

*P. Gysel*

Diss. ETH Nr. 9511

27.08.91

**Verhalten von Laserdioden unter  
dem Einfluss der  
Rayleighrückstreuung  
in kohärenten faseroptischen  
Übertragungssystemen**

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

**vorgelegt von  
PETER GYSEL  
dipl. Phys. ETH  
geboren am 8. März 1959  
von Wilchingen (SH)**

**Angenommen auf Antrag von  
Prof. Dr. P. E. Leuthold, Referent  
Prof. Dr. R. Dändliker, Korreferent**

**Zürich 1991**

# ABSTRACT

This thesis deals with the spectral behaviour of semiconductor lasers exposed to optical feedback due to Rayleigh backscattering from a single-mode fiber.

First, the properties of free-running semiconductor lasers and of lasers exposed to optical feedback from a distinct reflection are reviewed. The following chapter treats the statistical properties of Rayleigh backscattering from a single-mode fiber with regard to the degree of coherence of the source light. In the case of semiconductor lasers with one longitudinal mode, the power of the backscattered light is not constant, even if no modulation is applied. The fiber converts phase noise of the source light into intensity noise of the backscattered light. In transmission systems with high speed-modulation, the complex amplitude of the backscattered light represents a wide-sense stationary Gaussian random process. For the backscattered light, the following properties are found: the power spectral density of the complex amplitude is proportional to that of the source light and the power spectral density of the intensity is proportional to the autocorrelation of the source spectrum.

Measurements confirm the theoretical results. With a laser the spectral width of which can be varied from 3 MHz to several GHz, we show that the power spectral density of the backscattered intensity is given by the autocorrelation of the source spectrum. Thus, the spectral width of a transmitter laser in a coherent system can be evaluated by measuring the Rayleigh backscattering from the fiber.

With these measurements, it is shown that if connectors with high return loss and obliquely polished fiber end faces are used, the optical power of Rayleigh backscattering far exceeds the power of residual reflections. Under these conditions, the spectral behaviour of semiconductor lasers exposed to optical feedback due to Rayleigh backscatter is investigated. Two regimes of optical feedback can be distinguished: incoherent feedback for small laser-fiber coupling efficiencies  $\eta$ , and coherent feedback for coupling efficiencies above a critical value  $\eta_c$ . This threshold, although very low for unmodulated light, can be substantially increased by modulating the source light. A simple mathematical formula relating the threshold  $\eta_c$  to the fiber length and the coherence time of the source light is found experimentally. It can be derived by considering the resonance

condition of the laser and the statistical properties of the backscattered light.

Finally, we describe an experimental FSK system that also works without optical isolation of the transmitter. The bit error rate is not increased as long as one works in the regime of incoherent feedback.

# ZUSAMMENFASSUNG

Gegenstand dieser Arbeit ist die optische Rückwirkung der Rayleigh-Rückstreuung einer Singlemode-Faser auf das spektrale Verhalten einer Laserdiode.

Das erste Kapitel gibt eine Übersicht über die Eigenschaften von freilaufenden Laserdioden und deren Veränderung bei Anwesenheit einer diskreten äusseren Reflexion. Sodann wird die Rayleigh-Rückstreuung in Abhängigkeit der Kohärenz des Quellenlichtes anhand eines theoretischen Modells untersucht. Im Falle von Laserlicht mit einer geringen spektralen Breite ist die Leistung des rückgestreuten Lichtes nicht konstant, und zwar auch dann nicht, wenn keine Modulation erfolgt. Der Grund liegt darin, dass Phasenrauschen des Laserlichtes in Intensitätsrauschen der Rayleigh-Rückstreuung umgewandelt wird. Es zeigt sich, dass bei modernen Übertragungssysteme mit hoher Datenrate das Feld des rückgestreuten Lichtes die Realisierung eines schwach stationären, Gauss'schen Zufallsprozesses darstellt. Für das rückgestreute Licht ergeben sich folgende Eigenschaften: Das Leistungsdichtespektrum der komplexen Amplitude ist proportional zu demjenigen des Quellenlichtes, und das Leistungsdichtespektrum der Intensität ist proportional zur Autokorrelation des Quellenlichtspektrums.

Messungen bestätigen die theoretischen Ergebnisse. Mit Hilfe einer Quelle, deren Licht eine veränderbare Linienbreite zwischen 3 MHz und einigen GHz aufweist, wird gezeigt, dass das Leistungsdichtespektrum der Intensität des rückgestreuten Lichtes der Autokorrelation des Quellenlichtes entspricht. Damit lässt sich umgekehrt die Linienbreite des Laserlichtes in einem kohärenten Übertragungssystem durch Messung der Rayleigh-Rückstreuung der Faser bestimmen.

Die Experimente zeigen, dass bei Verwendung von Steckern mit grosser Rückflussdämpfung und von schräg abgeschliffenen Faserendflächen die optische Leistung der Rayleigh-Rückstreuung weit grösser ist als diejenige von Restreflexionen. Unter diesen Bedingungen wird das spektrale Verhalten von Laserdioden untersucht. Dabei zeigt sich, dass zwei Zustände zu unterscheiden sind: Unkohärente Rückwirkung für kleine Laser-Faser-Kopplungseffizienzen  $\eta$  und kohärente Rückwirkung für Kopplungseffizienzen  $\eta$  oberhalb einer Schwelle  $\eta_c$ . Für unmoduliertes Licht ist diese Schwelle sehr niedrig, sie wird jedoch durch Modulation stark heraufgesetzt. Experimentell findet man für die Abhängigkeit der Schwelle  $\eta_c$

von der Faserlänge und der Kohärenzlänge des Lichtes eine einfache Beziehung. Letztere kann mit der Kenntnis der statistischen Eigenschaften des rückgestreuten Lichtes aus der Resonanzbedingung für die Laserdiode theoretisch begründet werden.

Schliesslich erfolgt die Beschreibung eines experimentellen FSK-Übertragungssystemes, das auch ohne optische Isolation des Senders betrieben werden kann. Die Messungen zeigen, dass sich die Bitfehlerrate nicht verschlechtert, solange im Zustand der unkohärenten Rückwirkung gearbeitet wird.