
- [14] McCumber D. E. Intensity Fluctuations in the Output of CW Laser Oscillators. Physical Review 141 (January 1966) 1.
- [15] Technische Grundforderungen für die Übertragungsqualität von Gemeinschaftsantennenanlagen. Bern, Generaldirektion PTT, Abt. Forschung und Entwicklung, 1974.
- [16] Horak W. Analog TV Signal Transmission over Multimode Optical Waveguides. Berlin, Siemens Forschungs- und Entwicklungs-Bericht 5 (1976) 4, S. 194.
- [17] Carlson A. B. Communication Systems. Mc Graw Hill, 1975.
- [18] Downing J. J. Modulation Systems and Noise. Prentice Hall, 1964.
- [19] Berger H. P., Welter R., Dill A., Guekos G. and Melchior H. Tradeoffs between Noise Distortion and Fibre Length for Multichannel Analog TV-Transmission over Graded-Index Fibres at 0,83 μm . Electronics Letters 17 (1981) 22, p. 844.
- [20] Berger H. P., Welter R., Dill A., Guekos G. and Melchior H. Multichannel TV-Transmission over Graded-Index Fibres Using Analog Modulation with Low Distortion and Low Noise. Copenhagen, 7th European Conference on Optical Communication (ECDC), September 1981, p. 16.3.1.