

Diss. ETH Nr. 9367

P. Leuthold
3. 4. 91

**DIE BEEINTRÄCHTIGUNG
BIDIREKTIONALER FASEROPTISCHER
ÜBERTRAGUNGSSYSTEME DURCH
RAYLEIGH-RÜCKSTREUUNG UND
REFLEXIONEN**

**ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH**

vorgelegt von
ROLAND K. STAUBLI
dipl. El. Ing. ETH
geboren am 30. August 1959
von Bremgarten (AG)

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. P. E. Leuthold, Referent
Prof. Dr. H. Melchior, Korreferent

Zürich 1991

ABSTRACT

In this thesis work, the receiver sensitivity degradations in bidirectional optical single-mode fiber communication systems due to Rayleigh backscattered and backreflected light are investigated. An analytical model for the description of backscattered and backreflected signals which takes into account the coherence properties of the optical source and the polarization state changes during propagation along the fiber is presented.

It is shown that in systems using narrow linewidth laser diodes, crosstalk due to interferometric conversion of laser phase noise to intensity noise may cause receiver sensitivity degradations far exceeding the crosstalk penalties observed in bidirectional systems with low coherent optical sources. The interferometric noise can give rise to intermittent error bursts and bit-error-rate floors.

For an excitation with a typical distributed feedback laser diode, characterized by a linewidth in the range between 10 and 100 MHz, the components of the complex amplitude vector of the Rayleigh backscattered field from a single-mode fiber asymptotically become ergodic circular complex Gaussian random processes. The power spectral densities and the probability density functions of the backscattered and backreflected intensities are calculated. The probability density function of the Rayleigh backscattered intensity reveals to be independent of the source coherence but its power spectral density follows as the autocorrelation of the source field spectrum. An exact expression for the probability density function of the detector current due to Rayleigh backscattered light is derived. The theoretical results are in good agreement with the performed measurements.

Considering intensity and coherent modulation, the crosstalk penalties are calculated for single- and double-source bidirectional systems and compared with experimental results. Different approaches to reduce crosstalk as well as return loss requirements for connectors and splices in bidirectional optical systems are presented.

The experiments show that in systems employing commercially available oblique endface connectors and fusion splices, Rayleigh backscattering is the dominating crosstalk contribution. Thus, Rayleigh backscattering gives a fundamental limit for bidirectional transmission with narrow linewidth optical sources.

Kapitel 7

ZUSAMMENFASSUNG

SM-Glasfasern weisen eine enorme Übertragungskapazität von mehreren TBit/s auf. Die heute kommerziell eingesetzten optischen Übertragungssysteme nutzen davon allerdings nur einen Bruchteil aus. Wellenlängenmultiplex, Frequenzmultiplex, Subträgermodulation und die bidirektionale Übertragung sind Verfahren, deren Einsatz dank der technologischen Fortschritte zusehends grössere Informationsflüsse ermöglicht.

Diskrete Reflexionsstellen und die inhärente Rayleigh-Rückstreuung verursachen in bidirektionalen Glasfaser-Übertragungssystemen ein Übersprechen zwischen dem Vorwärts- und dem Rückwärtskanal. Diese Störung führt in vielen Fällen zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit. Zusätzlich zum bekannten Intensitätsübersprechen [CON81,STA86,BOH87] tritt in Systemen mit spektral sehr reinen Lichtquellen (SLM-Laserdioden) Interferenzübersprechen [WOO88,STA90a] auf. Letzteres entsteht infolge Umwandlung des Laserphasenrauschens in Intensitätsrauschen.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Modell zur Beschreibung der reflektierten und rückgestreuten Signale in SM-Glasfaserübertragungssystemen vorgestellt, und es erfolgt eine theoretische und experimentelle Untersuchung der Beeinträchtigung bidirektionaler Übertragungssysteme durch optisches Übersprechen.

Der ausführlichen Beschreibung von bekannten und neuen Systemarchitekturen für die bidirektionale optische Punkt-zu-Punkt-Übertragung schliesst sich eine Untersuchung der Ursachen für das Übersprechen sowie der Eigenschaften der in bidirektionalen Systemen eingesetzten optischen Komponenten an.

Das vorgeschlagene Fasermodell erlaubt eine quantitative Erfassung der statistischen Eigenschaften der rückgestreuten und reflektierten Si-

gnale. Es werden dabei zum erstenmal auch die Einflüsse der Quellenfeldmodulation und der Polarisationsänderungen des sich ausbreitenden Feldes in der Glasfaser berücksichtigt. Das Leistungsdichtespektrum der Intensität des rückgestreuten und reflektierten Feldes besitzt die Form der Autokorrelationsfunktion des Quellenfeldspektrums [GYS89,GYS90]. Für käufliche SLM-Laserdioden mit Linienbreiten im Bereich von 10 bis 100 MHz weisen die Komponenten des komplexen Amplitudenvektors des von einer SM-Glasfaser rückgestreuten Feldes die Eigenschaften der Musterfunktionen von ergodischen, zirkulärsymmetrischen, komplexen, normalverteilten Zufallsprozessen auf. Für den von der Rayleigh-Rückstreuung verursachten Detektorstrom kann eine mathematische Beschreibung der WSK-Dichtefunktion angegeben werden. Die gemessene WSK-Verteilung des Detektorstroms bestätigt die Theorie (Abschnitt 6.1.3). Die Experimente zeigen, dass das von einer konventionellen SM-Glasfaser rückgestreute Feld nahezu vollständig depolarisiert ist (Abschnitt 6.1.2).

Die Abnahme der Empfängerempfindlichkeit infolge Übersprechens wird für bidirektionale Ein- und Zweiquellen-Systeme sowohl mit konventioneller Intensitätsmodulation als auch mit kohärenter Modulation untersucht. Die Betrachtungen beschränken sich auf Systeme mit wellenlängenunabhängigen Richtkopplern. Die Experimente zeigen, dass es mit käuflichen optischen Steckern (Rückflussdämpfung grösser als 55 dB) möglich ist, ein bidirektionales System zu realisieren, in welchem die Rayleigh-Rückstreuung das Übersprechen dominiert (Abschnitt 6.2). Um sicherzustellen, dass die Übersprechverluste begrenzt bleiben, sollte in Zweiquellen-Systemen mit Intensitätsmodulation, identischen Datenraten in beiden Übertragungsrichtungen und Empfängern mit PIN-Photodioden die Intensität des Übersprechsignals 5% der Intensität des Nutzsignals nicht überschreiten (Fig. 5.7).

Aufgrund der Interferenz von Nutz- und Übersprechsignal reagieren Einquellen-Systeme viel empfindlicher auf optisches Übersprechen. Mit Intensitätsmodulation, identischen Datenraten in beiden Übertragungsrichtungen und Empfängern mit PIN-Photodioden bleiben aber ihre Übersprechverluste begrenzt, wenn die Intensität des Übersprechsignals 1% der Intensität des Nutzsignals nicht überschreitet (Fig. 5.12).

In bidirektionalen Zweiquellen-Systemen mit kohärenter Modulation sind die Übersprechverluste eine Funktion des Frequenzabstands der für die beiden Übertragungsrichtungen verwendeten optischen Trägersignale (Fig. 5.16 und 5.17). Einquellen-Systeme mit kohärenter Modulation und

mit konventioneller Intensitätsmodulation weisen eine vergleichbare Empfindlichkeit in bezug auf optisches Übersprechen auf (Fig. 5.12 und 5.19).

Eine Reduktion des Übersprechens kann durch die Verwendung reflexionsarmer Stecker erzielt werden. Ist die Rückflussdämpfung der Stecker grösser als 50 dB, dominiert die Rayleigh-Rückstreuung das Übersprechen auch in Glasfaserstrecken mit geringen Steckerabständen (Tabelle 5.2). Eine Trennung von Nutz- und Übersprechsignal mit Hilfe von wellenlängenselektiven Kopplern ist nur in Zweiquellen-Systemen möglich. Das mit der direkten Strommodulation der Laserdiode verbundene "Chirping" bewirkt eine Verbreiterung des Quellspektrums und damit verbunden ebenfalls eine Abnahme der Verluste infolge Interferenzübersprechens.

Während zum heutigen Zeitpunkt die Leistung der optischen Quellen, die Empfängerempfindlichkeit und die Stecker-Rückflussdämpfung die maximale Übertragungsdistanz von bidirektionalen GBit/s-Systemen beschränken, kann in zukünftigen Systemen mit reflexionsarmen Steckern, grösseren Laserdiodenleistungen und optischen Wanderwellenverstärkern [GIL89,GIM90,HEN90,IQB89,IQB90] das Interferenzübersprechen infolge Rayleigh-Rückstreuung ein begrenzender Faktor sein. Letzteres Phänomen bestimmt eine fundamentale Grenze für die bidirektionale Übertragung.

Ausgehend von den vorliegenden Erkenntnissen ergeben sich Anregungen für weiterführende Untersuchungen auf den Gebieten der bidirektionalen Übertragung und der Rayleigh-Rückstreuung.

In einem bidirektionalen Übertragungssystem mit isolierten optischen Quellen resultiert ein Einfügeverlust von ungefähr 2 dB, und die Leistungsaufteilung in den erforderlichen Richtkopplern hat einen systematischen Verlust von 3 dB und einen Zusatzverlust von ca. 0.5 dB zur Folge. Die Verwendung eines polarisationsunabhängigen optischen Zirkulators (Einfügeverlust ≈ 2 dB [EMK83]) anstelle des optischen Isolators und des Richtkopplers verspricht in bidirektionalen Systemen einen äquivalenten Leistungsgewinn in der Grössenordnung von 3 dB.

Die relativ geringe Dynamik der optischen Signale in Glasfasersystemen begrenzt die maximale Anzahl Teilnehmer in einem rein optischen Kommunikationsnetzwerk sehr stark. Mit dem Einsatz von optischen Wanderwellenverstärkern scheint es jedoch möglich zu sein, die Teilnehmerzahl erheblich zu steigern. Da erstere eine breitbandige Verstärkung ohne optische Isolation erzielen [GIM90,IQB89,IQB90], ist eine gleichzeitige bidirektionale Verstärkung von optischen Frequenz- oder Wel-

lenlängenmultiplexsignalen denkbar [DIE89]. Zusätzlich zu dem in dieser Arbeit behandelten Übersprechen tritt in einem optischen Netzwerk mit einer grossen Anzahl Kanäle auch Übersprechen zufolge nichtlinearer Effekte in der Glasfaser auf. Die Erfassung des Einflusses von mehreren gleichzeitig auftretenden signalabhängigen Störungen auf ein Übertragungssystem gilt heute noch als ungelöstes Problem und scheint eine vielversprechende Aufgabe darzustellen.

Es wurde in Experimenten festgestellt, dass die Rayleigh-Rückstreuung die Empfindlichkeit von Empfängern mit optischen Vorverstärkern begrenzt [HEN90] und dass die mehrfache Rayleigh-Rückstreuung auch in unidirektionalen Systemen mit optischen Wanderwellenverstärkern zu einer Beeinträchtigung der Übertragungseigenschaften führen kann [GIM90,IQB89,IQB90]. Die Berechnung in [GIM90] erfolgte unter der Annahme eines unmodulierten Signals. Mit dem in dieser Arbeit beschriebenen Modell für die Rayleigh-Rückstreuung ist nun eine genaue, die Modulation des optischen Signals berücksichtigende Analyse dieser Systeme möglich [STA90b].

Das vorliegende Glasfasermmodell eignet sich aber auch für die Untersuchung der Rückwirkungen der Rayleigh-Rückstreuung auf die Eigenschaften von Laserdioden und optischen Wanderwellenverstärkern [MAR85,CHR86,IQB90].