Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 83 (1992)

Heft: 13

Artikel: Möglichkeiten und Grenzen der optischen Übertragung in Kabelfernsehnetzen

Autor: Gao, Yu / Leuthold, Peter

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902840

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: 24.12.2025

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

Möglichkeiten und Grenzen der optischen Übertragung in Kabelfernsehnetzen

Yu Gao und Peter Leuthold

Ausgehend von den Anforderungen für die analoge und digitale Übertragung von Fernsehsignalen werden die Eigenschaften optischer Komponenten diskutiert. Es wird gezeigt, welche Grenzen bei AM/VSB, FM und digitalen Verfahren zu beachten und welche Systemverbesserungen in nächster Zeit zu erwarten sind. Abschliessend erfolgt ein Ausblick auf zukünftige Möglichkeiten, die sich durch neue Komponenten wie zum Beispiel optische Verstärker ergeben.

Les propriétés des composants optiques sont discutées dans le cadre des exigences relatives à la transmission analogique et digitale de signaux de télévision. On présente les limites des procédés AM/VSB, FM et digitaux ainsi que les améliorations des systèmes auxquelles on peut s'attendre dans un proche avenir. Pour conclure, on donne un aperçu des possibilités futures qu'offrent les nouveaux composants tels que par exemple les amplificateurs optiques.

Adresse des Autors
Yu Gao, Dipl. El.-Ing. ETH und Prof. Dr. *Peter Leuthold*, Institut für Kommunikationstechnik, ETH Zentrum, 8092 Zürich.

Die Schweiz ist mit flächendeckenden Kabelfernsehnetzen in besonders hohem Masse erschlossen: Über 80% der Haushalte beziehen ihre Programme via Kabel. Ursprünglich für 3 Kanäle im Bereich zwischen 47 und 68 MHz und für 25 Kanäle zwischen 125 und 300 MHz zu je 7 MHz Bandbreite geplant, erfolgt heute eine allmähliche Erweiterung der Netze um zusätzliche zwei oder drei Dutzend Kanäle zu je 8 MHz bzw. 12 MHz Bandbreite bis 600 MHz. Damit scheint aber noch keine Grenze erreicht zu sein, denn man spricht schon von einem weiteren Ausbau bis etwa 1 GHz. Ferner wird daran gedacht, mittels Videodatenkompression nochmals eine massive Vergrösserung des Kanalangebotes zu erzielen. Eine so hohe Zahl von Fernsehkanälen pro Teilnehmer ist durchaus realistisch, wenn man an die Menge der heute angebotenen Satellitenkanäle sowie an das Potential des Pay-TV denkt.

Das Koaxialkabel als Übertragungsmedium zeigt allerdings bei einer Ausdehnung des Signalbandes bis gegen 1 GHz deutliche Grenzen, die sich vor allem durch Dämpfungsbeläge je nach Kabeltypen von 15 bis 30 dB/km und mehr äussern. Praktisch bedeutet dies, dass in Abständen von wenigen 100 m Hochfrequenzverstärker eingesetzt werden müssen, was natürlich bei den heute zum Einsatz gelangenden, vorwiegend analogen Übertragungsverfahren, zu einer Verschlechterung des Störabstandes sowie zu einem merklichen Anstieg der nichtlinearen Verzerrungen führt. Sehr aufwendig sind auch die Stromversorgung sowie der Unterhalt der vielen Zwischenverstärker. Es liegt daher nahe, nach günstigeren Übertragungsmedien und passenden Signalaufbereitungsverfahren zu suchen. Dabei muss aber mit der Auflage gerechnet werden, dass in naher Zukunft die Fernsehgeräte beim Teilnehmer immer noch mit analogen Verfahren wie zum Beispiel PAL oder MAC bzw. HD-MAC arbeiten.

Für die Breitbandübertragung auf langen Strecken hat bekanntlich der Lichtwellenleiter dank seiner geringen Dämpfung schon heute eine dominante Stellung erreicht. Auch in Kabelfernseh-Netzen (CATV) sind optische Übertragungssysteme mit digitalen Modulationsverfahren als Zubringer schon seit vielen Jahren im Einsatz. Die Anwendung analoger Übertragungsverfahren stand anfänglich zufolge der Nichtlinearität der optoelektronischen Komponenten nicht zur Diskussion; man benützte entweder digitale Basisbandübertragung oder ein auf Subträger-Multiplexierung (SCM) basierendes digitales Modulationsverfahren. Mit den Fortschritten der Technologie war es möglich, Videosignale mittels analoger Frequenzmodulation (FM-SCM) zu übertragen, und heute haben die kritischen Elemente, nämlich die Laserdioden, einen Grad an Linearität erreicht, der den Einsatz von SCM mit Amplituden- bzw. Restseitenbandmodulation (AM/VSB) erlaubt, das heisst, dass das Hochfrequenz-Multiplexsignal im VHF- und UHF-Band bis 300 oder 600 MHz und mehr direkt in ein entsprechend intensitätsmoduliertes Lichtsignal umgewandelt und über ein Glasfaserkabel übertragen werden kann.

Die Entwicklung der CATV-Netze ist damit vorgezeichnet: Zunächst wird ein Übergang zu hybriden Netzen mit einem sogenannten *Fiber Backbone* bis zu den Quartierverteilstellen bzw. bis zu den einzelnen Gebäuden stattfinden (Fiber to the Curb), von wo aus der Anschluss zum Teilnehmer über die bestehenden

Koaxialkabel erfolgt. In fernerer Zukunft erfolgt dann die Realisierung eines reinen Glasfasernetzes (Fiber to the Home) im Rahmen des Breitband-ISDN-Konzeptes, bei dem bekanntlich eine ausschliesslich digitale Übertragung vorgesehen ist.

Im Hinblick auf diese Entwicklung geht es im folgenden darum, die Anforderungen an die analogen und digitalen Übertragungsverfahren hinsichtlich Rauschstörungen und Verzerrungen aufzuzeigen. Hernach werden die Komponenten faseroptischer Systeme bezüglich ihrer Eignung für die Fernsehsignalübertragung untersucht. Daraus ergeben sich Grenzen für die maximal erreichbaren Übertragungsdistanzen oder ganz allgemein die Anforderungen an das Leistungsbudget von Systemen mit unterschiedlichen Modulationsverfahren. Nach einer Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse erfolgt abschliessend eine Diskussion der zu erwartenden Entwicklungen, insbesondere auch unter Berücksichtigung der inskünftig zur Verfügung stehenden optischen Verstärker.

Übertragungsverfahren	**SNR** (bewertet) oder **BER**	Gewinne (Bewertung, Modulation, Pre- und Deemphasis)	HF-Rauschabstand **CNR**	Bildqualität
AM/VSB	50 dB	7 dB	43 dB	CATV
(B=5MHz)	56 dB	7 dB	49 dB	Studio
FM	50 dB	32 dB	18 dB	CATV
(B=26MHz)	56 dB	32 dB	24 dB	Studio
BFSK	10^{-9}	—	15.6 dB	—
BPSK	10^{-9}	—	12.6 dB	—

Tabelle I Vergleich verschiedener Modulationsarten

Grundanforderungen an die Übertragungsverfahren

Wie bereits einleitend erwähnt, können für die optische Übertragung von Vielkanal-TV-Signalen verschiedene Modulations- bzw. Multiplexierungsverfahren verwendet werden. Zeitmultiplexierung (Time Division Multiplexing, TDM) kommt bei digitaler Basisbandübertragung der Videosignale zum Einsatz. TDM-Systeme erfordern auf der Empfängerseite eine aufwendige Datentaktrückgewinnung, was im Gigabit-Bereich Schwierigkeiten bereiten kann. Der praktische Einsatz digitaler Basisbandübertragung wird daher erst erwartet, wenn leistungsfähige Kompressionsverfahren für Videodaten verfügbar sind, und selbst dann nur in speziellen Anwendungsbereichen. Bei der Subträger-Multiplexierung (SCM) werden die einzelnen Träger mit den analogen oder digitalen TV-Signalen moduliert. Dies bietet den Vorteil, dass konventionelle elektronische HF-Komponenten verwendet werden können. SCM stellt deshalb eine wirtschaftlich attraktive Möglichkeit für die Anwendung in CATV-Netzen dar.

Für die Beurteilung der TV-Bildqualität sind unter anderem zwei Grössen sehr wichtig, nämlich der minimal zulässige Störabstand (Signal-to-Noise Ratio, SNR) sowie die tolerierbaren nichtlinearen Verzerrungen. Hinsichtlich Rauschstörungen haben sich auch die Begriffe Träger-zu-Geräuschleistung-Verhältnis (Carrier-to-Noise Ratio, CNR) oder HF-Rauschabstand eingebürgert. Die Messung des CNR kann vor der Demodulation vorgenommen werden; dies stellt weniger hohe Anforderungen an die Messprozedur. Die Charakterisierung der Übertragungsqualität durch die Angabe des SNR oder CNR ist äquivalent, da eine Umrechnung zwischen den beiden Grössen möglich ist.

Um eine Vergleichsbasis der Übertragungsqualität für alle Modulationsarten zu schaffen, wird im folgenden die von der Schweizer PTT vorgeschriebene Qualitätsnorm [1] betrachtet, welche bei AM/VSB-Übertragung einen HF-Rauschabstand von 43 dB vor der Verteilung im Haus als minimalen Wert ansetzt. Laut CCIR [2] entspricht diese Zahl nach der Detektion und nach einer subjektiven Bewertung der Bildqualität einem SNR von etwa 50 dB. Die Differenz von 7 dB gilt genaugenommen nur für die TV-Norm PAL B oder G.

Bei einem FM-TV-Signal kann das auf gleiche Weise bewertete SNR mit einem wesentlich kleineren HF-Rauschabstand erzielt werden. Der Gewinn ist dabei hauptsächlich auf die Bandbreite-Erweiterung zurückzuführen. Ferner trägt die speziell bei FM-Systemen eingesetzte Pre- und Deemphasis sowie das nach der Demodulation entstehende parabelförmige Rauschspektrum zur Verbesserung der Bildqualität bei. Tabelle I zeigt einen Vergleich von AM und FM. Dabei entspricht ein SNR von 50 dB für beide Verfahren dem erwähnten minimal erforderlichen Rauschabstand, während eine Übertragung in Studio-Qualität ein SNR von mindestens 56 dB erfordert. Es sei angenommen, dass FM-Signale das bei der Satelliten-TV-Übertragung übliche Signalformat (z.B. TV-Signale des Satelliten Astra) haben. Offensichtlich ist bei FM ein wesentlich kleineres CNR erforderlich; für PAL-FM-Signale beträgt dieses ungefähr 18 dB für CATV- bzw. 24 dB für Studio-Qualität.

Für die digitale Basisbandübertragung und für SCM-Systeme mit digitalen Modulationsverfahren stellt die Bitfehlerwahrscheinlichkeit (Bit Error Ratio, BER) die massgebende Grösse für die Übertragungsqualität dar. Welche BER einem bestimmten SNR entspricht, hängt aber sehr stark von der Codierung des digitalen Videosignals ab. Es wird generell eine BER von 10^{-9} angestrebt. Für ein SCM-System ergibt sich damit gemäss [3] bei Verwendung von BPSK (Binary Phase Shift Keying) ein CNR von 12,6 dB und für BFSK (Binary Frequency Shift Keying) ein solches von 15,6 dB (Tab. I). Auch hier tauscht man ähnlich wie bei FM Bandbreite gegen Störabstand ein. Nur ist die spektrale Verbreiterung bei digitalen Modulationsarten noch grösser als bei FM: Ein nichtkomprimiertes Composit-Farbfernsehsignal besitzt beispielsweise eine Datenrate von etwa 140 Mbit/s, während bei einem HDTV-Signal sogar 1 Gbit/s erreicht wird. Die Suche nach effizienten und gleichzeitig kostengünstigen Datenkompressionsverfahren hat deshalb einen besonderen Stellenwert im Rahmen entsprechender Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

Im Unterschied zur Beschreibung der Auswirkungen von Rauschstörungen gibt es noch keine befriedigende Erfassung des Einflusses der nichtlinearen Verzerrung auf die subjektive Bildqualität. Ein ingenieurmässiger Ansatz besteht darin, dass man entsprechend dem SNR den Verzerrungsabstand (Carrier-to-Distortion Ratio, CDR) einführt.

Eignung optoelektronischer Komponenten für die Fernsehsignalübertragung

Während die heute installierten Glasfaserkabel internationalen Normen entsprechen müssen, ist die Wahl der optoelektronischen Komponenten wie Lichtquellen, Photodetektoren usw. den Betreibern überlassen. Die Standard-Singlemode-Glasfasern (SM-Faser) sind heute für den Wellenlängenbereich von 1,3 μm ausgelegt, da das Dispersionsminimum bei dieser Wellenlänge liegt. Optische Übertragungssysteme können aber je nach Anwendung auch Licht bei Wellenlängen von 0,8 oder 1,55 μm verwenden. Generell sind 1,3-μm-Systeme zu bevorzugen, da bei anderen Wellenlängen Probleme hinsichtlich grösserer Dämpfung (bei 0,8 μm) oder chromatischer Dispersion (bei 1,55 μm) auftreten. Im folgenden wird eine Übersicht über faseroptische Komponenten in Übertragungssystemen für Vielkanal-TV-Signale angegeben, wobei für die unterschiedlichen Modulationsverfahren auch jeweils die wirtschaftlich günstigsten Komponenten betrachtet werden.

Lichtquellen

Für die optische Übertragung von Vielkanal-TV-Signalen werden als Lichtquellen ab etwa 5 Kanälen ausschliesslich Laserdioden (LD) verwendet, da sie im Vergleich zu den lichtemittierenden Dioden (LED) neben der grösseren Einkopplungseffizienz auch eine grössere Modulationsbandbreite und eine bessere Linearität aufweisen. Die LD mit Fabry-Perot-Struktur können zwar sehr breitbandig moduliert (bis zu 20 GHz) und kostengünstig hergestellt werden, haben aber einen ziemlich hohen Rauschpegel (Relative Intensity Noise: RIN > -140 dB/Hz). Sie sind deshalb nur für Übertragungssysteme mit FM oder digitaler Modulation geeignet. Für AM-Übertragungssysteme müssen die rauschärmeren DFB-LD (Distributed Feedback) eingesetzt werden (RIN < -145 dB/Hz). Diese Art der LD emittiert nur eine schmale Spektrallinie und kann deshalb auch im stark dispersiven Wellenlängenbereich von 1,55 μm verwendet werden.

Photodetektoren

Im Vergleich zu den Lichtquellen ist die Wahl der Photodetektoren im Wellenlängenbereich 1,3 oder 1,55 μm weniger problematisch. Die PIN-Photodioden sind allerdings den APD (Avalanche-Photodioden) vorzuziehen, da erstere einen kleineren Rauschbeitrag liefern und eine viel bessere Linearität aufweisen. Die Bandbreite der optischen Empfänger mit PIN-Dioden wird normalerweise durch die nachfolgenden elektronischen Vorverstärker limitiert: PIN-Dioden haben eine obere Grenzfrequenz von über 40 GHz, optische Empfänger mit PIN-Dioden und hochsensitiven rauscharmen Vorverstärkern in Si- oder GaAs-Technologie weisen hingegen nur einen solchen von etwa 20 GHz auf.

Faserverbindungen

Faserverbindungen können durch Spleisse oder durch Stecker realisiert werden. Im Unterschied zu den relativ schmalbandigen Lokalnetzen (LAN) sind bei der Vielkanal-TV-Übertragung die Ansprüche an eine Faserverbindungsstelle bezüglich Übergangsdämpfung und Reflexion ziemlich hoch. Eine Spleiss-Stelle hat eine sehr kleine Dämpfung ($< 0{,}1$ dB) und eine auf jeden Fall vernachlässigbare Reflexion und stellt deshalb die ideale Verbindung zwischen zwei Fasern dar. Bei einem optischen Faserstecker liegen wesentlich andere Verhältnisse vor. Für Verteilnetze mit AM wird von solchen Verbindungsstellen eine Reflexion von weniger als -50 dB erwartet. Derart geringe Werte können heute nur mit Schrägschliff-Technik und Superpolishing am Faserende erreicht werden. Für die Fernsehübertragung mit FM oder digitaler Modulation sind höhere Werte zulässig, typischerweise -30 dB. Somit eignen sich hierfür auch die normalen Stecker mit senkrecht zur Achse geschliffenen Faserenden.

Externe Modulatoren

Speziell für Übertragungssysteme mit 1,55-μm-Licht kann eine DFB-Laserdiode nicht mehr ohne weiteres direkt, d.h. durch eine Variation des Laserstromes moduliert werden, da das direkt modulierte Lichtsignal gleichzeitig eine Frequenzmodulation (Chirping) erleidet. Diese führt ihrerseits durch den Einfluss der chromatischen Dispersion in der Faser zu einer starken nichtlinearen Verzerrung. Die Übertragungsdistanz wird dadurch auf wenige Kilometer beschränkt, und der Vorteil der verlustarmen Übertragung kommt bei dieser Wellenlänge gar nicht zum Tragen. Um dieses Problem zu umgehen, bemüht man sich in der Forschung um alternative chirpfreie Modulationsverfahren wie zum Beispiel externe Intensitätsmodulation. Tatsächlich ist es möglich, einen Lichtstrahl zum Beispiel mit einem sogenannten Mach-Zehnder-Interferometer in seiner Intensität zu modulieren. Wegen der statischen Nichtlinearität dieser Komponente ist die Bandbreite für AM-Anwendungen jedoch auf höchstens 1 GHz beschränkt. Eine Linearisierung würde aufwendige Massnahmen bedingen.

Optische Verstärker

Einer der wichtigsten Fortschritte in der optischen Übertragungstechnik besteht ohne Zweifel in der Verfügbarkeit optischer Verstärker. Man unterscheidet hierbei zwischen Halbleiterlaserverstärkern und optischen Faserverstärkern. Erstere basieren auf einer Lichtverstärkung in der aktiven Laserschicht und können in allen üblichen Wellenlängenbereichen realisiert werden. Verstärkungsfaktoren von bis zu 30 dB bei einer Rauschzahl von 5 dB sind typische Parameter dieser Elemente. Optische Faserverstärker arbeiten heute vor allem bei einer Lichtwellenlänge von 1,55 μm. Sie bestehen aus einem Erbium-dotierten Faserstück von einigen Metern Länge, das durch eine andere Lichtquelle (meistens mit einer Wellenlänge von 0,98 oder 1,48 μm) gepumpt wird, und erlauben eine Verstärkung von über 40 dB bei einer Rauschzahl nahe der Quantenlimite von 3 dB. Daneben zeichnen sie sich durch eine hervorragende Linearität aus. Die Faserverstärker für 1,3 μm befinden sich hingegen noch im Entwicklungsstadium.

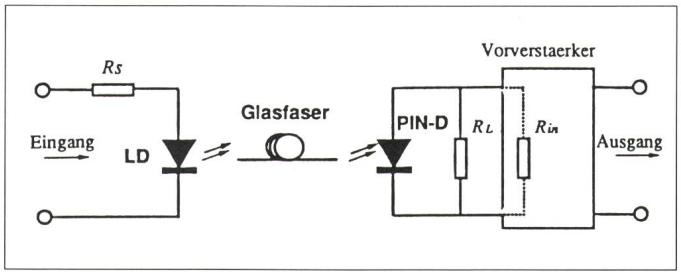

Bild 1
Vereinfachtes Schema eines faseroptischen Übertragungssystems

Verstärker mit Neodymium- oder Praseodymium-dotierten Fasern mit einer Verstärkung von etwa 10 dB wurden zwar schon realisiert, sind aber für eine Serienfertigung noch nicht reif.

Grenzen der optischen Fernsehübertragung

In einem optischen TV-Übertragungssystem existieren zwei wichtige Störeinflüsse: das Rauschen – herrührend von den optischen und elektrischen Elementen auf der Sender- und Empfängerseite – sowie die nichtlinearen Verzerrungen, vorwiegend verursacht durch die Nichtidealität der Komponenten, die dynamische Eigenschaft des Diodenlasers und die chromatische Dispersion der SM-Faser. Abhängig von den unterschiedlichen Systemkonfigurationen treten die einzelnen Störeffekte mehr oder weniger in Erscheinung.

Rauschen

Bild 1 zeigt das vereinfachte Schema eines optischen Übertragungssystems mit einer LD auf der Sende- und einer PIN-D auf der Empfangsseite. Für das Empfänger-Front-End wird eine 50-Ω-Anpassung ($R_L = R_{in} = 50\ \Omega$) angenommen. Der Vorverstärker habe eine Rauschzahl F. Die Empfangslichtleistung an der PIN-Diode bezeichnet man mit P_{ph} und ihre Responsivität [mA/mW] mit $\mathcal{R}$.

Drei wichtige Rauschbeiträge müssen stets berücksichtigt werden: einerseits weist ein Diodenlaser eine Intensitätsfluktuation auf, die mit dem bereits eingeführten Mass RIN erfasst werden kann. Gemäss Theorie ergibt sich pro Kanal mit der Bandbreite B eine Rauschleistung von

$$P_{RIN} = \frac{1}{4}\mathrm{RIN} \cdot \mathcal{R}^2 P_{ph}^2 R_L B\ , \qquad (1)$$

die in den Vorverstärker eingespeist wird. Sie ist proportional zum Quadrat der Empfangsleistung P_{ph}. Auf der Empfangsseite kommen andererseits die Beiträge des Schrotrauschens

$$P_{sh} = \frac{1}{2} e \mathcal{R} P_{ph} R_L B \qquad (2)$$

sowie des thermischen Rauschens (Lastwiderstand R_L) und des Verstärkerrauschens

$$P_{th} = FkTB \qquad (3)$$

hinzu, wobei k die Boltzmann-Konstante und T die absolute Temperatur bedeuten. Die Trägerleistung in jedem Kanal mit dem Intensitätsmodulationsindex m hat den Wert

$$C = \frac{1}{8}(m\mathcal{R}P_{ph})^2 R_L\ . \qquad (4)$$

Aus den obigen vier Gleichungen resultiert dann der HF-Rauschabstand:

$$\mathrm{CNR} = \frac{\frac{1}{8}(m\mathcal{R}P_{ph})^2}{B(\frac{FkT}{R_L} + \frac{1}{2}e\mathcal{R}P_{ph} + \frac{1}{4}\mathrm{RIN}\,\mathcal{R}^2 P_{ph}^2)} \qquad (5)$$

Bild 2 zeigt die Beiträge der einzelnen Rauschquellen, normiert auf

$$\mathrm{CNR}_0 = \mathrm{CNR}\frac{2B}{m^2}\ , \qquad (6)$$

in Funktion der optischen Empfangsleistung P_{ph}. Für die FM-Übertragung von Fernsehsignalen benötigt man ein CNR von ungefähr 18 dB, was mit $m = 0{,}07$ und $B = 26$ MHz gemäss Gleichung (6) einem CNR_0 von etwa 118 dB entspricht. Dafür ist eine optische Empfangsleistung P_{ph} von mindestens −16 dBm erforderlich. Das thermische Rauschen und das Verstärkerrauschen ($F = 3$ dB) stellen zusammen die dominante Störquelle dar, wenn der Sendelaser ein RIN von weniger als −130 dB/Hz besitzt. Bei der AM/VSB-Übertragung mit einem CNR von mindestens 43 dB, das für die gegebenen Parameter $m = 0{,}05$ und $B = 5$ MHz einem CNR_0 von 139 dB entspricht, benötigt man ein P_{ph} von mindestens −5 dBm. Das thermische Rauschen und das Verstärkerrauschen leisten zwar noch immer den grössten Rauschbeitrag, die Beiträge des Schrotrauschens und des Laser-RIN von beispielsweise −145 dB/Hz sind aber nicht mehr vernachlässigbar. Weshalb man bei FM einen grösseren Index m als bei AM/VSB wählt, wird im übernächsten Abschnitt erläutert.

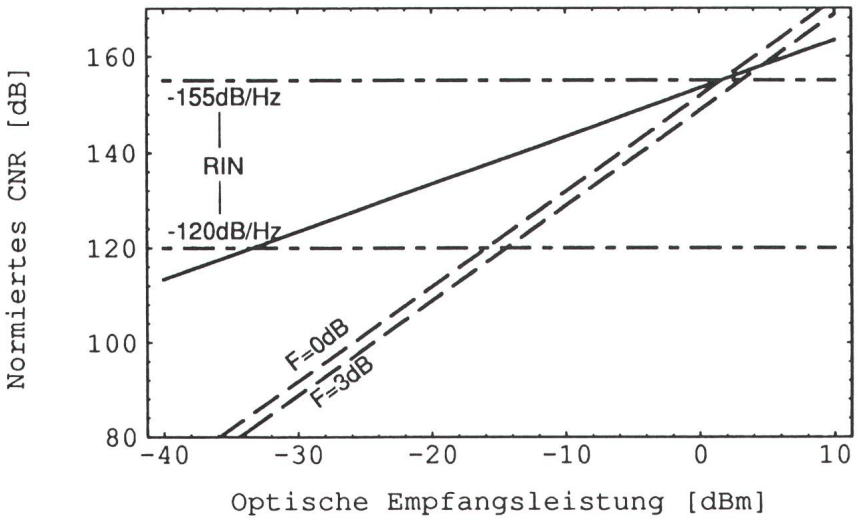

Bild 2 Normierte HF-Rauschabstände bezüglich der verschiedenartigen Rauschstörungen in Abhängigkeit von der optischen Empfangsleistung P_{ph} bei einer Responsivität $\mathcal{R}$ von 0,7
— Schrotrauschen ---- Thermisches Rauschen und Verstärkerrauschen
-·-·- Laser-RIN

Nichtlineare Verzerrung

Gemäss Gleichung (5) ist das CNR proportional zum Quadrat des Modulationsindexes m. Das bedeutet aber nicht, dass man m möglichst gross wählen soll, denn mit steigendem m nehmen die nichtlinearen Verzerrungen im System zu. Die Ursachen der nichtlinearen Verzerrungen sind vielfältig:

1. *Signal-Clipping:* Dieses ist dadurch bedingt, dass ein Teil des Vielkanal-Fernsehsignals am Schwellpunkt der Laserkennlinie abgeschnitten wird.
2. *Statische Nichtlinearität:* Sie rührt einerseits vom Sättigungseffekt in den Laser- und Photodioden sowie andererseits von der sinusförmigen Kennlinie externer Modulatoren her (Mach-Zehnder-Interferometer).
3. *Dynamische Nichtlinearität der Halbleiterlaser:* Sie ist eine Folge der Wechselwirkung der Elektronen und Photonen in der Laserkavität.
4. *Frequenz-Chirping und chromatische Dispersion der Glasfaser:* Diese nichtlineare Verzerrung tritt besonders stark in Erscheinung, wenn das Lichtsignal eines direkt modulierten 1,55-μm-Halbleiterlasers über eine 1,3-μm-SM-Faser übertragen wird.

	AM/VSB	FM	BFSK
Anzahl Kanäle	50	50	50
Kanalbandbreite [MHz]	5	26	50
Kanalabstand [MHz]	8	30	80
Frequenzbereich [GHz]	0.05–0.45	0.1–1.6	0.1–4.1
Maximale Anzahl nichtlinearer Produkte			
CSO: $f_i \pm f_j$	21	23	24
CTB: $f_i \pm f_j \pm f_k$	784	791	784
benötigtes CNR [dB]	43	18	15.6
Zulässiger Verzerrungspegel [dB]			
CSO: $f_i \pm f_j$	−66.2	−41.6	−39.4
CTB: $f_i \pm f_j \pm f_k$	−81.9	−57.0	−54.5

Tabelle II Anforderung an die Linearität in SCM-Systemen

Glücklicherweise treten im allgemeinen nicht alle Verzerrungsarten gleichzeitig auf. Die Clipping-Verzerrung zum Beispiel ist bei allen direkten Modulationsverfahren mit einem Halbleiterlaser vorhanden, nicht aber in einem System mit externer Modulation. Ferner ist in einem 1,3-μm-Übertragungssystem dank dem Dispersionsminimum der Glasfaser bei dieser Wellenlänge nur die Nichtlinearität des Diodenlasers massgebend. Bei einem Übertragungssystem mit 1,55-μm-Licht und 1,3-μm-SM-Faser müssen ausser der Laser-Nichtlinearität auch die nichtlinearen Verzerrungen durch Frequenz-Chirping und chromatische Dispersion der Glasfaser in Betracht gezogen werden. Bei Systemen mit externer Modulation, die insbesondere bei 1,55-μm-Licht von Bedeutung ist, muss lediglich die statische Nichtlinearität des externen Modulators berücksichtigt werden.

Zur numerischen Auswertung der nichtlinearen Verzerrungen in einem CATV-Übertragungssystem war es bisher üblich, eine Abschätzung für den ungünstigsten Fall (Worst Case) durchzuführen. Für jede Ordnung zählt man dabei zunächst in allen TV-Kanälen die nichtlinearen Verzerrungsprodukte und gewichtet die grösste vorkommende Anzahl einer bestimmten Ordnung mit entsprechenden relativen Verzerrungspegeln [4; 5]. Dabei kann man mit genügender Genauigkeit nur nichtlineare Verzerrungsprodukte vom Typ $f_i \pm f_j$ (Composite Second Order, CSO) und $f_i \pm f_j \pm f_k$ (Composite Triple Beat, CTB) berücksichtigen. In Tabelle II sind entsprechende Abschätzungen für Systeme mit 50 Kanälen und unterschiedlichen Modulationsverfahren dargestellt. Die höchsten Anforderungen an die Linearität stellt ohne Zweifel das AM/VSB-System. Dabei müssen die Verzerrungspegel bezüglich CSO und CTB kleiner als −66,2 bzw. −81,9 dB sein. Das digitale BFSK-System ist am wenigsten anspruchsvoll, belegt aber den grössten spektralen Bereich.

Wegen der Frequenzabhängigkeit der nichtlinearen Verzerrungen (Ursachen 3 und 4) resultieren aufgrund dieser Zählungsmethode oft zu pessimistische Resultate. Ein theoretisches Hilfsmittel für eine genauere Analyse der dynamischen nichtlinearen Verzerrungen ist die sogenannte Volterra-Wiener-Theorie [6], auf deren Erklärung hier aber verzichtet werden soll.

In den Bildern 3a und 3b sind die gemessenen Leistungsspektren in einem TV-System mit 16 FM-Kanälen vor und nach einer faseroptischen Übertragungsstrecke abgebildet. Das Übertragungssystem hat zusätzlich zu der in Bild 1 dargestellten optischen Strecke noch je einen Verstärker am Ein- und Ausgang mit einer Verstärkung von zusammen 56 dB. Der optische Sender, Empfänger und die 2 km lange optische Strecke (Singlemode-Faser, 1,3 μm) gemäss Bild 1 weist eine Dämpfung von etwa 34,5 dB auf. Die gesamte Systemverstärkung beträgt damit 21,5 dB; um diesen Wert ist der Signalpegel in Bild 3b angehoben. Man erkennt dort nun deutlich die nichtlinearen Verzerrungsprodukte vom Typ $f_i - f_j$ im tieferen und diejenigen vom Typ $f_i + f_j$ im höheren Frequenzbereich. Die Produkte vom Typ $f_i + f_j - f_k$ fallen direkt in das Übertragungsband der 16 Kanäle, treten aber wegen des dort herrschenden Signal- und Rauschpegels kaum in Erscheinung. In den erwähnten Bereichen der Verzerrungsprodukte vom Typ $f_i \pm f_j$ wäre offensichtlich die Übertragung weiterer TV-Signale schwer beeinträchtigt.

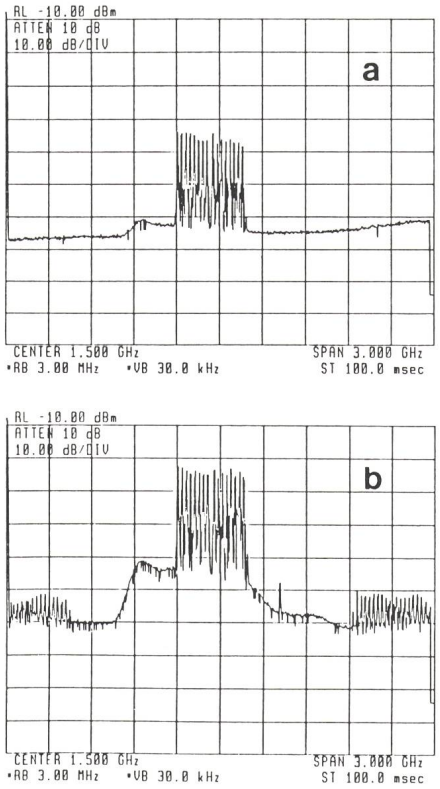

Bild 3 Faseroptisches TV-Übertragungssystem mit 16 FM-Kanälen (Satelliten-Fernsehen Astra 1A und 1B)
(a) Leistungsspektrum der Signale am Systemeingang
(b) Leistungsspektrum der verstärkten Signale und der Verzerrungsprodukte am Systemausgang

Systemoptimierung und Grenzen

In den vorangehenden zwei Abschnitten wurde gezeigt, dass man für die Festlegung des Modulationsindexes einen optimalen Mittelweg zwischen den Einflüssen von Rauschen und nichtlinearen Verzerrungen wählen muss. In Bild 4 sind zwei fundamentale Grenzen in einem direkt modulierten SCM-System mit 50 AM/VSB-TV-Signalen dargestellt; das Schrotrauschen als Quantenlimite und die Clipping-Verzerrung beschränken den Modulationsindex auf einen Bereich von ungefähr 2 bis 6%, wenn zum Beispiel der HF-Rauschabstand mindestens 50 dB betragen soll. Die anderen Rausch- und Verzerrungsquellen werden diesen Bereich von beiden Seiten her weiter einengen.

In erster Näherung findet man den optimalen Wert für den Modulationsindex dort, wo sich die beiden fundamentalen Grenzen kreuzen. Dies führt auf die folgende, überraschend einfache Beziehung für die Wahl eines optimalen effektiven Modulationsindexes μ_{opt}:

$$Q\left(\frac{1}{\mu_{opt}}\right) = \frac{1}{\mathrm{CNR}} \,. \tag{7a}$$

Dabei gilt:

$$\mu_{opt} = m_{opt}\sqrt{\frac{N}{2}} \,, \tag{7b}$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du \,. \tag{7c}$$

N bedeutet die Anzahl der Kanäle und m_{opt} den optimalen Wert des Modulationsindexes. Ein AM/VSB-Übertragungssystem mit 50 TV-Kanälen für Studio-Qualität verlangt ein

CNR von 49 dB. Aus den Gleichungen 7a...c errechnet man den optimalen Modulationsindex m zu 0,049. Ein FM-Übertragungssystem mit gleicher Kanalzahl und Übertragungsqualität erfordert ein CNR von 24 dB und daher ein optimales m von 0,075.

Die minimal erforderlichen Empfangsleistungen oder das maximale Leistungsbudget, begrenzt durch Schrotrauschen und Clipping-Verzerrungen, können somit ermittelt werden (Tab. III). Die Beeinträchtigung durch weitere Rauschstörungen und nichtlineare Verzerrungen werden das Leistungsbudget höchstens um 5 dB bei AM/VSB, um 15 dB bei FM und um 20 dB bei BFSK verringern.

Modulationsart	HF-Rauschabstand CNR [dB]	Signalbandbreite B [MHz]	Mod. index m[%]	min. Empfangsleistung [dBm]	Leistungs-Budget [dB]
AM/VSB	49	5	4.9	−5	10
FM	24	26	7.5	−27	32
BFSK	15.6	50	10	−35	40

Tabelle III Minimal erforderliche Empfangsleistungen und Leistungsbudget in faseroptischen CATV-Systemen
Anzahl Kanäle 50, Responsivität der Photodiode 0,7, Laser-Leistung 5 dBm

Ausblick

Die vorangehende Analyse optischer SCM-TV-Übertragungssystemen mit verschiedenen Modulationsarten (AM/VSB, FM oder digitale Modulation) lässt Rückschlüsse auf die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten zu.

Faseroptische Punkt-zu-Punkt-Verbindungen mit AM/VSB stehen dank ihrer Kompatibilität zu den heute üblicherweise betriebenen TV-Geräten bereits im Einsatz. Sie werden für lange Zubringerleitungen zu abgelegenen Gemeinden angewendet. Die praktische Erfahrung in der Schweiz zeigt, dass solche Systeme ab einer Übertragungsdistanz von mehr als 3 km, insbesondere auch in schwierigen Geländeverhältnissen, kostengünstiger installiert werden können als entsprechende Koaxialkabelsysteme mit Zwischenverstärkern. Berücksichtigt man die niedrige optische Dämpfung der Glasfaser (0,4 dB/km bei einer Wellenlänge von 1,3 μm) sowie das in Tabelle III festgehaltene Leistungsbudget der optischen Verbindung von 10 dB, so kann eine Übertragungsstrecke von maximal 25 km überbrückt werden.

Falls eine passive Verteilung oder Verzweigung der optischen Signale durchgeführt wird, stösst eine derartige Übertragung schnell an ihre Grenzen. Eine Aufteilung in zwei Pfade bedeutet beispielsweise die Einführung einer Dämpfung von mindestens 3 dB. Das Laser- und Empfängerrauschen können eine weitere Einbusse im Leistungsbudget von 5 dB verursachen. Die Reichweite oder die Anzahl Verzweigungen ist daher sehr beschränkt. Optische Verstärker können dazu beitragen, die starke Dämpfung, herrührend von den Verzweigungen, zu kompensieren und damit den Versorgungsbereich zu vergrössern. Allerdings ist eine beliebige Kaskadierung nicht möglich, und zwar einerseits wegen der limitierten maximalen Ausgangsleistung ($\approx$ 10 dBm) und andererseits wegen des Eigenrauschens mit einer Rauschzahl grösser als 3 dB.

Tatsächlich wird der Erfolg der faseroptischen Übertragung mit AM/VSB-Format für CATV-Netze von den Marktverhältnissen bestimmt, da heutzutage die Fernsehgeräte bei den Abonnenten ausschliesslich mit AM/VSB-Demodulatoren ausgerüstet sind. Würden die Empfangsgeräte auch FM-Demodulatoren besitzen, die durch Massenproduktion auf Kosten von nicht mehr als Fr. 100.– reduzierbar wären, könnten mit optischer FM-Übertragung viel grössere Leistungsbudgets (maximal 32 dB anstatt 10 dB bei AM/VSB) erzielt werden. Damit liessen sich bis etwa 128 passive Verzweigungen im CATV-Verteilnetz realisieren.

Bezüglich der Reichweite und Verzweigungsfähigkeit gelten für ein digitales SCM-TV-Übertragungssystem ähnliche Bedingungen wie für ein FM-Übertragungssystem. Ein Schlüsselproblem ist die kostengünstige Realisierung der Videodatenkompression und der digitalen Demodulatoren. Vorerst werden solche Systeme auf den Studio- und den High-End-Bereich beschränkt bleiben.

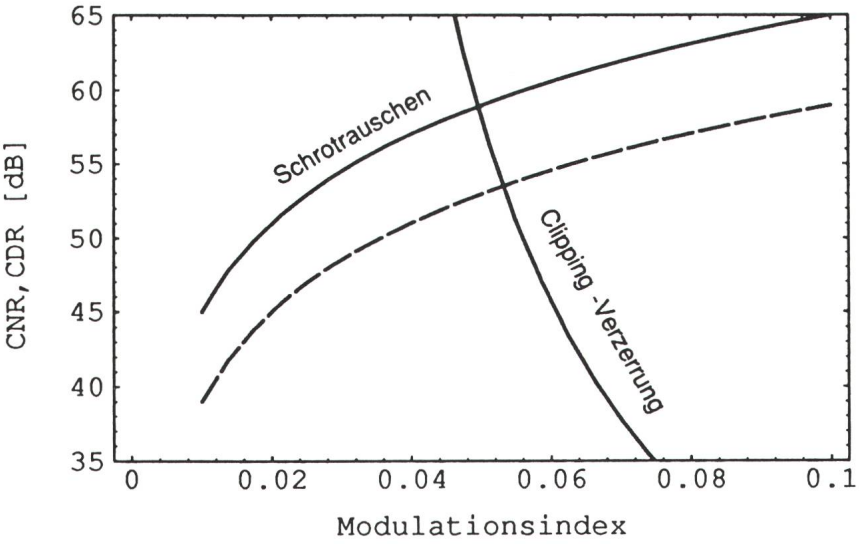

Bild 4 Fundamentale Grenzen von Schrotrauschen und Clipping-Verzerrung in Systemen mit direkter Modulation
Photostrom 1 mA, Anzahl Kanäle 50
— fundamentale Grenzen
--- Grenze mit zusätzlichen Rauschanteilen: Rauschzahl des Vorverstärkers $F = 3$ dB, Laser-RIN = −155 dB/Hz

Literatur

[1] Technische Grundforderungen für die Übertragungsqualität von Gemeinschaftsantennenanlagen. GD PTT, Radio- und Fernsehabteilung, Bern, 1974.
[2] Characteristics of Television System. CCIR Report 624-3. Signal-to-Noise Ratio in Television. CCIR Report 637-3.
[3] *J.G. Proakis:* Digital Communications. McGraw-Hill Book Company, 1987.
[4] *J.A. Chiddix, H. Laor, D.M. Pangrac, L.D. Williamson* and *R.W. Wolfe:* AM Video on Fiber in CATV Systems: Need and Implementation. IEEE J. Sel. Areas in Communications 8(1990)7, pp. 1229–1239.
[5] *Th. Darcie:* Subcarrier Multiplexing for Lightwave Networks and Video Distribution Systems. IEEE J. Sel. Areas in Communications, 8(1990)7, pp. 1240–1248.
[6] *E. Bedrosian* and *S. O. Rice:* The Output Properties of Volterra Systems (Nonlinear Systems with Memory) Driven by Harmonic and Gaussian Inputs. Proc. IEEE 59(1971)12, pp. 1688–1707.