

Übersicht über faseroptische Messverfahren

1 Trends der faseroptischen Messtechnik

Die Anforderungen an die Übertragungssysteme wachsen. Moderne LWL-Übertragungssysteme müssen eine hohe Reichweite, hohe Übertragungskapazität und hohe Zuverlässigkeit haben. Eine präzise innovative Messtechnik und gut geschulte Fachleute werden benötigt.

Die Messabläufe werden vereinfacht und wenn möglich automatisiert (zum Beispiel intelligentes [OTDR](#)).

Beim [Wellenlängenmultiplex](#) werden viele Wellenlängen gleichzeitig über nur einen Lichtwellenleiter übertragen. Die Wellenlängenkanäle müssen im Einzelnen charakterisiert werden.

Der **Anstieg der Datenraten** (2,5 Gbit/s => 10 Gbit/s => 40 Gbit/s => 100 Gbit/s => 400 Gbit/s je Wellenlänge) hat zur Folge, dass Dispersionseffekte im Singlemode-LWL eine zunehmende Rolle spielen und gemessen werden müssen.

Bei der **Errichtung passiver optischer Netze** ([FTTH/FTTB](#)) ergeben sich neue Messanforderungen wegen folgender Besonderheiten:

- Die Netze können verzweigt sein. Das Rückstreudiagramm wird vieldeutig. Die Messung und Auswertung erfolgt mit einem intelligenten OTDR: Es werden mehrere Messungen mit unterschiedlichen Impulsbreiten, Auflösungsvermögen und Wellenlängen durchgeführt. Das Messergebnis wird in Form von Symbolen und als Ereignistabelle dargestellt.
- Mischung verschiedener Fasertypen: kann kleine Dämpfungen und Stufen im Rückstreudiagramm bewirken.
- Übertragung mehrerer Wellenlängen gleichzeitig: Die Leistungen müssen wellenlängenselektiv gemessen werden.
- Überwachung während des Betriebes durch optische Rückstreuung bei 1625 nm bzw. 1650 nm: Die Nutzsignale bei den Wellenlängen 1310 nm, 1490 nm und eventuell 1550 nm dürfen nicht das OTDR und das Überwachungssignal darf nicht die Nutzsignale stören. Es kann der Einsatz eines OTDR mit isoliertem Port (für 1625 nm bzw. 1650 nm) sinnvoll sein.
- Die Übertragung kann analog sein: hohe Rückwirkungsempfindlichkeit der Sender. Eventuell ist eine [ORL](#)-Messung (Abschnitt 3.4) erforderlich.

2 Übersicht Messverfahren

Elementare Messverfahren (Kapitel 3):

- Leistungsmessung (Abschnitt 3.1)
- Dämpfungsmessung (Abschnitt 3.2)
- optische Rückstreuung (OTDR): wichtigstes Messverfahren (Abschnitt 3.3)
- Reflexionsmessungen (Abschnitt 3.4)

Messungen an Wellenlängenmultiplexsystemen (Kapitel 4):

- optische Spektralanalyse ([OSA](#)) (Abschnitt 4.1)
- spektrale Dämpfungsmessung ([AP](#)) (Abschnitt 4.2)

Messungen an hochbitratigen Systemen (Kapitel 5):

- Messung der chromatischen Dispersion ([CD](#)) (Abschnitt 5.1)
- Messung der Polarisationsmodendispersion ([PMD](#)) (Abschnitt 5.2)
- orts aufgelöste PMD-Messung ([PMD-OTDR](#)) (Abschnitt 5.3)

Fasersensorik (Kapitel 6)

- hochauflösende Dämpfungs- und Reflexionsmessung (Abschnitt 6.3)
- hochauflösende Temperatur- und Faserdehnungsmessung (Abschnitt 6.4)

3 Elementare Messverfahren

3.1 Leistungsmessung

Die Leistungsmessung dient der Überprüfung der Ausgangsleistung des Senders oder der Leistung am Ende der Strecke. Die Messung erfordert eine hohe absolute Genauigkeit.

Da die Empfindlichkeit des Empfängers von der Wellenlänge abhängt, muss diese bekannt sein. In Abhängigkeit vom Detektormaterial können bestimmte Wellenlängenbereiche gemessen werden (Bild 1).

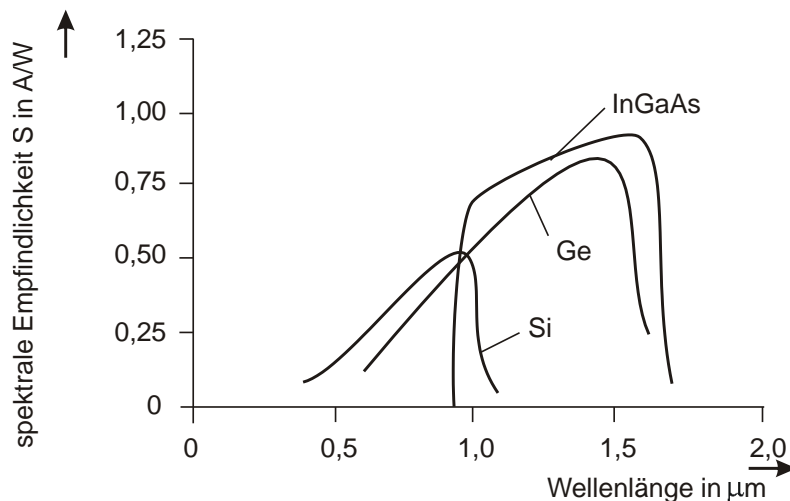


Bild 1: [Spektrale Empfindlichkeit](#) verschiedener Detektormaterialien

Silizium ist für den sichtbaren Bereich und das erste optische Fenster, Germanium für den sichtbaren Bereich, das erste und zweite optische Fenster und InGaAs für das zweite, dritte und vierte optische Fenster geeignet.

3.2 Dämpfungsmessung

Die Dämpfungsmessung dient der Charakterisierung von optischen Komponenten (zum Beispiel Splitter), von Steckern oder von optischen Leitungen. Es erfolgt stets

eine Referenzierung P_1 und eine Messung P_2 . Daraus wird die Dämpfung a ermittelt (alternativ: Insertion Loss IL):

$$a = 10 \lg \frac{P_1}{P_2} \text{ in Dezibel} \quad (1)$$

Bei der Messung an Leitungen kann die Referenzierung mit einer (Bild 2 oben), zwei oder drei Prüfschnüren erfolgen. Für die Messung gibt es nur eine Variante (Bild 2 unten).

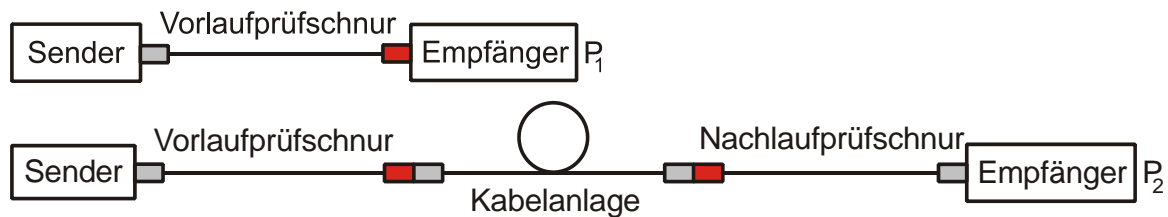


Bild 2: Dämpfungsmessung.

Oben: Referenzierung mit einer Schnur; unten: Messung.

Da die Dämpfung des Messobjektes meist von der Wellenlänge abhängt, muss diese bekannt sein. Meist wird bei mehreren Wellenlängen gemessen, zum Beispiel: Multimode bei 850 nm und 1300 nm; Singlemode bei 1310 nm und 1550 nm.

Zur reproduzierbaren Messung an Multimode-LWL muss mit einer definierten Leistungsverteilung eingekoppelt werden: Encircled Flux (begrenzter Lichtstrom). Das erreicht man am besten mit einer Lumineszenzdiode und einem Messkabel mit eingebautem Moden-Controller.

In Rechenzentren können die zu messenden Dämpfungen sehr gering sein: Das erfordert eine hohe Messgenauigkeit. Diese kann nur mit Referenzsteckern an den Prüfschnüren (in Bild 2 rot gekennzeichnet) und bei Referenzierung mit nur einer Schnur erreicht werden.

3.3 Optische Rückstreuung

Die optische Rückstreuung (OTDR-Messung; **O**ptical **T**ime **D**omain **R**eflectometer) ist ein universelles Messverfahren und weit verbreitet. Es dient der umfassenden Charakterisierung der Qualität der installierten Strecke.

Es wird ein kurzer Lichtimpuls in die Faser eingekoppelt und zeitaufgelöst die zurückfließenden Leistungen gemessen. Verantwortlich für die Leistungsrückflüsse sind die Rayleighstreuung entlang des Lichtwellenleiters und die Fresnelreflexionen an diskreten Ereignissen (Bild 3).

Das ermöglicht:

- eine orts aufgelöste Messung des Dämpfungsverlaufes und der -koeffizienten
- Ermittlung der Störstellen, deren Dämpfungen und Orte
- Messung der Länge des Lichtwellenleiters, sofern die Kernbrechzahl bekannt ist

- Bestimmung der Kernbrechzahl des Lichtwellenleiters, bei bekannter Faserlänge
- eine orts aufgelöste Messung der Reflexionsdämpfung der Steckverbinder

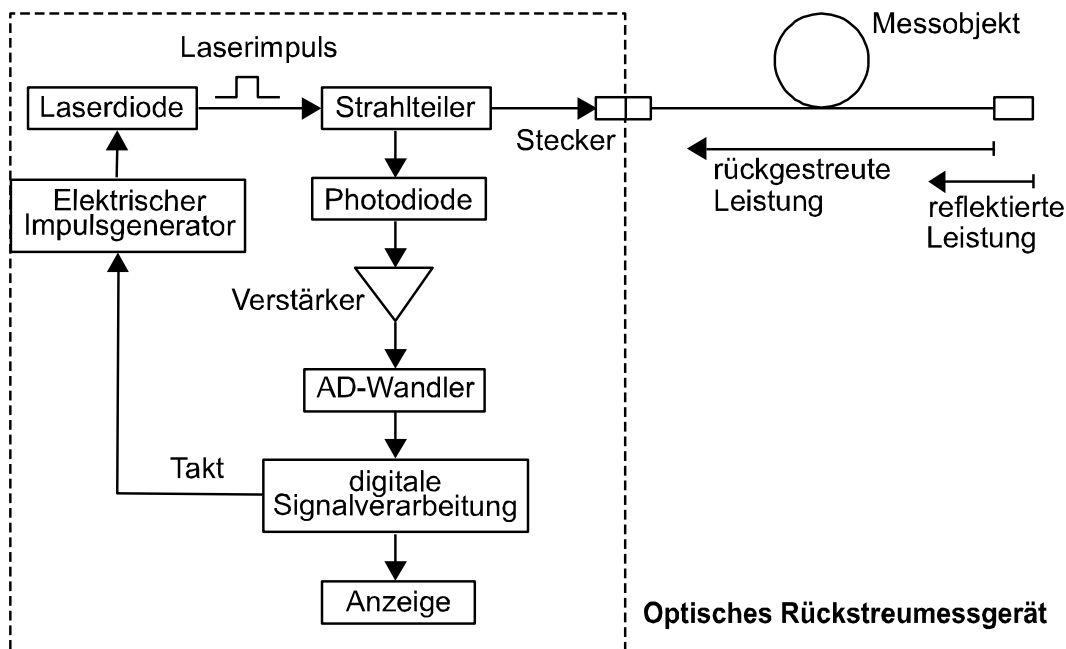


Bild 3: Prinzip der optischen Rückstreuung

3.4 Reflexionsmessung

Die Reflexionsmessung dient der Charakterisierung der auf dem Lichtwellenleiter zurückfließenden Leistungen. Diese können Sender aber auch Empfänger stören.

Die [Reflexionsdämpfung](#) a_R (positive Werte in Dezibel) ergibt sich aus dem Verhältnis von ankommender Leistung P_0 und reflektierter Leistung P_R (alternativ: Return Loss RL):

$$a_R = 10 \lg \left(\frac{P_0}{P_R} \right) \quad \text{in dB} \quad (2)$$

Der [Reflexionsgrad](#) g_R (negative Werte in Dezibel) wird reziprok definiert:

$$g_R = 10 \lg \left(\frac{P_R}{P_0} \right) \quad \text{in dB} \quad \Rightarrow \quad g_R = -a_R \quad (3)$$

Folgende Verfahren zur Messung der Reflexionsdämpfung wurden in DIN EN 61300-3-6 genormt:

- Das optische Gleichlichtreflektometer ([OCWR](#): Optical Continuous Wave Reflectometer) misst die reflektierte Leistung direkt. Das OCWR kann nur die Summe mehrerer reflektierter Leistungen ermitteln. Wegen der Nebensprechdämpfungen der Koppler sind Reflexionsdämpfungen etwa nur bis 55 dB messbar.

- Optisches Zeitbereichsreflektometer (OTDR) ermöglicht orts aufgelöste Messung (minimales Auflösungsvermögen etwa 1 m) von vielen reflektierten Leistungen. Reflexionsdämpfungen bis etwa 75 dB sind ermittelbar. Charakterisierung herkömmlicher LWL-Strecken (Abschnitt 3.3).
- Optisches Reflektometer mit geringer Kohärenzlänge ([OLCR](#): Optical Low Coherence Reflectometer): Auflösungsvermögen 10 µm, Reflexionsdämpfung 90 dB. Charakterisierung optischer Bauelemente.
- Messung mit optischen Reflektometer im Frequenzbereich ([OFDR](#): Optical Frequency Domain Reflectometer): Auflösungsvermögen im Zentimeterbereich, Reflexionsdämpfung > 70dB. Charakterisierung kurzer LWL-Strecken wie im Zug, Flugzeug, Schiff.

Neben reflektierten Leistungen tragen auch gestreute Leistungen zum Leistungsrückfluss bei. Die optische Rückflusdämpfung (ORL: Optical Return Loss) ist das Verhältnis aus der eingekoppelten Leistung P_0 und der gesamten zurückfließenden Leistung P_{gesamt} :

$$\text{ORL} = 10 \lg \left(\frac{P_0}{P_{\text{gesamt}}} \right) \quad \text{in dB} \quad (4)$$

4 Messungen an Wellenlängenmultiplexsystemen

4.1 Optische Spektralanalyse

Die optische Spektralanalyse ist erforderlich, wenn gleichzeitig mehrere Wellenlängen über einen Lichtwellenleiter übertragen werden (Wellenlängenmultiplex). Der [optische Spektralanalysator \(OSA\)](#) zerlegt das Licht in seine Wellenlängenanteile (Bild 4). Die Messung erfolgt an verschiedenen [Monitorpunkten](#) entlang der Strecke.

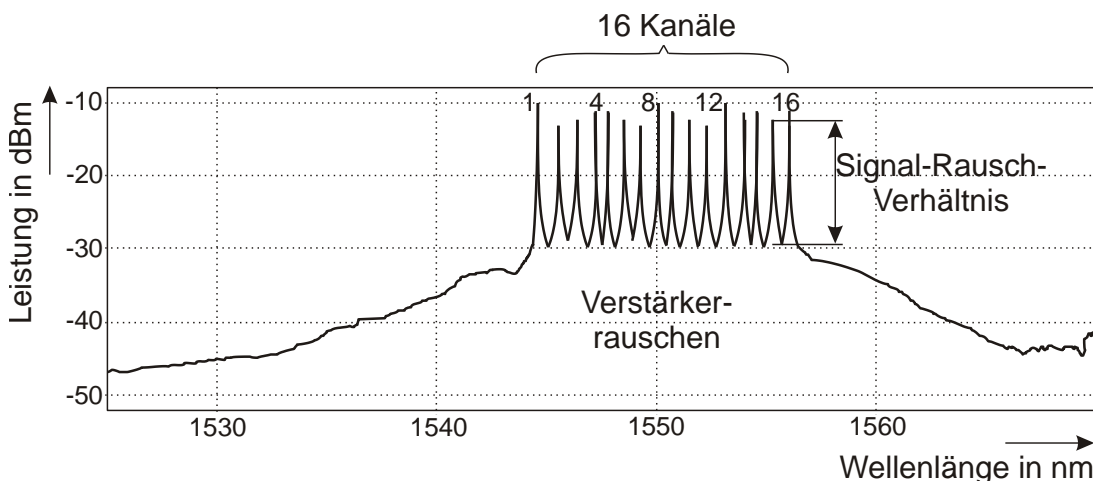


Bild 4: Spektrum eines DWDM-Systems mit 16 Kanälen

Die optische Spektralanalyse ermöglicht eine umfassende Charakterisierung des Wellenlängenmultiplex-Systems:

- Messung der einzelnen Wellenlängen und deren Drift
- Messung der optischen Kanalleistungen, deren Drift und der Gesamtleistung
- Messung der Leistungsdifferenzen zwischen den Kanälen

- Messung der Signal-Rausch-Verhältnisse der einzelnen Kanäle
- Messung des Übersprechens bzw. der Vierwellenmischung

Anhand der Ergebnisse der optischen Spektralanalyse kann das Wellenlängenmultiplex-System optimal konfiguriert werden.

4.2 Spektrale Dämpfungsmessung

Mit der spektralen Dämpfungsmessung kann die Dämpfung von optischen Komponenten (zum Beispiel Multiplexer/Demultiplexer) sowie der Dämpfungskoeffizient des Lichtwellenleiters über einen breiten Wellenlängenbereich ermittelt werden.

Für die Messung wird ein spektral breitbandiger Sender benötigt. Am Ende der Strecke zerlegt ein optischer Spektralanalysator das Licht in seine Wellenlängenanteile. Wie bei der Dämpfungsmessung sind eine Referenzierung und dann die eigentliche Messung erforderlich.

Bild 5 zeigt als Beispiel die spektrale Dämpfungsmessung an einem verlegten Lichtwellenleiter. Dargestellt ist die Dämpfung in Abhängigkeit von der Wellenlänge (1260 nm bis 1640 nm). Bei bekannter Streckenlänge kann daraus der Dämpfungskoeffizient des Lichtwellenleiters ermittelt werden.

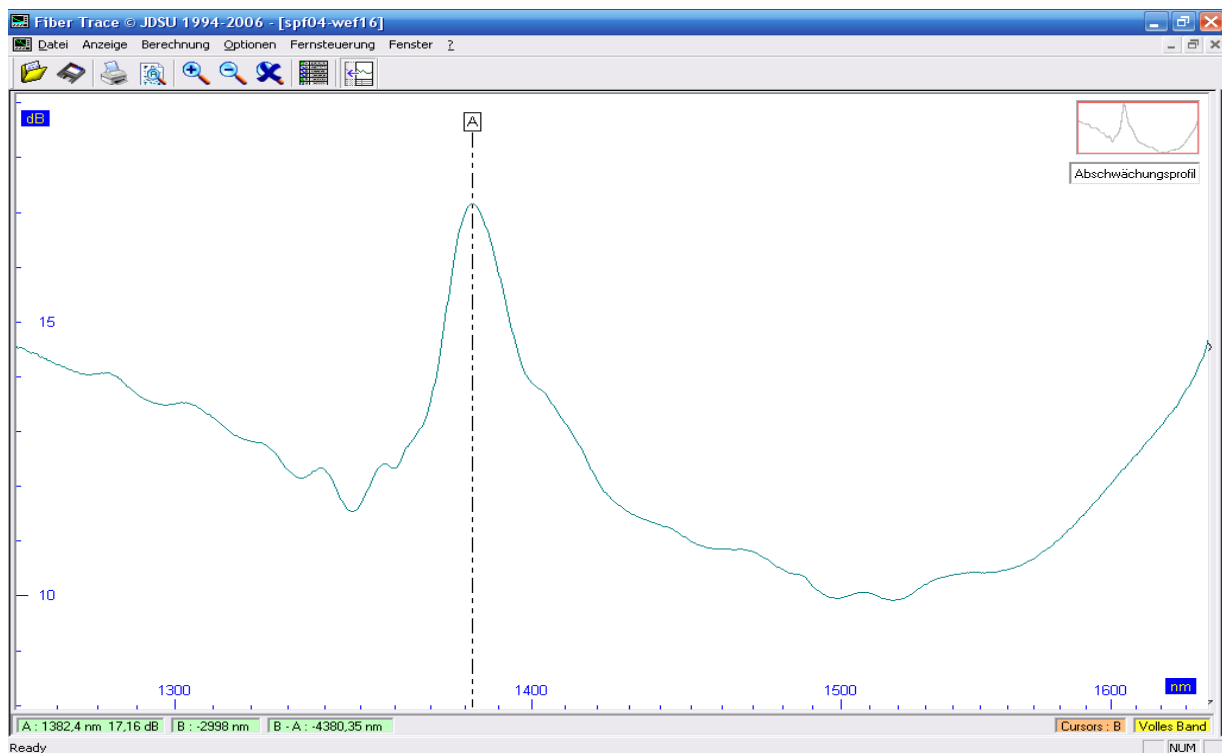


Bild 5: Ergebnis der spektralen Dämpfungsmessung am Lichtwellenleiter

Bild 5 zeigt einen starken Anstieg der Dämpfung bei 1382,4 nm. Es handelt sich also um einen älteren Lichtwellenleiter mit Wasserpeak. Oberhalb 1500 nm wächst der Dämpfungskoeffizient stark an: Hierfür sind Makrobiegeverluste verantwortlich (zu geringe Biegeradien).

5 Messungen an hochbitratigen Systemen

Bei hohen Datenraten wirken zunehmend Dispersionseffekte (Impulsverbreiterung), die zu einer Begrenzung der übertragbaren Streckenlänge bzw. Datenrate führen. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf Dispersionseffekte im Singlemode-Lichtwellenleiter.

5.1 Messung der chromatischen Dispersion

Die [chromatische Dispersion](#) ist die dominierende Dispersionsart im Singlemode-LWL. Sie wird verursacht durch unterschiedliche Geschwindigkeiten der verschiedenen Wellenlängenanteile, die der Sender emittiert, bei der Ausbreitung im Lichtwellenleiter.

Im herkömmlichen Lichtwellenleiter (positiver [Koeffizient der chromatischen Dispersion](#)) laufen die größeren Wellenlängen (rotes Ende des Spektrums) langsamer als die kleineren Wellenlängen (blaues Ende des Spektrums). Bei sichtbarem Licht wäre der Impulsanfang blau und das Impulsende rot (Bild 6).

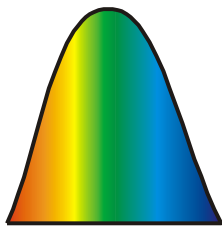


Bild 6: Impulsverbreiterung am Beispiel von sichtbarem Licht

Die chromatische Dispersion ist determiniert: Sie hängt vom LWL-Typ und von der Wellenlänge ab. Sie wird im Datenblatt des Singlemode-LWL durch den Parameter Koeffizient der chromatischen Dispersion spezifiziert.

Vor Beginn der Messung ist das passende Polynom zur Kurvenanpassung und (beim zweiseitigen Verfahren) die Streckenlänge einzustellen.

Die Messverfahren nach DIN EN 60793-1-42 und ITU-T G.650.1 ermitteln die Laufzeiten des Lichts über eine bestimmte LWL-Strecke in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Es wird in einer Richtung über einen breiten Wellenlängenbereich gemessen.

Daraus werden alle anderen Parameter berechnet: Koeffizient der chromatischen Dispersion, Nulldispersionswellenlänge, Anstieg des Koeffizienten der chromatischen Dispersion.

Der **Koeffizient der chromatischen Dispersion** $D_{CD}(\lambda)$ dient der Charakterisierung der **Eigenschaften der Faser**.

Durch Multiplikation mit der Streckenlänge erhält man die **chromatische Dispersion**: $CD(\lambda) = D_{CD}(\lambda) \cdot L$. Dieser Parameter dient der Charakterisierung der **Qualität der Übertragung**. Die chromatische Dispersion darf die Dispersionstoleranz (Dispersion Limitation) des Transceivers nicht überschreiten.

5.2 Messung der Polarisationsmodendispersion

Die Grundmode des Singlemode-LWL besteht aus zwei senkrecht zueinander schwingenden Anteilen. Durch Unregelmäßigkeiten entlang des Lichtwellenleiters breiten sich diese Anteile mit statistisch schwankenden Geschwindigkeiten aus. Es kommt zu Laufzeitunterschieden (Bild 7).

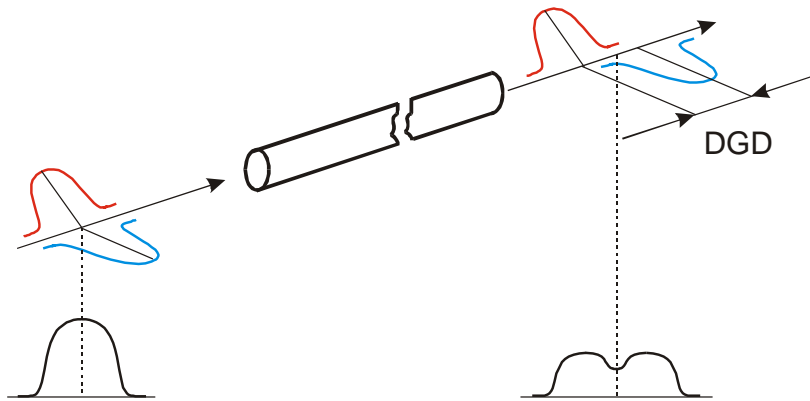


Bild 7: PMD-Effekt in der Singlemode-Faser

Dieser Effekt ist im Allgemeinen klein. Er spielt erst eine Rolle bei Datenraten ab 10 Gbit/s. Die [Polarisationsmodendispersion](#) wird im Datenblatt des Singlemode-LWL durch den Parameter [PMD-Koeffizient](#) charakterisiert.

Die Messung erfolgt in einer Richtung über einen breiten Wellenlängenbereich. Vor Beginn der Messung ist die Art der Modenkopplung (starke Modenkopplung bei Telekommunikationsfasern) und (beim zweiseitigen Verfahren) zusätzlich die Streckenlänge einzugeben.

Die PMD-Messverfahren wurden genormt in ITU-T G.650.2 und DIN EN 60793-1-48. Gemessen wird der Mittelwert der augenblicklichen Laufzeitunterschiede (DGD): [PMD-Wert](#) $\langle \Delta\tau \rangle$. Mit der Streckenlänge (aus der OTDR-Messung) wird der **PMD-Koeffizient** berechnet: $\text{PMD}_Q = \langle \Delta\tau \rangle / \sqrt{L}$.

Der PMD-Wert charakterisiert die **Qualität der Übertragung**. Für NRZ-Modulation darf der PMD-Wert folgende Grenzen nicht überschreiten:

- 2,5 Gbit/s: $\langle \Delta\tau \rangle \leq 40 \text{ ps}$
- 10 Gbit/s: $\langle \Delta\tau \rangle \leq 10 \text{ ps}$
- 40 Gbit/s: $\langle \Delta\tau \rangle \leq 2,5 \text{ ps}$
- 100 Gbit/s: $\langle \Delta\tau \rangle \leq 1 \text{ ps}$

Der PMD-Koeffizient charakterisiert die **Qualität der Faser**. Es gilt:

- $\text{PMD}_Q \leq 0,50 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ für die Fasern entsprechend ITU-T G.652.A, C; G.653.A; G.654.A; G.657.B
- $\text{PMD}_Q \leq 0,20 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ für die Fasern entsprechend ITU-T G.652.B, D; G.653.B; G.654.B, C, D, E; G.655.C, D, E; G.656; G.657.A

5.3 Ortsaufgelöste PMD-Messung

Die herkömmliche PMD-Messung (Abschnitt 5.2) erfasst nur die mittlere Polarisationsmodendispersion der Strecke. Schlechte (ältere) Faserabschnitte können gravierend den PMD-Wert der Strecke erhöhen. Deshalb kann eine ortsaufgelöste Messung (wie mit einem OTDR) erforderlich sein.

Schlechte Faserabschnitte können gefunden und gegebenenfalls ausgetauscht werden. Die PMD-OTDR-Messung ist aufwändig. Die Messzeit pro Faser und Richtung liegt bei 30 Minuten. Wegen der begrenzten Dynamik muss in beiden Richtungen gemessen werden (=> Messzeit ca. eine Stunde). Bild 8 zeigt als Beispiel die Rückstreckkurve, die kumulative PMD-Kurve und die zu dieser Kurve gehörige Ereignistabelle.

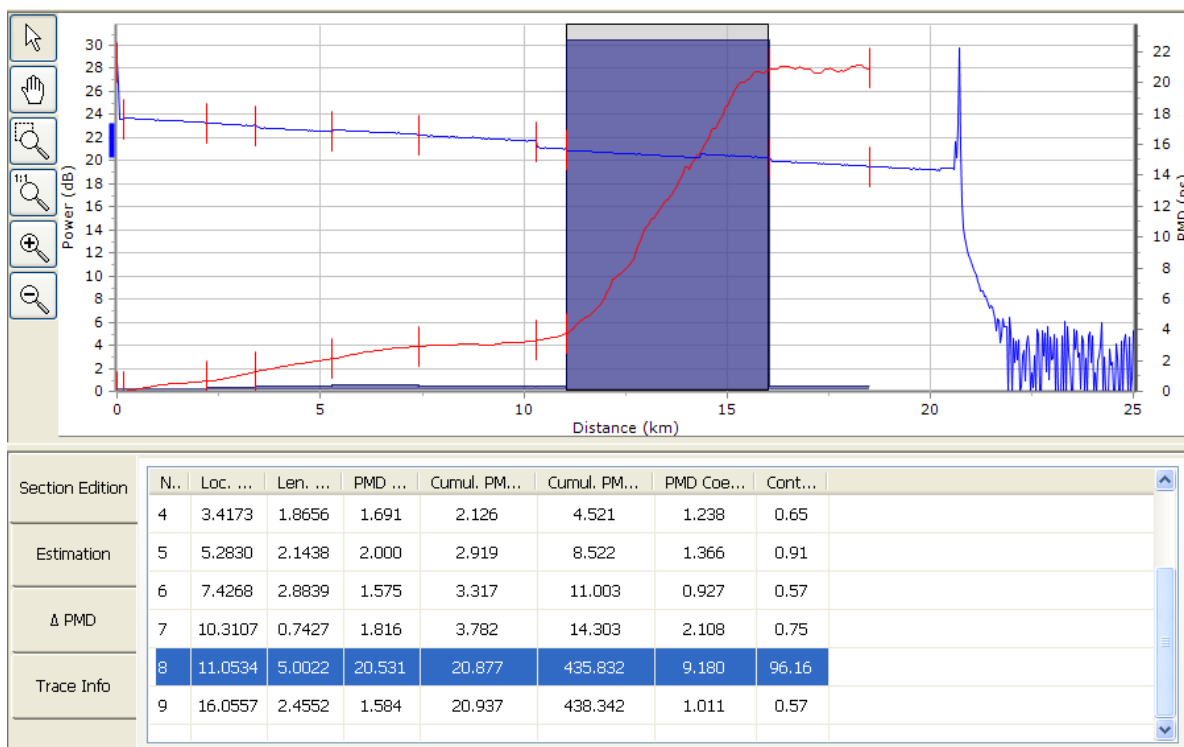


Bild 8: Ergebnis einer ortsaufgelösten PMD-Messung (Quelle: Opternus/EXFO)

6 Fasersensorik

6.1 Überblick

Bei der [Fasersensorik](#) geht es um eine ortsaufgelöste Messung verschiedener Parameter wie Temperatur, Faserspannung, Dämpfung, Reflexion mit Hilfe der Faser. Bei der **herkömmlichen Sensorik** arbeitet man mit vielen Punktsensoren. Jeder Sensor ist mit einer separaten Leitung (Faser) mit der zentralen Überwachungseinheit verbunden: aufwändig.

Quasiverteilte optische Sensoren werden mit Faser-Bragg-Gittern realisiert. Diese Bauelemente reflektieren Licht selektiv bei einer ganz bestimmten Wellenlänge. Es werden viele Faser-Bragg-Gitter mit unterschiedlichen Gitterperioden an verschiede-

nen Orten in die Faser eingebracht. Jedes Gitter reflektiert bei einer anderen Wellenlänge. Die Anzahl der Gitter ist begrenzt (maximal 60).

Die Faser wird in das Messobjekt, zum Beispiel in einen Staudamm, integriert. Wirken Kräfte, wird die Faser gedehnt oder gestaucht. Es verändert sich die Gitterperiode und damit die Wellenlänge des reflektierten Lichts.

Das Messobjekt wird mit einer breitbandigen Quelle beleuchtet. Die Verschiebung der Linien des reflektierten Lichts wird gemessen. Ein bestimmter Wellenlängenbereich kann einem bestimmten Ort zugeordnet werden.

Bei Verwendung von Singlemode-LWL können lange Strecken überwacht werden. Es ist jedoch keine räumlich kontinuierliche Überwachung möglich: kritische Stellen können übersehen werden.

Bei der **echten orts aufgelösten Sensorik** nutzt man das OTDR-Prinzip: Der jeweilige Ort wird aus der Laufzeit des Signals ermittelt. So erhält man eine quasi unbegrenzte Zahl von Messpunkten.

Licht der Wellenlänge λ_0 wird in die Faser eingekoppelt. Leistungsrückflüsse durch **Rayleighstreuung** treten immer auf (Abschnitt 3.3). Dieses Signal hat die größte Intensität und bleibt in der Wellenlänge unverändert.

Ist die eingekoppelte Leistung sehr groß, können **nichtlineare** Effekte auftreten: Ramanstreuung und Brillouinstreuung. Das gestreute und in der Faser zurücklaufende Licht hat eine andere Wellenlänge als das eingekoppelte Licht.

Die Wellenlängenverschiebung durch **Ramanstreuung** ist stärker als durch Brillouinstreuung (Bild 9). Die Intensität des Antistokes-Bandes (Wellenlängenbereich unterhalb λ_0) hängt von der Temperatur, die des Stokes-Bandes (Wellenlängenbereich oberhalb λ_0) hängt **nicht** von der Temperatur T ab. Die Wellenlänge bleibt bei Temperaturänderung fest.

Bei **Brillouinstreuung** hängt die Wellenlänge von der Faserspannung (Faserdehnung) ε und der Temperatur T ab. Die Intensität bleibt unverändert.

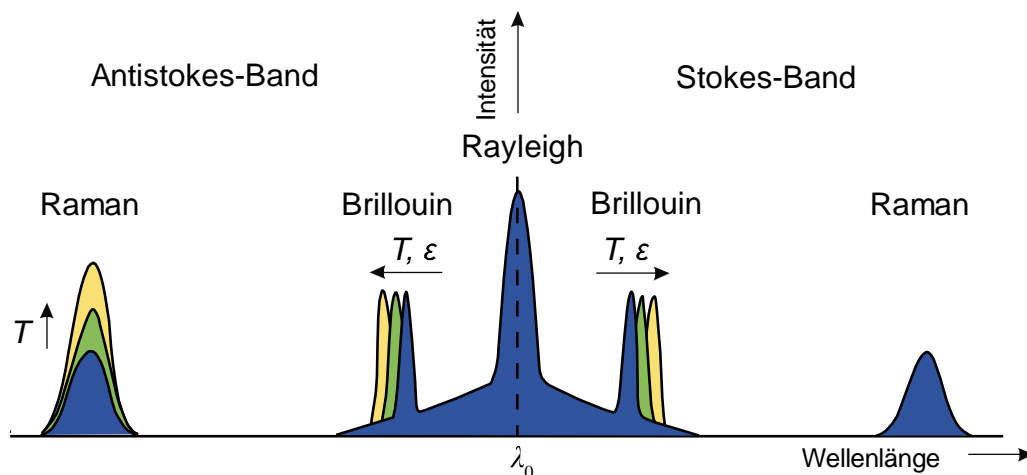


Bild 9: Streueffekte im Lichtwellenleiter

6.2 Rayleigh-Sensorik

Die herkömmliche ortsaufgelöste Faserdehnungsmessung nutzt die Brillouinstreuung. Die **Brillouinstreuung** ist ein nichtlinearer Effekt, der nur unter ganz bestimmten Bedingungen (extrem schmalbandiger Laser) entsteht.

Die herkömmliche ortsaufgelöste Temperaturmessung basiert auf der **Ramanstreuung**. Die zurückfließenden Leistungen sind sehr klein. Deren Intensitäten betragen nur ein Tausendstel der Rayleighstreuung.

Für hochauflösende Messungen hat die **Rayleighstreuung** die größte Bedeutung. Sie bewirkt keine Wellenlängenverschiebung (einfacher messbar) und hat eine höhere Intensität. Die Rayleighstreuung wird üblicherweise genutzt bei der optischen Rückstreuung (Abschnitt 3.3).

Die Rayleighstreuung entsteht durch geringfügige Unregelmäßigkeiten im Faserkern (Dichtefluktuationen, geometrische Fluktuationen) innerhalb von Streckenabschnitten der Länge dx (Bild 10). Dieser Effekt ist unvermeidbar und stets wirksam, da das Glas ein amorphes (unregelmäßiges) Material ist.

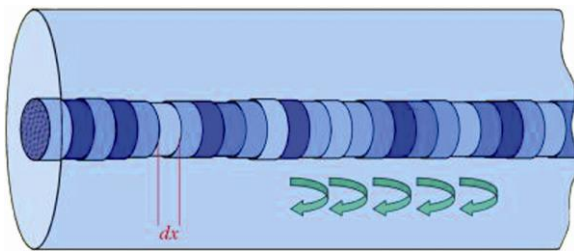


Bild 10:
Unregelmäßigkeiten entlang der Faser
(Quelle: Luna Technologies)

Man kann die Rayleighstreuung als eine Reflexion an einem kontinuierlichen schwachen Faser-Bragg-Gitter (FBG) mit zufälliger Periode auffassen. Die Faserlänge wird als Faser-Bragg-Gitter modelliert.

Entlang der Faser ergibt die Amplitude der Rayleighstreuung ein statistisches, aber **reproduzierbares Muster**, sozusagen einen für jede Faser charakteristischen **Fingerabdruck**.

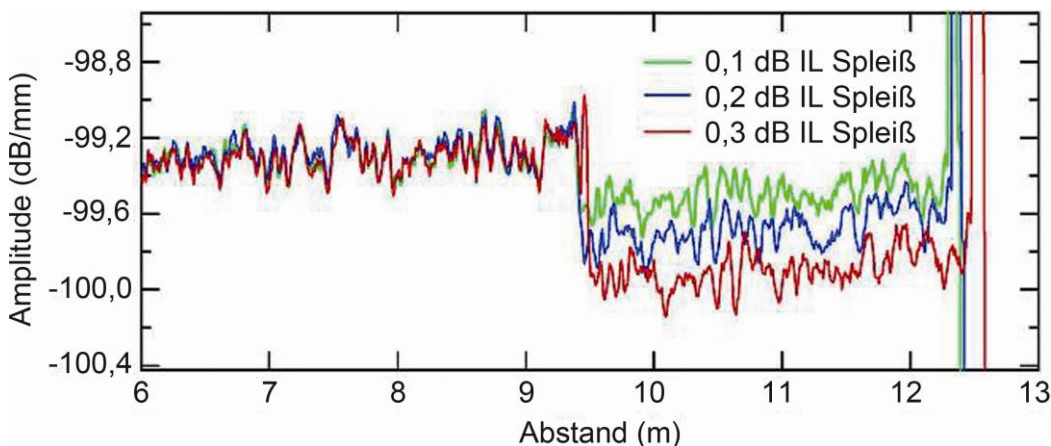


Bild 11: Darstellung der Rayleighstreuung mit hohem Auflösungsvermögen
(Quelle: Luna Technologies)

Im Bild 11 links sieht man, dass drei Messungen annähernd den gleichen Verlauf ergeben. Etwa bei 9,4 m wurde gespleißt und jeweils ein Stück Faser zurückgeschnitten. Es wurden Spleiße unterschiedlicher Dämpfung realisiert, um zu vermeiden, dass sich die Rückstreukurven überlagern. Man erkennt in Bild 11 rechts, dass die Rayleighstremuster jetzt unterschiedlich sind.

Ändern sich die äußeren Bedingungen, etwa durch Veränderung der Temperatur und/oder durch Dehnung der Faser, so ändert sich auch der Fingerabdruck. Die Faser kann somit über die Auswertung des Rayleighstremusters als Sensor für diese Parameter benutzt werden.

6.3 Hoch auflösende Dämpfungs- und Reflexionsmessung

Um Veränderungen des Fingerabdrucks feststellen zu können, muss die Rayleighstreuung mit **hoher räumlicher Auflösung** gemessen werden. Bei der herkömmlichen Rückstreuungsmessung (OTDR) sind die Impulse so lang, dass über die Oszillationen der Rayleighstreuung gemittelt wird.

Die Unregelmäßigkeiten der Messkurve, die man unter Umständen sieht, entstehen durch Rauschen infolge zu geringer Dynamik, entsprechen aber **nicht** dem Fingerabdruck! Anders als in Bild 11 ergibt eine Wiederholung der Messung mit konventionellen Rückstreuungsmessgeräten einen jeweils anderen, nicht reproduzierbaren Verlauf.

Eine Methode, die eine hohe Auflösung und Dynamik ermöglicht, ist die kohärente optische Frequenzbereichs-Reflektometrie (Coherent Optical Frequency Domain Reflectometry): **c-OFDR**.

Im c-OFDR wird der Strahl eines in der Wellenlänge durchstimmbaren cw-Lasers in ein faseroptisches Mach-Zehnder-Interferometer eingekoppelt. Der eine Arm stellt die Referenz mit fester Wellenlänge dar, der zweite wird durch die Sensorfaser gebildet. Das von der Faser zurück gestreute Licht interferiert am Ausgangskoppler mit dem Lichtanteil aus dem Referenzarm [1].

Kommerzielle Systeme von Luna Technologies arbeiten bei 1550 nm und überstreichen maximal 90 nm Wellenlängenbereich. Das ermöglicht eine räumliche Auflösung von 10 µm. Bei Faserlängen von 70 m entspricht das 7 Millionen Messpunkten.

Das OBR 6200 von Luna Technologies (Vertrieb über Polytec GmbH) ist ein transportables, robustes hochauflösendes Reflektometer zur Messung geringer Streckenlängen in der Raumfahrt, Marine, Rechenzentren, Verkehrsmitteln und bei industriellen Anwendungen. Bild 12 zeigt das Ergebnis einer hochauflösenden Messung der Dämpfung (IL) und der Reflexionsdämpfung (RL). Anders als in den Definitionen in Abschnitten 3.2 bzw. 3.4 wurden hier IL und RL mit entgegen gesetztem Vorzeichen angegeben.

Das Gerät OBR 6225-2 ist durch folgende Parameter gekennzeichnet:

- Wellenlängenscanbereich 10 nm
 - Messbereich: 20 m
 - minimaler Abstand zwischen zwei Messpunkten: 80 µm

- Wellenlängenscanbereich 4 nm
 - Messbereich: 100 m
 - minimaler Abstand zwischen zwei Messpunkten: 200 μm
- Messzeit: 10 s
- minimal messbare Reflexionsdämpfung: -129 dB
- Dynamik bei der Dämpfungsmessung: 15 dB

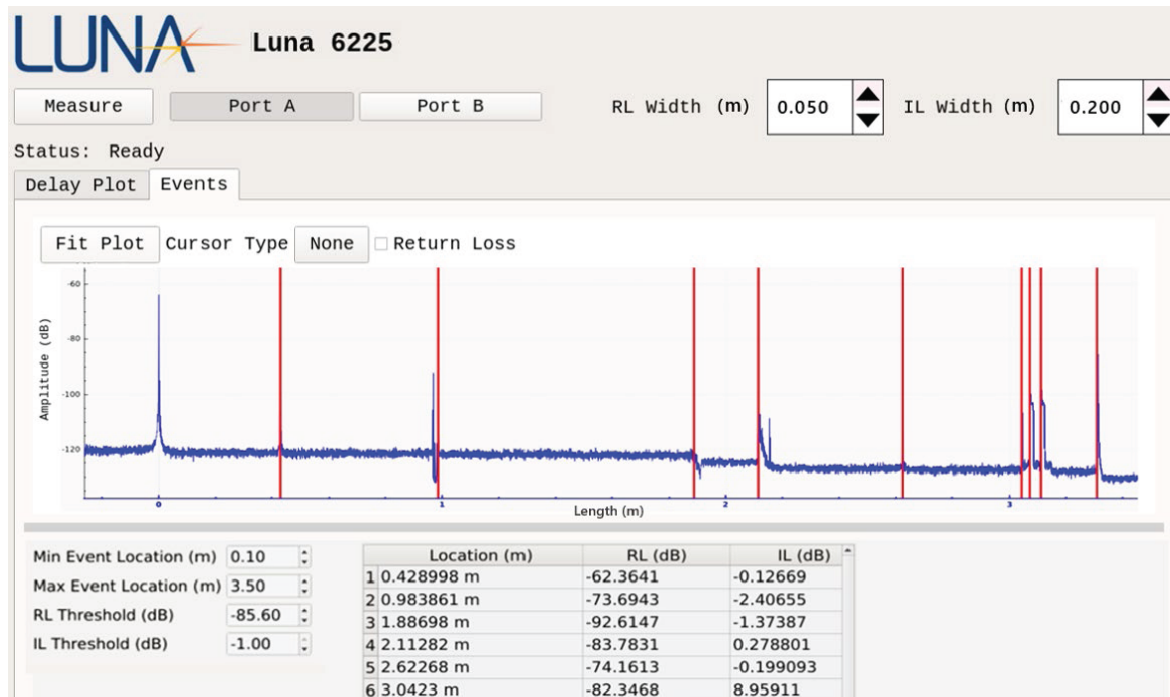


Bild 12: Ergebnis der hochauflösenden Messung mit Luna 6225

6.4 Hoch auflösende Temperatur- und Faserdehnungsmessung

Das Rayleighstremuster hängt von der Temperatur und der Faserdehnung (Fasertension) ab. Zur Messung von Temperatur- oder Dehnungsänderungen erfolgt zunächst eine Referenzmessung an der ungestörten Faser (Fingerabdruck). Anschließend wird die gestresste Faser gemessen. Bild 13 zeigt den Fingerabdruck der beiden Messungen.

Änderungen der Temperatur oder der Dehnung der Faser führen zu einer Frequenzverschiebung Δf , die proportional zu den von außen wirkenden Zustandsänderungen ist. Um zu einer verteilten Messung zu gelangen, muss das Integrationsfenster Δx über die Faserstrecke geschoben werden, so dass ein vollständiges Profil entlang des Weges entsteht.

Die Messung ist gekennzeichnet durch eine hohe Auflösung, flexible virtuelle Sensorpositionen und eine hohe Messempfindlichkeit. Als Sensor ist ein Standard-LWL geeignet. Zu beachten ist, dass das übliche Acrylat-Coating bis 85 °C spezifiziert ist.

Bei Messung höherer Temperaturen ist eine Polyimidbeschichtung (bis 350 °C) bzw. Goldbeschichtung (bis 700 °C) geeignet.

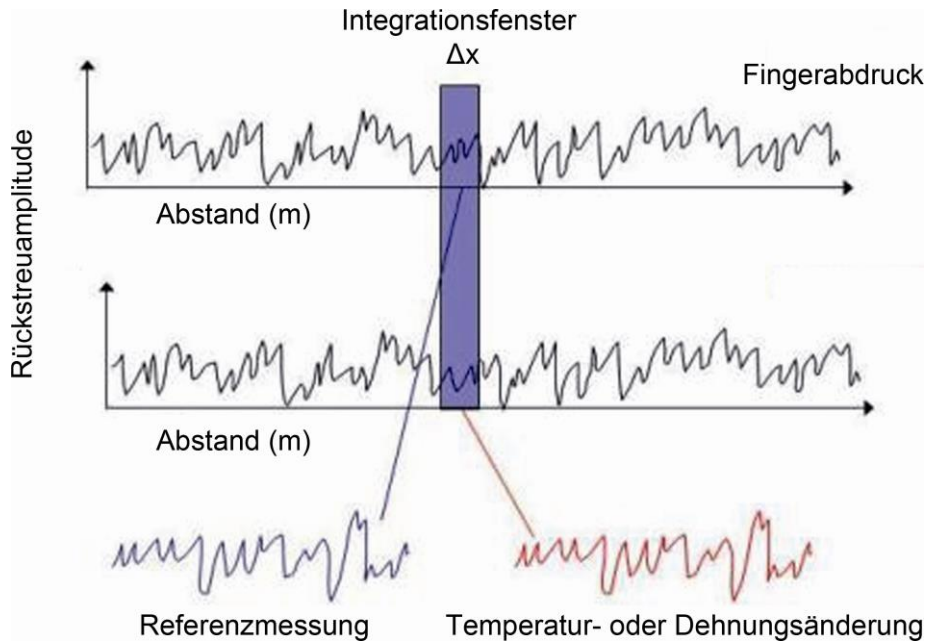


Bild 13: Messprinzip des OBR
(Quelle: Luna Technologies)

Das ODiSi 6000 (Bild 14) von Luna Technologies basiert auf dem OBR 6200 (gleiche Plattform). Die Software ist so modifiziert, dass man mehr als 1000 Spannungs- oder Temperatur-Messungen je Meter auf einem Lichtwellenleiter realisieren kann. Insgesamt können bis zu 150.000 Messpunkte erfasst werden.

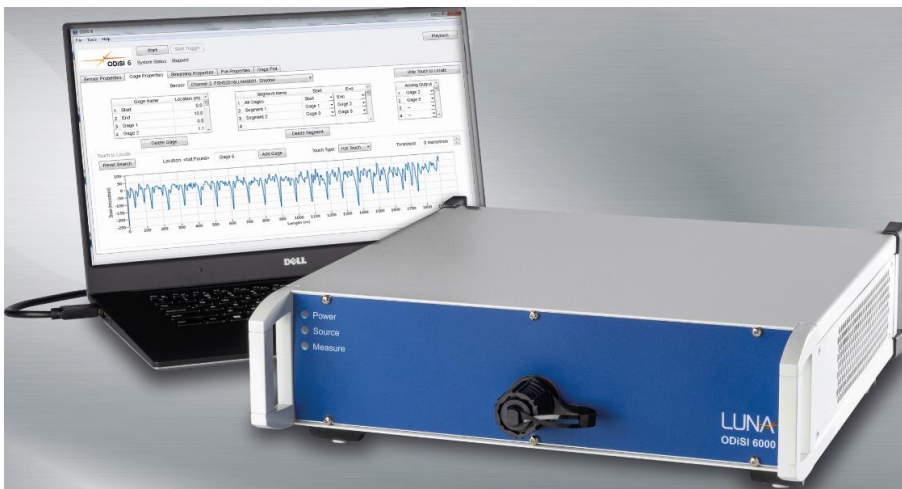


Bild 14: ODiSi 6000 von Luna Technologies (Vertrieb über Polytec GmbH)

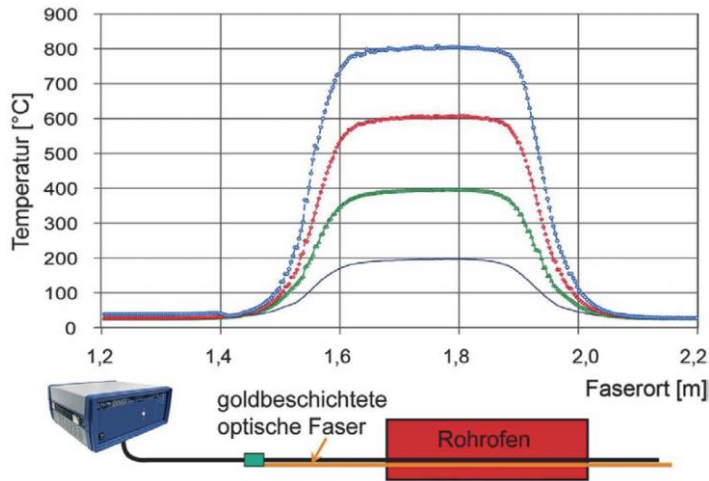
Faserdehnung (Faserspannung) und Temperatur wirken **gleichzeitig** auf das Rayleighstreuungsmuster. Bei Verwendung einer Standard-Singlemode-Faser kann das Gerät Temperatur und Dehnung nicht trennen.

Für eine reine Temperaturmessung muss man die Faser spannungsfrei, beispielsweise in einer Kapillare, führen.

In Kürze bietet Luna Technologies eine Spezialfaser an, die als reiner Temperatursensor eingesetzt werden kann. Die Messtechnik und die Algorithmen dafür sind bereits im Gerät implementiert.

Die möglichen Anwendungen sind vielgestaltig. Die Messmethode ist immer dann sinnvoll, wenn eine große Anzahl von Temperatur- oder Dehnungssensoren mit hoher Dichte abgefragt werden müssen.

Anwendungen gibt es praktisch in allen Bereichen von Forschung und Technik.



Die Rayleigh-Sensorik ist geeignet zur Aufnahme kompletter Temperaturprofile, insbesondere in den Bereichen hoher Temperaturen.

Bild 15 zeigt mehrere Temperaturprofile, die mit Hilfe einer goldbeschichteten Faser in einem Rohröfen aufgenommen wurden.

Bild 15: Messung der Temperaturverteilung in einem Ofen [1]

Das Gerät ermöglicht unter anderem

- die Charakterisierung von Spannungen in neuen Materialien und komplexen Strukturen.
- Temperaturprofilmessungen zur Optimierung kritischer Prozesse.
- Messung zwei- und dreidimensionaler Spannungsfelder.
- Bewertung von Verbindungen, bestehend aus mehreren Materialien.

Parameter ODiSI 6000:

- Messpunktastand (Anzahl der Sensoren je Meter): 0,65 mm (1.538); 1,3 mm (768); 2,6 mm (384)
- Kabellänge: 10 m, 50 m oder 100 m
- Dehnungsmessbereich: $\pm 12.000 \mu\epsilon$ (entspricht $\pm 1,2 \%$ relative Längenänderung)
- Temperaturmessbereich: -40 °C bis $+700 \text{ °C}$

7 Literatur

- [1] Dirk Samiec: Verteilte faseroptische Temperatur- und Dehnungsmessung mit sehr hoher Ortsauflösung. Photonic 6/2011, S. 34...37

Dr. Dieter Eberlein, Lichtwellenleiter-Technik
D-01219 Dresden, Barlachstraße 11

Tel.: +49-351-3129945, Fax: +49-351-3129947

E-Mail: LWLTechnik@t-online.de, Internet: www.LWLTechnik.de

Dresden 9. Juni 2020