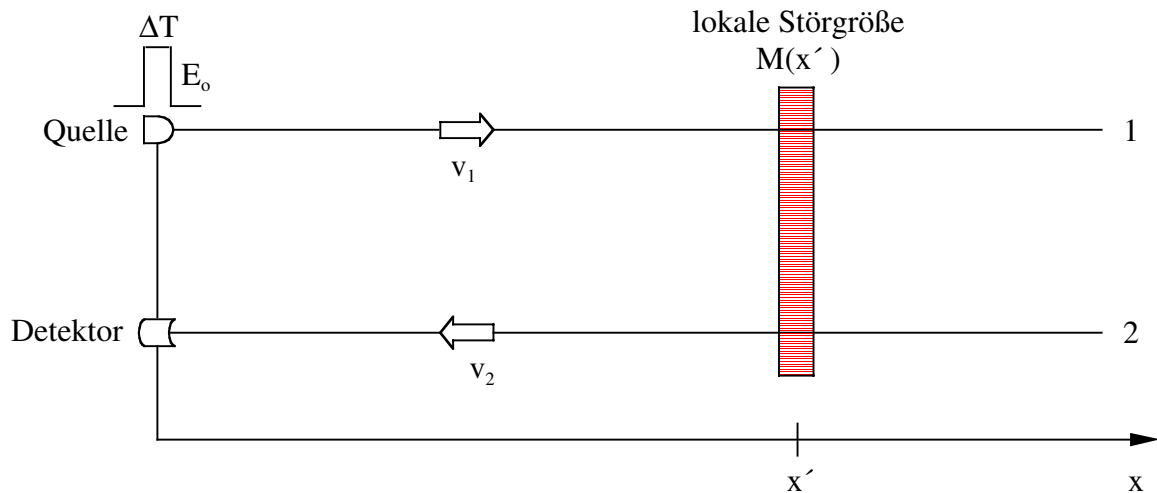


Faser Sensor mit räumlicher Auflösung des Messfeldes
(DOFS – distributed optical fibre sensing)

Messgrößen können über Distanzen von ca. 100 m mit einer räumlichen Auflösung von 0.1 – 1 m bis zu einer Genauigkeit von etwa 1% bestimmt werden.

Prinzipskizze:



Quelle: Impulshalbleiterlaser
(Kurzzeit-Lichtimpuls, Energie $E_0=1$ nJ, Impulsdauer $\Delta T \leq 500$ ps)

Signalanteile: Impulsgeschwindigkeit v_1 im Strang 1

Bruchteil α_{s1} der Impulsenergie wird pro Längeneinheit absorbiert bzw. ausgekoppelt (Verluste)

weiterer Anteil α_{c1} wird pro Längeneinheit in den Rückkehrstrang 2 eingekoppelt (bzw. innerhalb des Strangs 1 mit der Impulsgeschwindigkeit v_2 rückgestreut)

in beiden Strängen werden die Impulse durch diskrete bzw. kontinuierlich verteilte lokale Störungen $M(x')$ an unterschiedlichen Orten x' entlang der x -Achse beeinflusst

Im **Normzustand**, bei fehlender Störung M , ergeben sich folgende energetische Verluste pro Stranglänge δx :

relativer Verlust im Teilstrang 1 mit der Länge δx am Ort x

$$\frac{\delta E_1(x)}{E_1(x)} = -(\alpha_{s1} + \alpha_{c1})\delta x$$

Integration → absolute Energie im Strang 1 an Ort x

$$E_1(x) = E_o \exp(-(\alpha_{s1} + \alpha_{c1})x) \quad (\text{konstante Koeffizienten } \alpha_{s1}, \alpha_{c1})$$

lokale Einkopplung in den Strang 2 am Ort x
(bzw. Rückstreuung im Strang 1)

$$\delta E_2(x) = \alpha_{c1} \delta x E_1(x) = \alpha_{c1} \delta x E_o \exp(-(\alpha_{s1} + \alpha_{c1})x)$$

lokale Abschwächung des Rückkehrsignals am Ort x im Teilstrang 2
mit der Länge δx

$$\delta E_2(x) = \alpha_{c1} \delta x E_o \exp(-(\alpha_{s1} + \alpha_{c1})x) \exp(-(\alpha_{s2} + \alpha_{c2})x)$$

α_{s2} – Absorption im Strang 2
 α_{c2} – Überkopplung in den Strang 1

Ankunft des rückgestreuten Signalanteils vom Ort x am Detektor nach
der Zeit

$$t = x \left(\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2} \right) = x \frac{2}{v_{eff}} \quad \text{mit} \quad v_{eff} = \frac{2v_1v_2}{v_1 + v_2}$$

$$\Rightarrow \quad \delta E_2(t) = \frac{\alpha_{c1} E_o}{2} \delta t v_{eff} \exp(-\alpha_{eff} t v_{eff})$$

$$\text{mit} \quad \alpha_{eff} = \frac{1}{2} (\alpha_{s1} + \alpha_{c1} + \alpha_{s2} + \alpha_{c2})$$

Leistung am Detektor zum Zeitpunkt t (nach dem Start des
Kurzzeitimpulses)

$$\frac{\delta E_2(t)}{\delta t} = p_o(t) = \frac{v_{eff} \alpha_{c1}}{2} E_o \exp(-\alpha_{eff} t v_{eff})$$

Die vorliegende Ableitung beruht auf einer Idealisierung, welche einen Kurzzeitimpuls der Dauer $\Delta T \rightarrow 0$ annimmt. Den Realitäten entsprechend wird die Leistung $p_o(t)$ über ein Zeitintervall τ gemittelt, welches der Ansprechzeit des Detektors entspricht. Die Impulsdauer muss deutlich kleiner sein als diese Ansprechzeit. Nur in diesem Fall ist das rückgestreute Signal weitgehend unabhängig von der Impulsform.

Bei einer geforderten räumlichen Auflösung von etwa $\Delta x = 0.1 \text{ m}$ und einer effektiven Signalgeschwindigkeit $v_{\text{eff}} = 2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ergeben sich folgende maximale Impulsdauern:

$$\Delta x = \frac{v_{\text{eff}} \tau}{2} \Rightarrow \tau \approx 1 \text{ ns} \quad \text{d. h.} \quad \Delta T \leq 500 \text{ ps}$$

Eine **Störgröße** $M(x)$ (z. B. Temperaturfeld, mechanische Spannungen, ...) modifiziert die abgeleiteten Formeln im Vergleich zum Normzustand, da die lokalen Absorptionskoeffizienten α_{eff} i. Allg. durch die äußeren Felder verändert werden.

Nimmt man eine einfache, lineare Beziehung an:

$$\alpha_M(x) = \alpha_{\text{eff}} + CM(x) \quad ,$$

wie sie bei einer Entwicklung einer konkreten, funktionalen Abhängigkeit in eine Taylorreihe auftritt, so ergibt sich der gegenüber dem Normzustand zusätzliche, durch $M(x)$ hervorgerufene relative Energieverlust am Ort x entlang eines Teilstrangs δx gemäß:

$$\frac{\delta E_M}{E_M} = -\delta x CM(x) = \delta \mu \quad ,$$

vorausgesetzt die Störgröße überschreitet keine Werte, die eine einfache Linearisierung des Problems verhindern.

Der zusätzliche, relative energetische Verlust infolge des Störfeldes M im gesamten Strang bis zur Koordinate x folgt aus einer Integration der vorliegenden Relation:

$$\exp(\mu(x)) = \exp\left(-2C \int_0^x M(x') dx'\right)$$

bzw. im Zeitraster

$$\exp(\mu(t)) = \exp\left(-2C \int_0^{tv_{\text{eff}}/2} M(x') dx'\right)$$

Dabei wird angenommen, dass die Beeinflussungen der Signalanteile durch das Störfeld $M(x)$ in beiden Ausbreitungsrichtungen gleich sind (reziproker Prozess).

Die rückgestreute Energie vom Teilstrang δx unter Berücksichtigung des Störfelds M nach Durchlaufen des Strangs (inklusive Rückweg) bis zur Koordinate x entspricht folgender Größe:

$$\delta E_{2M}(x) = \alpha_{c1} \delta x \exp(-\alpha_{\text{eff}} v_{\text{eff}} t) \exp(\mu(t))$$

Die Leistung am Detektor zum Zeitpunkt t (nach dem Start des Kurzzeitimpulses) hat damit den Wert:

$$p(t) = p_o(t) \exp(\mu(t))$$

Die lokale Störgröße (Messwert) ergibt sich aus dem Detektorsignal gemäß:

$$M(x) = -\frac{1}{Cv_{eff}} \frac{d}{dt} \ln \left(\frac{p(t)}{p_o(t)} \right) \Big|_{t' = \frac{2x}{v_{eff}}}$$

Beispiel:

linear wachsendes Temperaturfeld entlang einer Faserstrecke der Länge L

$$M(x) = \frac{x}{L} \Delta T \quad \Rightarrow \quad \mu(x) = -C \frac{x^2}{L} \Delta T$$

bzw. im Zeitraster

$$\mu(t) = -C \frac{t^2 v_{eff}^2}{4L} \Delta T$$

normiertes Detektorsignal zum Zeitpunkt t

$$\frac{p(t)}{p_o(t)} = \exp \left(-C \frac{t^2 v_{eff}^2}{4L} \Delta T \right)$$

