

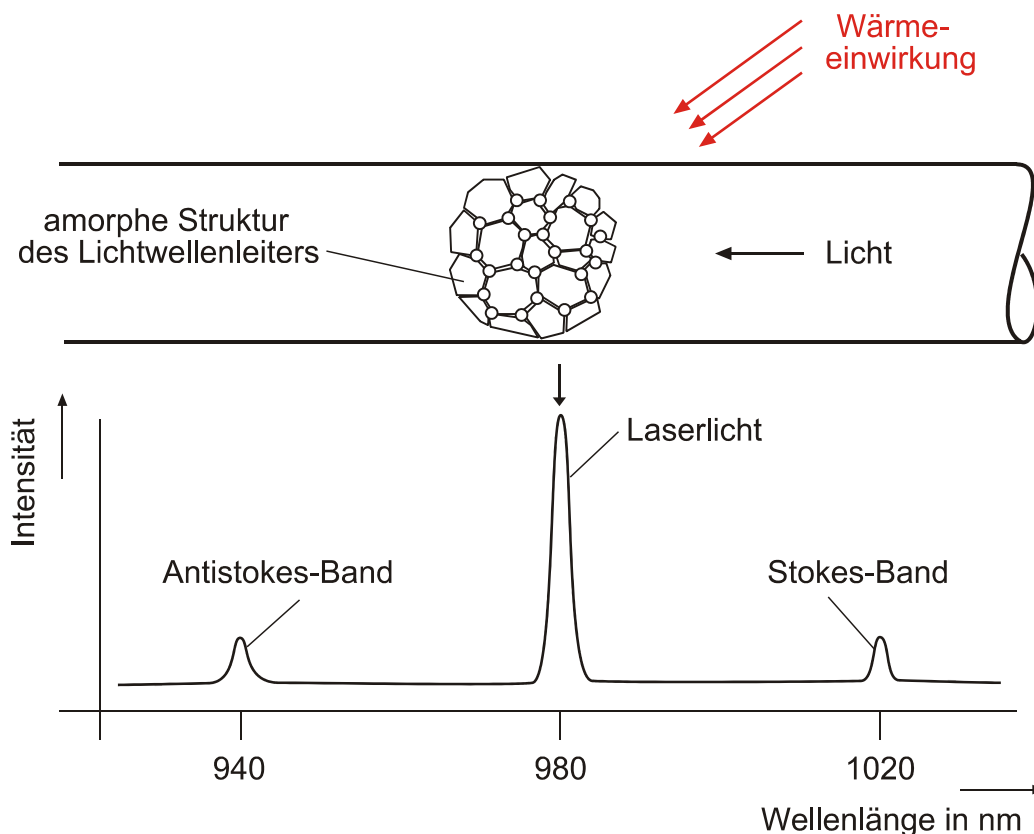
## 4 Ortsaufgelöste Messung durch Nutzung der Ramanstreuung

### 4.1 Physikalische Grundlagen

Es ist nicht nur möglich, entlang des Lichtwellenleiters ortsaufgelöst Dämpfungen und Reflexionen (vergleiche Fachbroschüre Messtechnik Fiber Optic Heft 1 und 2) sowie Faserdehnungen und Faserspannungen (Kapitel 3), sondern auch ortsaufgelöst die Temperatur zu messen.

Zur ortsaufgelösten Temperaturmessung mit einem Lichtwellenleiter aus Quarzglas nutzt man den Ramaneffekt. Neben der Rayleighstreuung, die im Lichtwellenleiter immer vorhanden ist und die für die Rückstreuung genutzt wird, entsteht zusätzlich durch Wärmeeinwirkungen die so genannte **Ramanstreuung**.

**Bild 4.1: Prinzip der Ramanstreuung**



Wärme bewirkt Gitterschwingungen im Molekülverband des amorphen Quarzglas. Koppelt man Licht in die Faser ein, kommt es zur Wechselwirkung zwischen den Lichtteilchen (Photonen) und den Elektronen des Moleküls. Es entsteht im Lichtwellenleiter eine temperaturabhängige Lichtstreuung (Ramanstreuung), die gegenüber dem einfallenden Licht spektral um den Betrag der Resonanzfrequenz der Gitter-

schwingungen nach oben und unten verschoben ist (Stokes- und Antistokes-Band: Bild 4.1).

Die Ramanstreuung ist im Vergleich zur Rayleigh-Streuung sehr klein und kann nicht mit der klassischen OTDR-Technik gemessen werden.

Während die Intensität des Antistokes-Bandes temperaturabhängig ist, ist das Stokes-Band weitgehend temperaturunabhängig. Durch Bildung des Verhältnisses der Intensitäten von Antistokes- und Stokes-Band kann die Temperatur an einem beliebigen Ort entlang des Lichtwellenleiters gemessen werden.

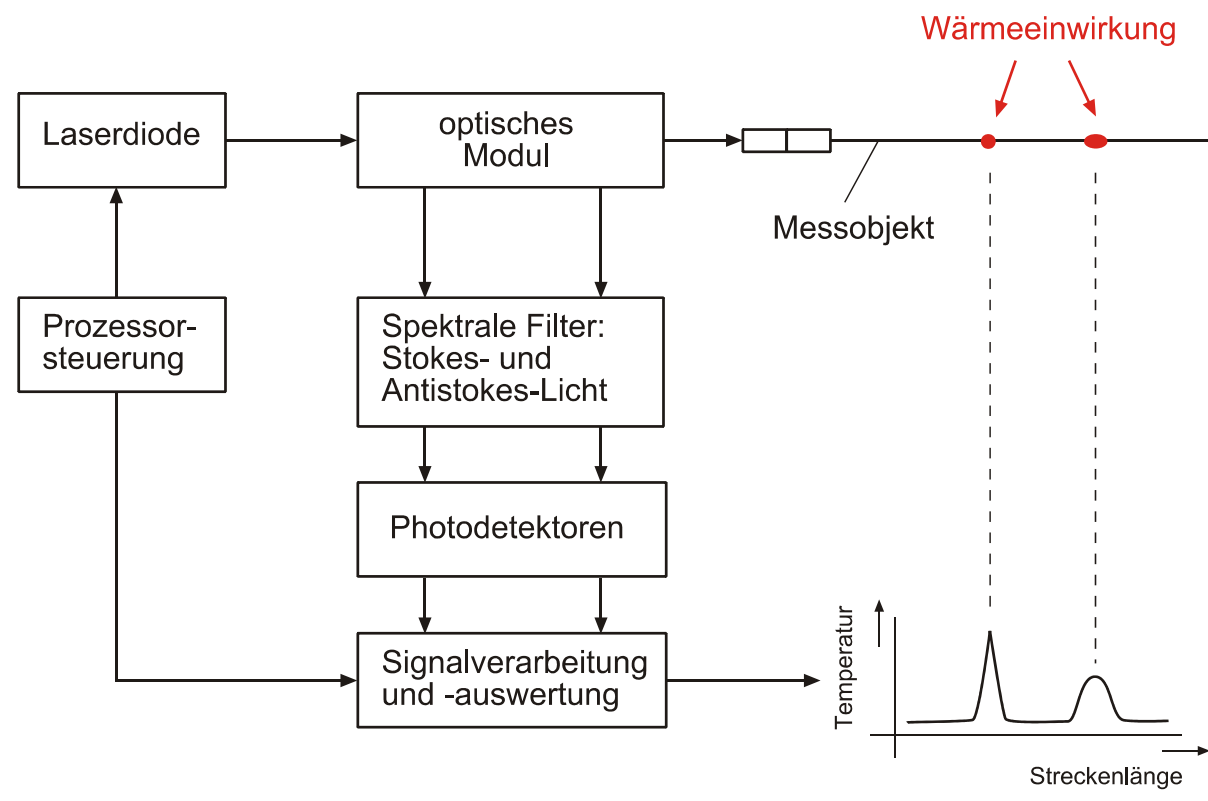
Die Intensität der Ramanstreuung beträgt etwa nur ein Tausendstel der Intensität der Rayleighstreuung. Es muss sehr empfindlich gemessen werden. Eine räumlich aufgelöste Raman-Temperaturmessung auf der Basis der OTDR-Technik benötigt einen leistungsstarken teuren Impulslaser (im Allgemeinen Festkörperlaser).

Der von der Firma LIOS Technology GmbH entwickelte OFDR-Raman-Temperatursensor (OFDR: Optical Frequency Domain Reflectometry) arbeitet nicht wie die Rückstreuungstechnik im Zeitbereich, sondern im Frequenzbereich.

Das frequenzmodulierte Signal wird nicht im Impulsbetrieb sondern kontinuierlich ausgesandt. Innerhalb eines Messzeitintervalls wird der Laser in der Intensität sinusförmig moduliert und in der Frequenz durchgestimmt. Der Frequenzhub ist ein direktes Maß für die örtliche Auflösung.

An jedem Ort entlang der Faser entsteht Ramanstreulicht, das in alle Raumrichtungen strahlt. Der Teil des Lichts, der in rückwärtiger Richtung innerhalb des Akzeptanzbereiches der Faser liegt, gelangt zurück zum Messgerät. Die beiden nach unten gerichteten Pfeile in Bild 4.2 symbolisieren das Stokes- und das Antistokes-Signal.

**Bild 4.2: Prinzip der orts aufgelösten Temperaturmessung (Quelle: LIOS)**



Das Licht wird spektral gefiltert, optisch-elektrisch gewandelt und verstärkt. Das Signal wird über den Frequenzbereich und über die Zeit gemittelt. Anschließend erfolgt die Berechnung der Fourier-Transformation, das heißt die Umrechnung in den Zeitbereich.

Als Zwischenergebnis erhält man die Raman-RückstreuKurven in Abhängigkeit von der Kabellänge. Durch geeignete Auswertung ergibt sich daraus die Fasertemperatur entlang des Lichtwellenleiters.

Dieses Verfahren lässt sich mit preiswerten Halbleiter-Laserdioden realisieren, die eine hohe Lebensdauer haben (25 Jahre) und eine vergleichsweise geringe Leistung emittieren. Der Laser ist sicher, außer bei Betrachtung mit optischen Instrumenten (Laserklasse 1M).

Das Messprinzip funktioniert sowohl an Singlemode- als auch an Multimode-LWL. Allerdings sind die Ramanstreuung und damit die Empfindlichkeit des Verfahrens in der Multimode-Faser wesentlich größer. Streckenlängen bis 18 km können gemessen werden.

Zur Gewährleistung eines hohen örtlichen Auflösungsvermögens bei gleichzeitig großen Reichweiten erfordert das Verfahren eine hohe Bandbreite des Multimode-LWL. Es werden mindestens 500 MHz·km besser jedoch 1000 MHz·km bei einer Wellenlänge von 1300 nm empfohlen. Beim Singlemode-LWL bestehen keine Anforderungen an die Bandbreite.

Bei eingebetteten, nachträglich unzugänglichen Sensor-LWL, wie zum Beispiel in Energiekabeln, empfiehlt sich der Einsatz von phosphorfreien Lichtwellenleitern. Diese zeigen keinerlei Alterungseffekte und haben keinen Wasserpeak bei 1383 nm [4.1]. In der Praxis wurden damit lange Lebensdauern erzielt.

Messgeräte, die die Rückstreuinformationen auswerten, reagieren empfindlich auf Reflexionen, da diese in der Intensität um Größenordnungen höher liegen als die gestreuten Leistungen. Am Geräteausgang befindet sich (auch bei Multimode) ein HRL/APC-Stecker („Schrägschliff“-Stecker). Reflexionen auf der Strecke müssen gering sein. Das erreicht man durch Verwendung von Steckverbindern hoher Qualität sowie einen hohen Reinigungsstandard.

## **4.2 Messtechnik und Einsatzbereiche**

Die technischen Spezifikationen des Raman-Temperaturmess-Systems lassen sich durch die Einstellung der Gerätekenngößen (Reichweite, Ortsauflösung, Temperaturgenauigkeit, Messzeit) anwendungsorientiert optimieren.

Bild 4.3 zeigt das Temperaturprofil eines etwa 350 m langen LWL-Kabels. Der Cursor steht bei 166,59 m. Dort beträgt die Temperatur 18,74 °C. Deutlich erkennbar ist ein Temperatureinbruch bei 62 m. Dort verläuft das Kabel offensichtlich außerhalb des Gebäudes.

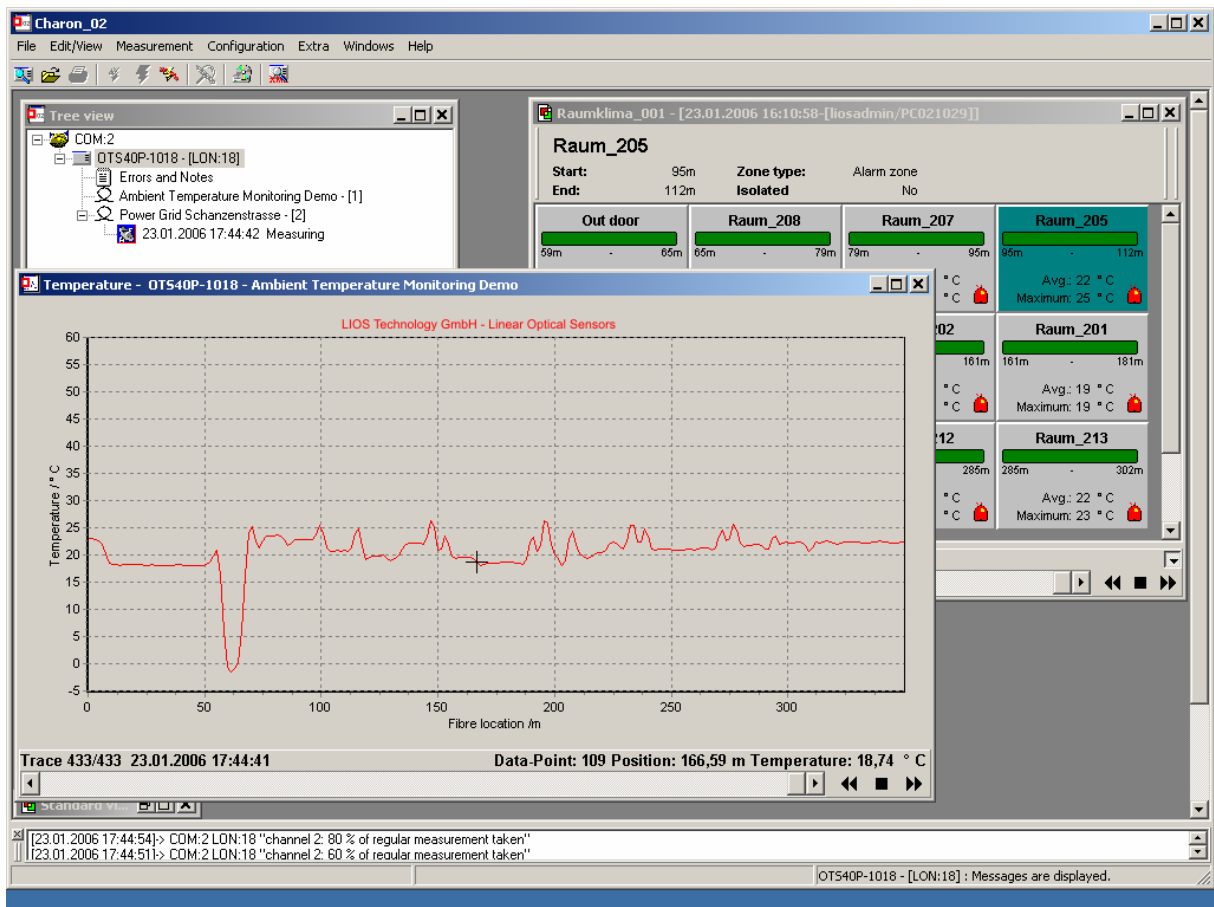
Die thermische Festigkeit der Glasfaser-Beschichtung begrenzt die maximal messbare Temperatur. Standardfasern für die Telekommunikation sind mit einer Acrylat- oder UV-gehärteten-Beschichtung versehen und für einen Temperaturbereich von -30 °C bis +85 °C ausgelegt. Glasfasern mit Polyimid-Beschichtungen können bis zu +400 °C eingesetzt werden.

In Tabelle 4.1 sind typische Parameter des Temperaturmess-Systems von LIOS Technology GmbH zusammengefasst und Bild 4.4 zeigt das Messgerät.

**Tabelle 4.1: Typische Parameter orts aufgelöster Temperaturmess-Systeme**

Gerätetyp	OTS180P	OTS400P
Reichweite der Messung	variabel, bis 18 km	variabel, bis 40 km
Ortsauflösung	0,5 m, 1 m, 3 m	2 m, 3 m, 4 m
Temperaturauflösung	0,05 K bis 0,5 K	0,1 K bis 1 K
Fasertypen	<b>GI 50/125 µm</b> BLP (1300 nm) > 500 bzw. 1000 MHz·km	<b>SM 9/125</b> entsprechend ITU-T G652.C oder D
Faserschalter	bis zu 16 Kanäle pro Gerät	

**Bild 4.3: Ergebnis der orts aufgelösten Temperaturmessung (Quelle: LIOS)**



**Bild 4.4:**  
**Ansicht des**  
**DTS-Systems**

Typische Anwendungen für lineare faseroptische Temperatursensoren sind sicherheitsrelevante Bereiche, wie die Brandmeldung in Straßen-, Bahn- oder Servicetunneln, sowie in Lagerstätten, Flugzeughangars oder radioaktiv belasteten Zwischenlagerstätten.

Zunehmend an Bedeutung gewinnt die thermische Zustandsüberwachung von hoch oder volatil belasteten Energiekabeln und Freileitungen durch in Edelstahlröhrchen eingebettete Lichtwellenleiter (FIMT: Fibre in Metal Tube) zur dynamischen Belastbarkeitsanalyse.

Weitere industrielle Anwendungen:

- Effizienzsteigerung von Öl- und Gas-Förderanlagen
- Gewährleistung sicherer Operationszustände von industriellen Induktionsschmelzöfen
- Temperaturüberwachung von großchemischen Prozessen
- Detektierung von Lecks an Dämmen, Deichen oder Pipelines

Der Lichtwellenleiter-Sensor hat folgende Merkmale:

- passiv und streckenneutral: keine Beeinflussung des Temperaturfeldes
- kleines Volumen, geringes Gewicht, flexibel und einfach verlegbar
- Einbau auch an später nicht mehr zugänglichen Stellen
- unempfindlich gegenüber elektromagnetischen Einflüssen
- keine Potenzialverschleppungen, keine Erdschleifen
- einsetzbar in explosionsgefährdeten Anlagen
- bei Kombination mit Edelstahlröhrchen: hoher mechanischer Schutz, unter hohem Druck einsetzbar
- unterschiedliche Ummantlungsmöglichkeiten, beispielsweise mit halogenfreien schwer brennbaren Materialien; keine Korrosionsprobleme

Das Messverfahren hat folgende Merkmale:

- direkte Temperaturmessung in Kelvinskala
- örtlich verteilte Temperaturmessung bezogen auf eine Strecke, Fläche oder Volumen
- punktgenaue Lokalisierung von lokalen Erwärmungen
- Möglichkeit des redundanten Aufbaus
- rechnergestützte Analyse und Visualisierung
- Auswertung der zeitlichen und örtlichen Temperaturänderung
- geringe Wartungskosten

### **4.3 Zusammenfassung**

Zur orts aufgelösten Temperaturmessung nutzt man den Effekt der Ramanstreuung. Wie bei der Rückstreuung (OTDR) und der Faserdehnungsmessung (B-OTDR), muss nur ein Ende des Lichtwellenleiters zugänglich sein. Im Gegensatz zum OTDR-Verfahren wird kein kurzer Impuls, sondern ein kontinuierliches frequenzmoduliertes Signal in die Faser eingekoppelt. So wird es möglich, die Empfindlichkeit der Messung zu erhöhen und die sehr kleine Ramanstreuung zu messen.

Besteht Freiheit bei der Wahl des LWL-Typs sollte man einen Multimode-LWL mit hinreichend großem Bandbreite-Längen-Produkt wählen. Dann erreicht man die größte Dynamik und das höchste Auflösungsvermögen. Das beschriebene orts aufgelöste Temperatur-Messverfahren hat weltweit vielfältige Anwendungen gefunden.