

# Hochgenaue Fehlerlokalisierung

## 1 Aufgabenstellung

An einem herkömmlichen optischen Rückstremessgerät kann man als minimale Impulsbreite 3 ns einstellen, was theoretisch einem Auflösungsvermögen von 0,3 m entspricht. In der Praxis liegt das Auflösungsvermögen bestenfalls im Meterbereich. Trotz dieses relativ geringen Auflösungsvermögens ermöglicht das Rückstremessgerät eine vergleichsweise exakte Lokalisierung des Fehlerortes im Zentimeterbereich.

Mit einem [Zentimeter-OTDR](#) kann man nicht nur den Ort sehr genau lokalisieren, sondern auch ein sehr hohes Auflösungsvermögen realisieren (sehr geringe Dämpfung- und Ereignistotzonen).

## 2 Fehlerlokalisierung in LWL-Kabeln

Die [Kabelbrechzahl](#) kann man ohne Kenntnis der [Faserbrechzahl](#) und ohne Kenntnis des Verseilzuschlages ermitteln, sofern die Kabellänge bekannt ist. Die Kabellänge ist ersichtlich aus dem Zählstreifen im Kabel bzw. aus dem Kabelaufdruck.

Man führt eine Rückstremessung durch und setzt den Cursor auf das Ende der Strecke (unmittelbar vor dem Anstieg des Reflexionspeaks). Dann wird die angezeigte Länge mit der bekannten Kabellänge verglichen.

Anschließend wird die Brechzahleinstellung am Messgerät derart verändert, dass die vom Messgerät angezeigte Länge mit der bekannten Kabellänge übereinstimmt. Dann kann die Kabelbrechzahl abgelesen werden.

Diese ist um den Verseilzuschlag größer als die Faserbrechzahl. Sie kann größer als 1,5 sein. Die Kabelbrechzahl wird mit dem Messprotokoll hinterlegt.

Zur Fehlerlokalisierung wird folgendermaßen vorgegangen: Kabelbrechzahl einstellen und Rückstremessung durchführen. Cursor an das Ende der Strecke setzen; Kabellänge ablesen.

Insbesondere bei größeren Längen kann der ermittelte Fehlerort **ungenau** sein, bedingt durch Ungenauigkeit der Brechzahleinstellung, unterschiedliche Verseilzuschläge der Kabelabschnitte durch unterschiedlichen Kabelaufbau, Skalierungsfehler und Fehler durch endlichen Messpunktstand.

Um die Genauigkeit zu erhöhen, setzt man einen zweiten Cursor an eine Stelle, dessen Ort bekannt ist, zum Beispiel an die nächstgelegene Muffe (Bezugsmuffe).

Aus dem Cursorabstand wird der Abstand zum Ort des Fehlers ermittelt: Mit dem Kabelroller, rollt man ausgehend von der Bezugsmuffe den ermittelten Abstand ab und markiert den Fehlerort.

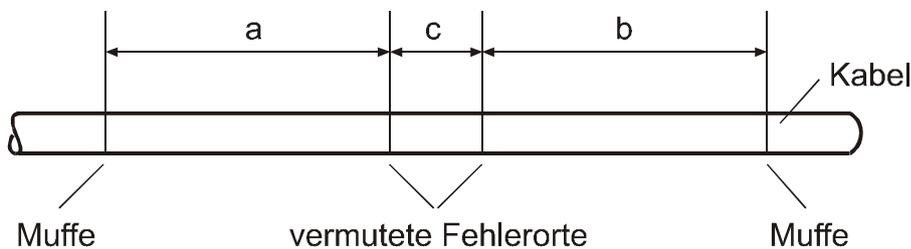
Ist das Kabel nicht über die gesamte Länge frei zugänglich, orientiert man sich am Kabelaufdruck. Kleine Abweichungen vom tatsächlichen Fehlerort sind unkritisch, da dieser meist ohnehin sichtbar ist (das Kabel weist Beschädigungen auf). Nur selten ist die Faser im Kabel gebrochen, ohne dass äußere Einwirkungen erkennbar sind.

Zur Erhöhung der Messgenauigkeit oder für den Fall, dass die Kabelbrechzahl **nicht** bekannt ist, wird ein **iteratives Verfahren** empfohlen:

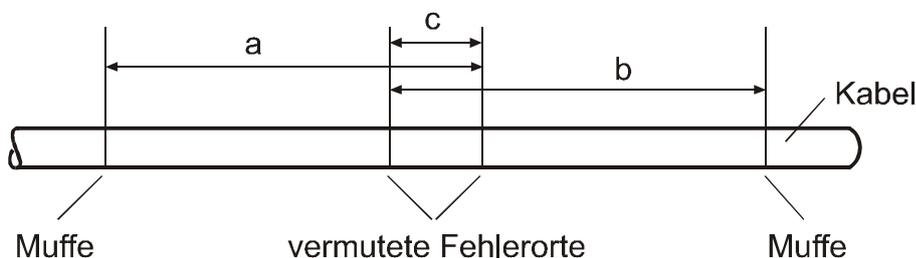
- Kabelbrechzahl einstellen, die den Erfahrungswerten entspricht, beispielsweise 1,5.
- Rückstreuungsmessung wie oben beschrieben **von zwei Seiten** vornehmen.
- Längen a und b jeweils zwischen der nächstgelegenen Muffe und dem Fehlerort ermitteln.
- Vermutete Fehlerorte auf dem Kabel markieren.

Näherungsweise liegt der Fehlerort etwa in der Mitte zwischen den vermuteten Fehlerorten. Zur weiteren Erhöhung der Genauigkeit kann man folgendermaßen vorgehen:

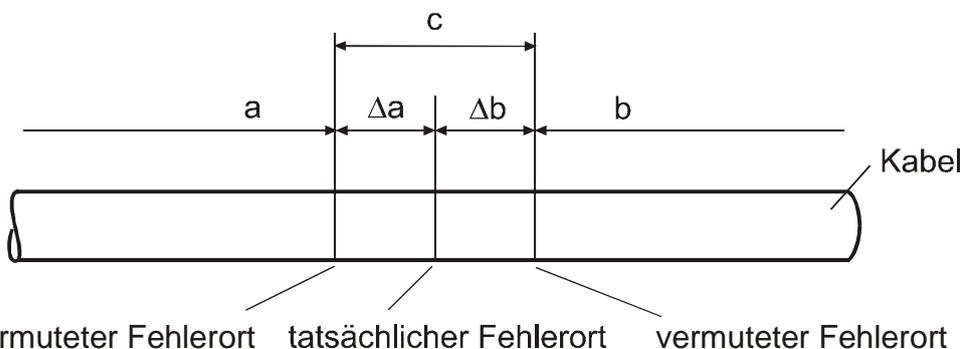
- Abstand c zwischen den vermuteten Fehlerorten ermitteln.



**Bild 1: Fehlerlokalisierung, ausgehend von der nächstgelegenen linken bzw. rechten Muffe: Längen a und b zu klein ermittelt,  $c > 0$ .**

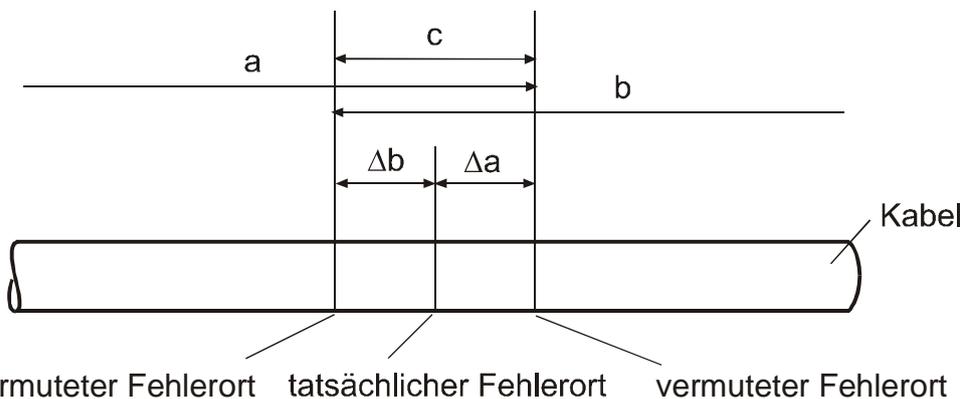


**Bild 2: Fehlerlokalisierung, ausgehend von der nächstgelegenen linken bzw. rechten Muffe: Längen a und b zu groß ermittelt,  $c < 0$ .**



**Bild 3: Ermittlung des tatsächlichen Fehlerortes aus den vermuteten Fehlerorten für den Fall, dass  $c > 0$ .**

- Bei einer Lücke zwischen den vermuteten Fehlerorten, ist  $c$  positiv anzusetzen (Bild 1).
- Falls sich die Längen  $a$  und  $b$  im Zentrum des fehlerhaften Kabelabschnittes überlappen, ist  $c$  negativ anzusetzen (Bild 2).
- Die mit dem Rückstreumessgerät gemessene Länge zwischen den beiden Muffen beträgt  $a + b$ .
- Die tatsächliche Länge ist  $a + b + c$ .
- Die Länge wurde folglich wegen fehlerhafter Brechzahleinstellung um einen Faktor  $F = \frac{a+b+c}{a+b}$  falsch gemessen.
- Die gemessenen Längen sind um diesen Faktor zu korrigieren:
  - Ersetze  $a$  durch  $a \cdot F = a \cdot \frac{a+b+c}{a+b}$ . Differenz:  $\Delta a = a \cdot F - a = a \cdot (F - 1) = \frac{a \cdot c}{a+b}$
  - Ersetze  $b$  durch  $b \cdot F = b \cdot \frac{a+b+c}{a+b}$ . Differenz:  $\Delta b = b \cdot F - b = b \cdot (F - 1) = \frac{b \cdot c}{a+b}$
- Die markierten Fehlerorte sind um die Längen  $\Delta a$  bzw.  $\Delta b$  zu korrigieren (Bild 3 und Bild 4).



**Bild 4: Ermittlung des tatsächlichen Fehlerortes aus den vermuteten Fehlerorten für den Fall, dass  $c < 0$ .**

Wichtig ist, dass die korrigierten Längen in der richtigen Richtung bezüglich des vermuteten Fehlerortes aufgetragen werden:

- Falls  $c > 0$  ist  $\Delta a > 0$  und  $\Delta b > 0$ :  $\Delta a$  ist nach rechts und  $\Delta b$  nach links aufzutragen (gegenläufig) (Bild 3).
- Falls  $c < 0$  ist  $\Delta a < 0$  und  $\Delta b < 0$ :  $\Delta a$  ist nach links und  $\Delta b$  nach rechts aufzutragen (gegenläufig) (Bild 4).

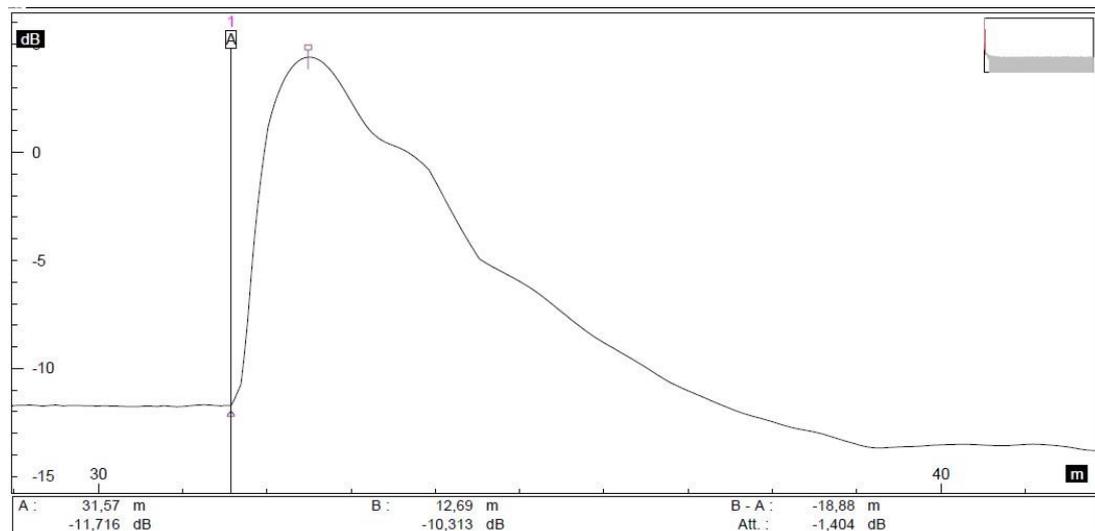
Falls der ermittelte „tatsächliche“ Fehlerort, der von rechts ermittelt wurde nicht identisch mit dem „tatsächlichen“ Fehlerort ist, der von links ermittelt wurde, kann bei Bedarf das Iterationsverfahren wiederholt werden.

Dies erfolgt rein rechnerisch ohne nochmalige Rückstreumessung. Dabei ist für  $c$  der Abstand zwischen den „tatsächlichen“ Fehlerorten zu setzen,  $a + \Delta a$  entspricht dem neuen Wert für  $a$  und  $b + \Delta b$  entspricht dem neuen Wert für  $b$ .

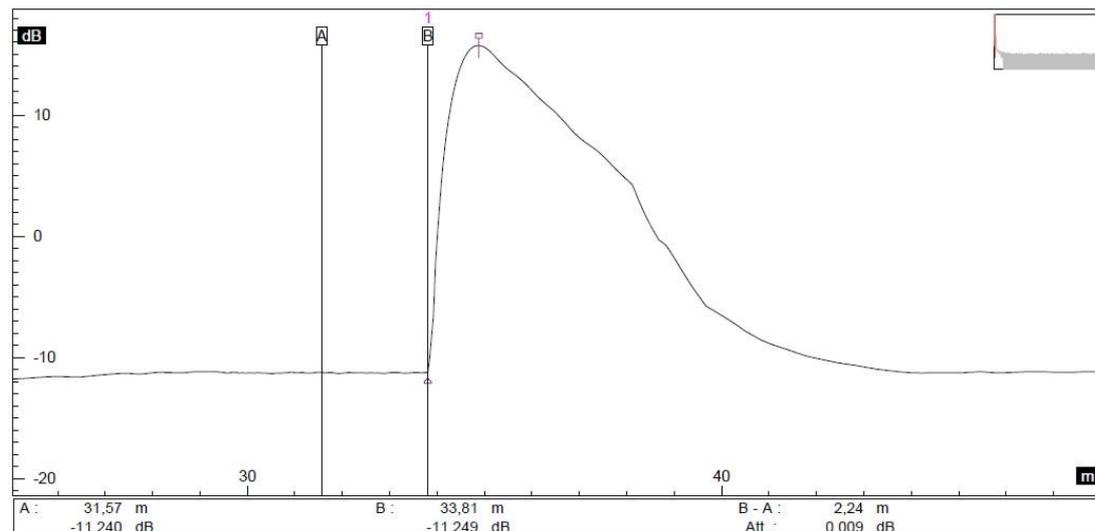
### 3 Exakte Lokalisierung eines Faserbruchs in einer Muffe

Es wurde ein fünf Meter langes Stück symmetrisch zur Spleißstelle aus dem Kabel herausgeschnitten. An das Rückstreugerät wurde ein Pigtail hinreichender Länge angeschlossen (31,57 m). Die Messung erfolgte mit 3 ns Impulsbreite und 4 cm Punktabstand bei der Wellenlänge 1550 nm.

Der Cursor A wurde an das Ende des Pigtails gesetzt (Referenzierung der Länge; Bild 5 oben). Das herausgeschnittene Stück wurde an das Pigtail angespleißt, die Messung wiederholt und der Cursor B an das Ende der Strecke gesetzt (Messung der Länge; Bild 5 unten). Aus der Differenz der Cursors kann sehr genau die Lage des Faserbruchs ermittelt werden.



Ereignis (2)	Distanz (m)	Dämpfung (dB)	Reflexion (dB)	Steigung (dB/km)	Rel. Entf. (m)	Link Budget (dB)	Unsicherheit
1	31,57		-39,26		31,57		



Ereignis (4)	Distanz (m)	Dämpfung (dB)	Reflexion (dB)	Steigung (dB/km)	Rel. Entf. (m)	Link Budget (dB)	Unsicherheit
1	33,81	0,026	>-17,53		33,81		

**Bild 5: Sehr genaue Lokalisierung des Fehlerortes (oben: Referenzierung, unten Messung)**

Aus Bild 5 ist folgendes erkennbar:

- Oben (Referenzierung): Cursor A bei 31,57 m.
- Unten (Messung): Cursor B bei 33,81 m.
- Differenz  $B - A = 2,24$  m. Der Fehler liegt annähernd in der Mitte, also nahe der Spleißstelle.
- Oben: Die Reflexionsdämpfung liegt bei 39 dB. Dieser Wert entsteht bei einer unkontrolliert gebrochenen Faser.
- Unten: Die Reflexionsdämpfung ist  $< 17$  dB, zum Beispiel 14 dB, was einer senkrecht gebrochenen Faser entspricht. Kann nur entstehen, wenn der Spleiß gar nicht zustande kam. Wäre die Faser nach dem Spleißen gebrochen würde das unkontrolliert geschehen und nicht als senkrechter Bruch. Die Reflexionsdämpfung wäre wesentlich höher.

Die Angaben zu den Reflexionsdämpfungen ermöglichen Aussagen zu möglichen Ursachen des Faserbruchs.

Das Verfahren funktioniert auch bei längeren Strecken, da ja nur der Ort des Reflexionspeaks gemessen werden muss und die Rückstreckkurve verrauscht sein kann. Ein Ereignis in der Nähe des Bruches ist nützlich (vergleiche Abschnitt 2), um den Längenfehler, zum Beispiel durch ungenaue Brechzahleinstellung, zu minimieren. Bei geringem Abstand wird der Längenfehler klein.

#### 4 Zentimeter-OTDR

Das Zentimeter-OTDR ist geeignet für den Einsatz im Fahrzeug-, Flugzeug- und Schiffsbau im zivilen und militärischen Bereich. Es ermöglicht die Charakterisierung von kurzen Strecken oder optischen Komponenten, wie Stecker, Koppler usw. mit einer Auflösung im Zentimeterbereich und mit hoher Empfindlichkeit.

Dicht benachbarte Ereignisse können aufgelöst werden. Schwache Reflexionen oder Dämpfungen hinter starken Reflexionen sind messbar.

Das Gerät nutzt die Photonenzähltechnik (Photon-Counting: US-Patent 7,593,098). Diese ermöglicht eine Empfindlichkeit besser als -100 dBm und eine Bandbreite größer als 2 GHz. Das Messergebnis ist gekennzeichnet durch steile Impulsflanken, geringe Totzonen und ein hohes Auflösungsvermögen.

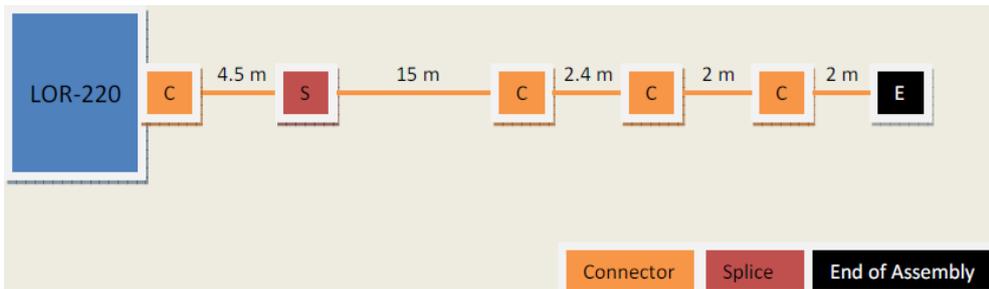
Das Messgerät LOR-220 von Luciol Instruments ist verfügbar für

- Multimode-LWL
  - Wellenlängen 670 nm, 850 nm
  - Kerndurchmesser der Faser: 200  $\mu\text{m}$ , 105  $\mu\text{m}$ , 62,5  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$
- Singlemode-LWL
  - Wellenlängen 1310 nm, 1550 nm, 1625 nm
  - Faser: 9/125  $\mu\text{m}$

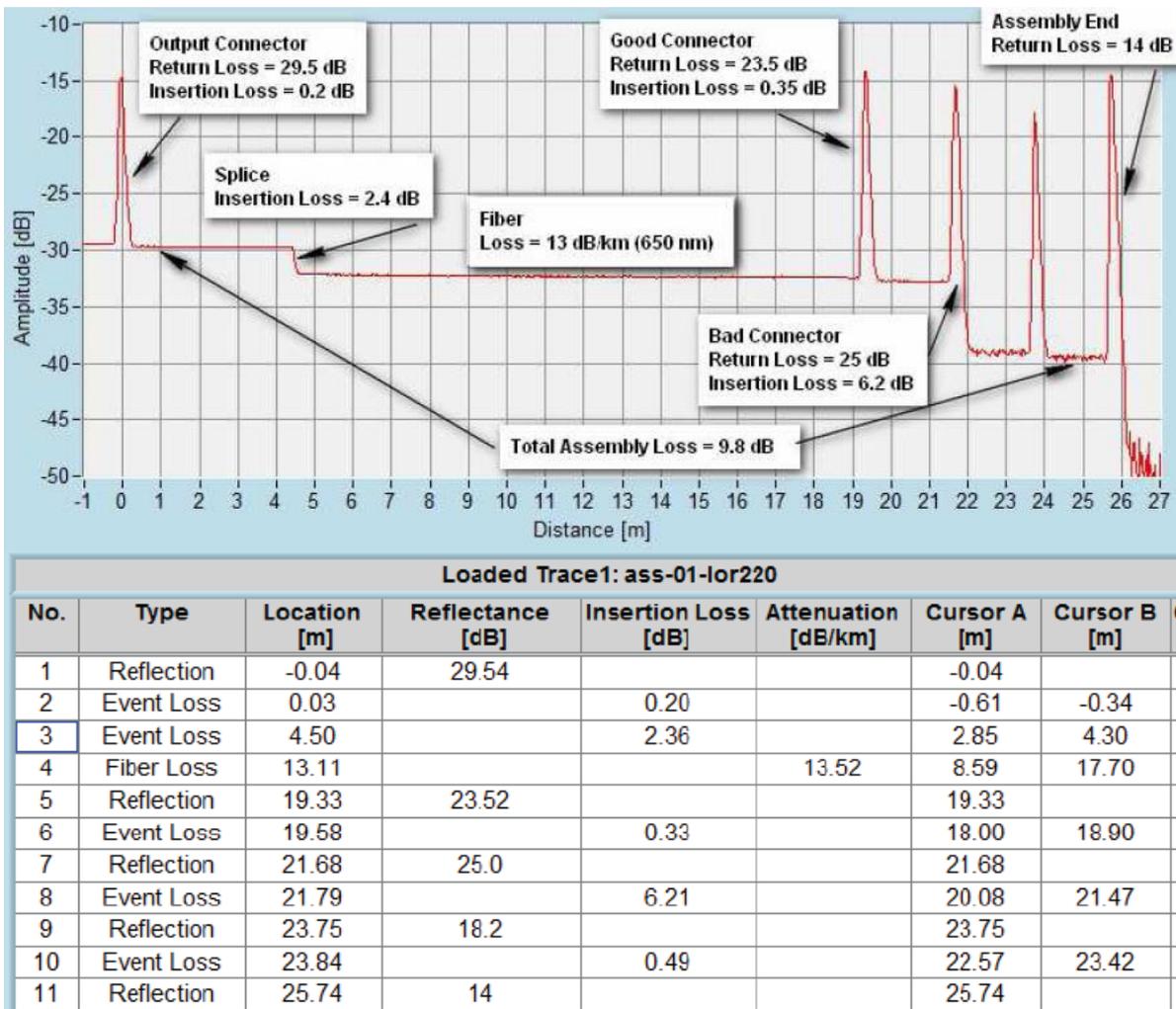
Optische Parameter:

- Impulsbreite: 1 ns
- Messpunktastand: 2,5 cm (250 ps)
- Ereignistotzone: 10 cm; Dämpfungstotzone: 40 cm

Bild 6 zeigt eine Strecke mit dicht benachbarten Ereignissen und Bild 7 die zugehörige Rückstreckkurve (Faser 62,5/125 µm; Wellenlänge 650 nm).



**Bild 6: Messobjekt** (Quelle: Luciol Instruments)



**Bild 7: Ergebnis der hoch auflösenden Messung** (Quelle: Luciol Instruments)

Bild 7 zeigt die Rückstreckkurve, eine Erläuterung der Bedeutung der einzelnen Ereignisse und die Ereignistabelle. Die Dämpfung des Gerätesteckers kann gemessen werden, da die Rayleighstreckkurve vor dem Ort Null dargestellt wird.

Auf einen Vorlauf-LWL kann verzichtet werden. Am Streckenende befindet sich ein senkrechter Glas-Luft-Übergang (Reflexionsdämpfung 14 dB), beispielsweise ein offener PC-Stecker. Die Gesamtdämpfung der Strecke beträgt 9,8 dB.

## **5 Zusammenfassung**

Es wurde gezeigt, dass man mit einem herkömmlichen optischen Rückstreugerät, welches ein Auflösungsvermögen bis zu etwa einem Meter ermöglicht einen Fehlerort bis Zentimetergenauigkeit ermitteln kann. Das funktioniert auch bei langen Strecken. Um den Messfehler klein zu halten, sollte es einen Bezugsort (Ereignis mit bekanntem Ort) in der Nähe des Faserbruchs geben.

Mit einem Zentimeter-OTDR kann man nicht nur der Ort sehr genau lokalisieren, sondern darüber hinaus ein hohes Auflösungsvermögen realisieren.

**Dr. Dieter Eberlein, Lichtwellenleiter-Technik**  
**D-01219 Dresden, Barlachstraße 11**  
**Tel.: +49-351-3129945, Fax: +49-351-3129947**  
**E-Mail: [LWLTechnik@t-online.de](mailto:LWLTechnik@t-online.de), Internet: [www.LWLTechnik.de](http://www.LWLTechnik.de)**  
**Dresden 1. Juni 2020**