



Prozessmesstechnik und Sensorik

Vorlesung:
Faseroptische Sensoren

Prüfungsfragen

- Beschreiben Sie die Grundprinzipien der Lichtübertragung in Lichtwellenleitern!
- Welche Sensorprinzipien können mit faseroptischen Sensoren realisiert werden?
- Beschreiben Sie einen faseroptischen Sensor mit Messfunktion an der Sondenspitze!
- Beschreiben Sie das Prinzip des faseroptischen Bragg-Gitter-Sensors!



Inhalt

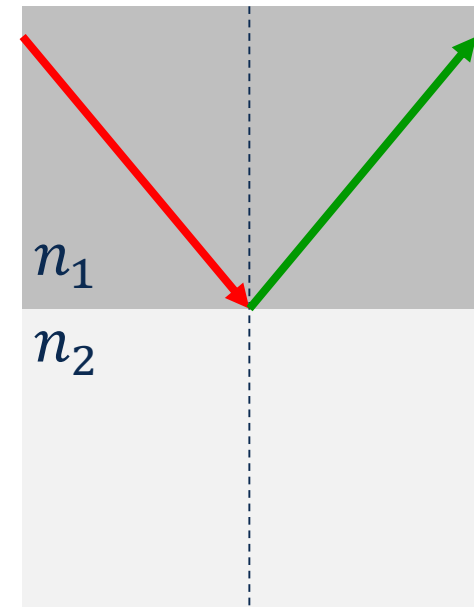
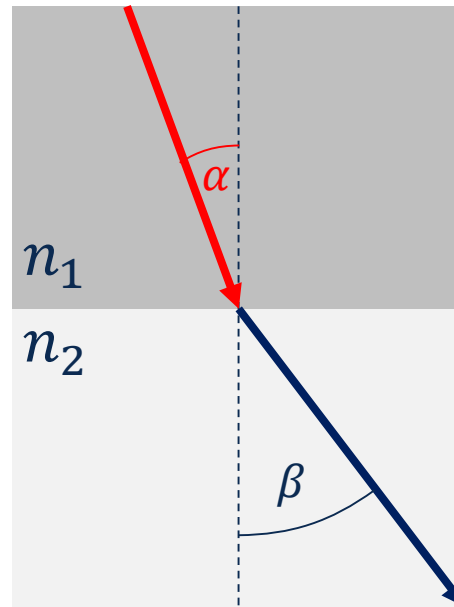
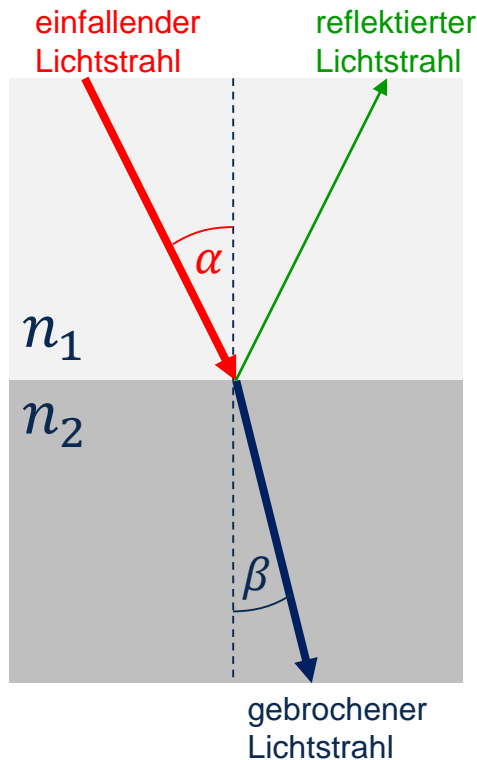
- Grundprinzipien der Lichtübertragung in Lichtwellenleitern
- Grundprinzipien faseroptischer Sensoren
- Sensoren mit Messfunktion außerhalb des Lichtwellenleiters
- Sensoren mit Messfunktion innerhalb des Lichtwellenleiters



Grundprinzipien der Lichtübertragung in Lichtwellenleitern



Transmission, Reflexion und Brechung von Lichtstrahlen

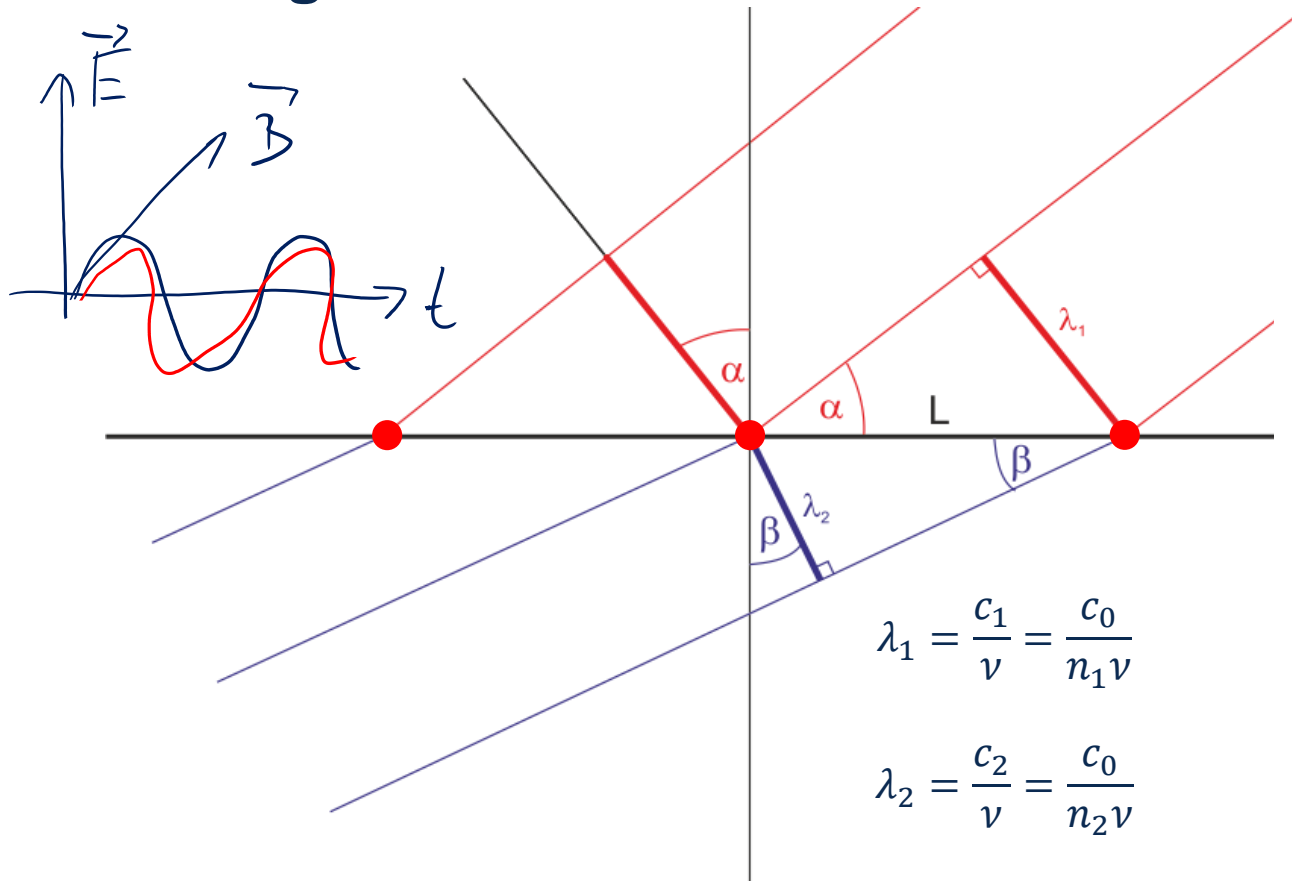


Snelliussches Brechungsgesetz:
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

Totalreflexion wenn $\sin \alpha > \frac{n_2}{n_1}$



Transmission, Reflexion und Brechung ebener elektromagnetischer Wellen



Die Wellenlänge (Abstand der Wellentäler bzw. Wellenberge) verkürzt sich bei niedrigerer Gruppengeschwindigkeit c .

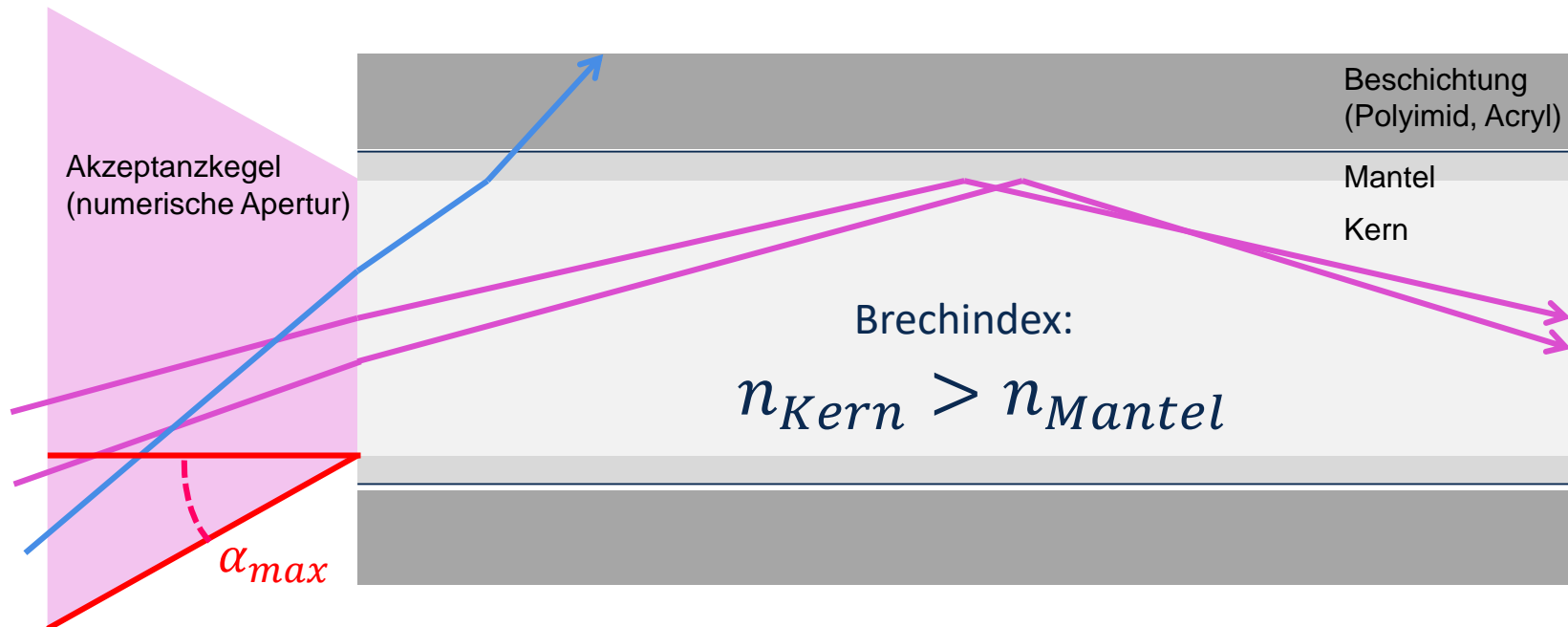
An der Grenzfläche müssen Amplituden und Phasen beider Wellen (also auch Wellenberge und Wellentäler) übereinstimmen (rote Punkte). Daher muss sich die Ausbreitungsrichtung der Wellen ändern: $\alpha \rightarrow \beta$.

$$\lambda_1 = \frac{c_1}{\nu} = \frac{c_0}{n_1 \nu}$$

$$\lambda_2 = \frac{c_2}{\nu} = \frac{c_0}{n_2 \nu}$$



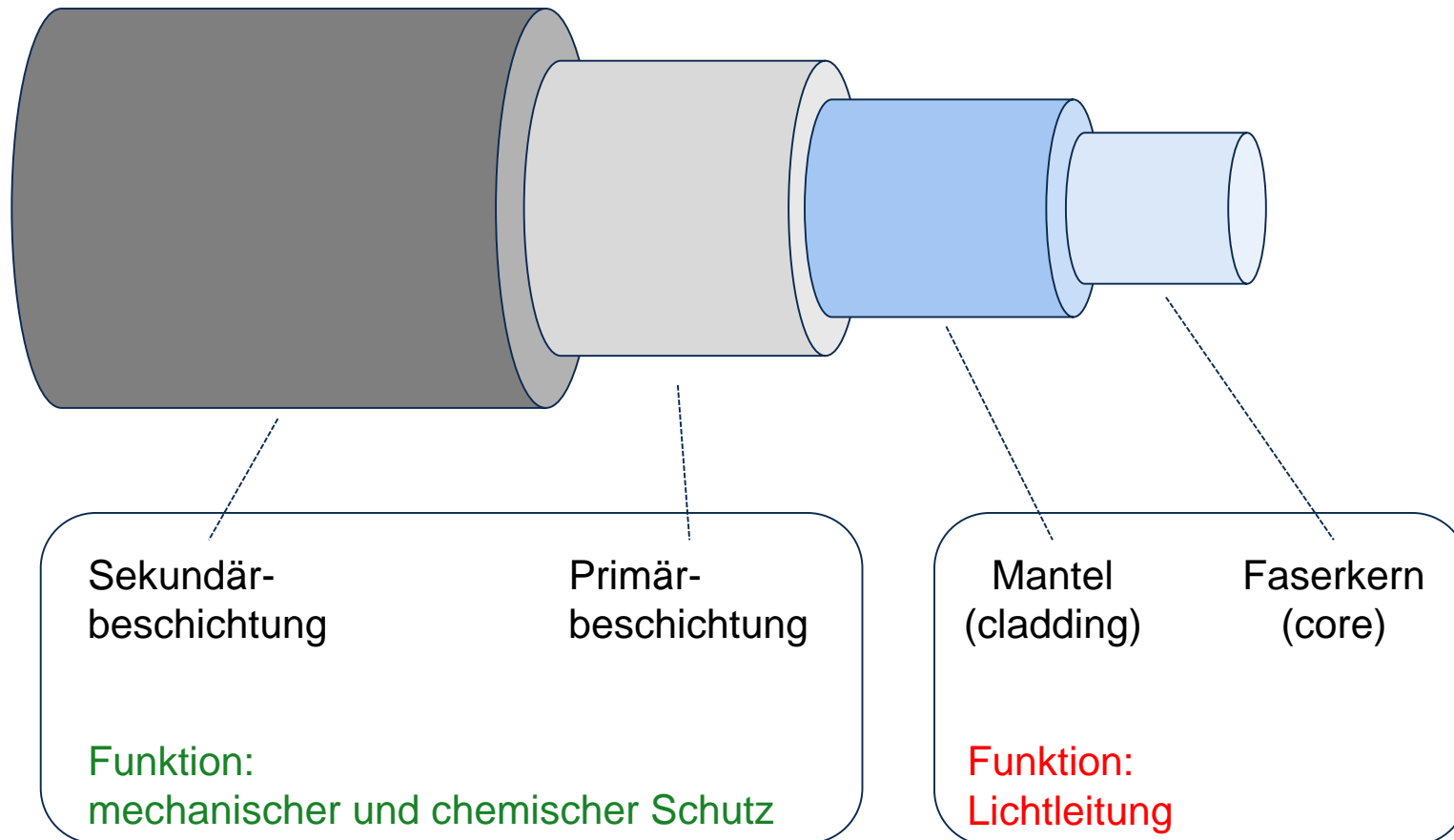
Funktionsprinzip eines Lichtwellenleiters



Numerische Apertur: $NA = n \sin \alpha_{max} = \sqrt{n_{Kern}^2 - n_{Mantel}^2}$



Aufbau eines Lichtwellenleiters



Arten von Lichtwellenleitern

Glasfaser:

- Überwiegender Einsatz in Telekommunikation und Sensorik
Variante 1: Mantel aus reinem SiO_2 , Kern mit Ge (GeO_2) oder P (P_2O_5) dotiert
Variante 2: Kern aus reinem SiO_2 , Mantel mit Bor oder Fluor dotiert
- Kerndurchmesser 3,5...1000 μm (Monomode und Multimode)
- Bis ca. 250°C einsetzbar
- Dämpfung typisch 0,5 dB/km @ 1000 nm (Langstreckenübertragung)

Kunststofffaser (polymer optical fiber, POF)

- Preiswerter; daher oft als Alternative zur Glasfaser in Telekommunikation für Kurzstreckenübertragung und Sensorik eingesetzt
- Kern aus reinem PMMA, Mantel aus fluoriertem PMMA
- Üblich sind große Kerndurchmesser 200...2000 μm (Multimode)
- Bis ca. 60°C einsetzbar
- Dämpfung typisch 0,1 dB/m @ 600 nm (Kurzstreckenübertragung)



Arten von Lichtwellenleitern, ctd.

Infrarot-Lichtwellenleiter:

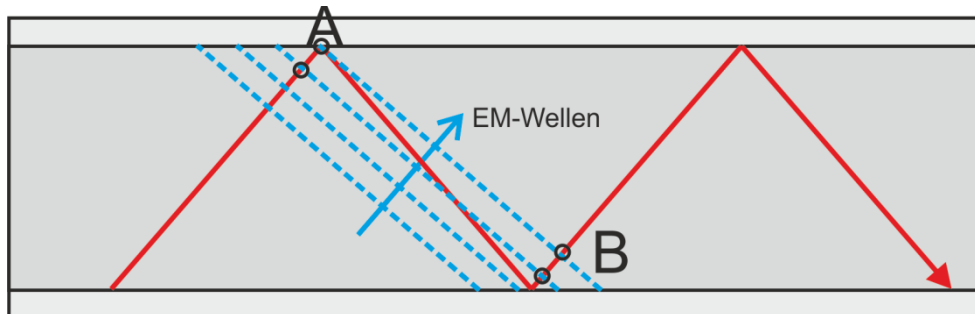
- für Übertragung von Infrarotlicht bis 16 μm Wellenlänge
(z.B. für Infrarot-Laserlichtübertragung, FTIR-Spektrometersonden)
- Material: Silberhalogenid- (AgCl , AgBr) oder Chalcogenid-Gläser
- Kerndurchmesser ab ca. 70 μm
- Einsatz zwischen ca. -60°C ... $+110^\circ\text{C}$
- Dämpfung typisch 0,5 dB/m

Saphir-Lichtwellenleiter

- Einsatz hauptsächlich für Hochtemperatur-Sensorik
- Kerndurchmesser 150...500 μm
- Bis ca. 2000°C (!) einsetzbar
- Dämpfung $<0,5$ dB/m (VIS/NIR); 0,1 dB/m @ 2700 nm (IR)
- teuer, schwer zu konfektionieren, kommerziell nur kurze Faser (bis ca. 3m)



Wellenausbreitung in Lichtwellenleitern

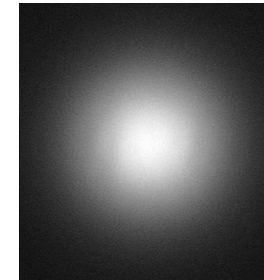
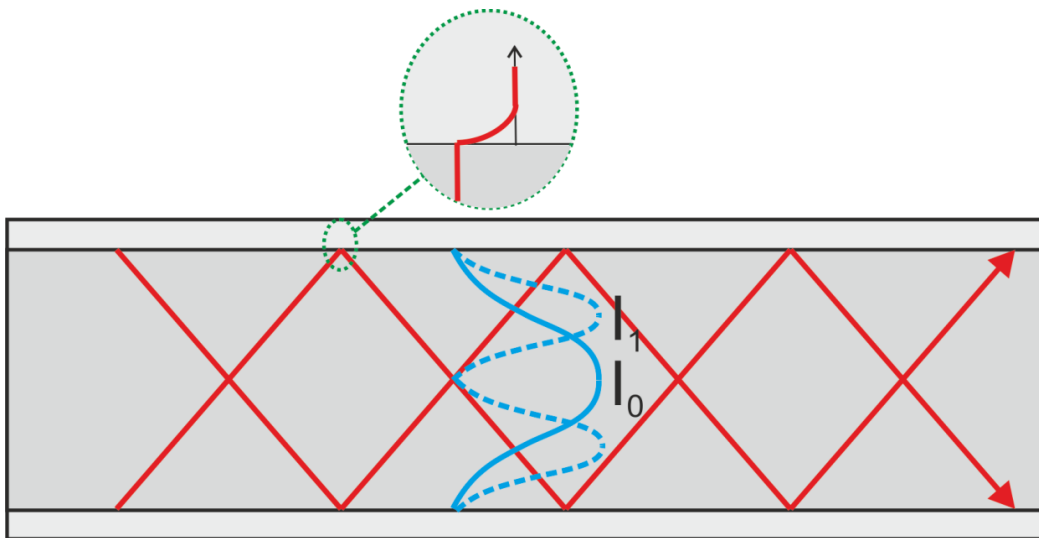


Eine elektromagnetische Welle, die sich entlang des roten Richtungsvektors zickzackförmig im Lichtwellenleiter ausbreitet, muss an den Punkten A und B in Phase liegen. Dadurch sind nur bestimmte Wellenmoden (Wellenlängen bzw. Frequenzen) für diese Konfiguration (Ausbreitungsrichtung, Kerndurchmesser) möglich. Insgesamt ergibt sich für jede Lichtwellenlänge und jeden Faserkerndurchmesser eine bestimmte Modenanzahl.

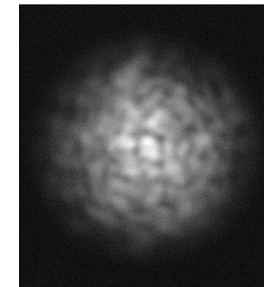
- Licht ist eine elektromagnetische Welle mit einem elektrischen und einem magnetischen Feldanteil.
- In einem Wellenleiter sind durch die optisch-geometrischen Randbedingungen nur bestimmte Wellenmoden übertragbar (siehe Abbildung).
- Je größer der Kerndurchmesser des Lichtwellenleiters, desto mehr Moden können übertragen werden.
- Die Wellenausbreitung in einem Lichtwellenleiter lässt sich über die Maxwell'schen Gleichungen berechnen. Für zylindrische Wellenleiter sind die Lösungen Bessel-Funktionen.



Wellenausbreitung in Lichtwellenleitern



Intensitätsprofil
Monomodefaser



Intensitätsprofil
Multimodefaser

- Die Intensitätsverteilung des Lichtes im Lichtwellenleiter ist durch Interferenzen der zulässigen Moden bestimmt.
- Für den niedrigsten Mode ergibt sich ein gaußförmiges Profil (Monomode-Faser).
- Für höhere Moden ergeben sich Interferenzmuster mit mehreren Maxima.
- An der Grenze zum Mantel kann das elektromagnetische Feld in Form evaneszenter Wellen eine kurze Distanz in den Mantel eindringen (ca. 5 Wellenlängen).



Dispersion

Einzelne Moden des Wellenfeldes werden mit unterschiedlicher Geschwindigkeit im Lichtwellenleiter übertragen. Dies hat verschiedene Ursachen

- **Modendispersion:** Verschiedene Moden haben verschiedene Winkel zur Faserachse und damit verschieden lange Laufwege
- **Chromatische Dispersion:** Der Brechindex und damit die Lichtgeschwindigkeit im Fasermedium sind frequenzabhängig. Licht verschiedener Wellenlängen (zum Beispiel in einem Kurzpuls mit gegebener spektraler Breite) läuft damit unterschiedlich lang durch die Faser.



Dispersion

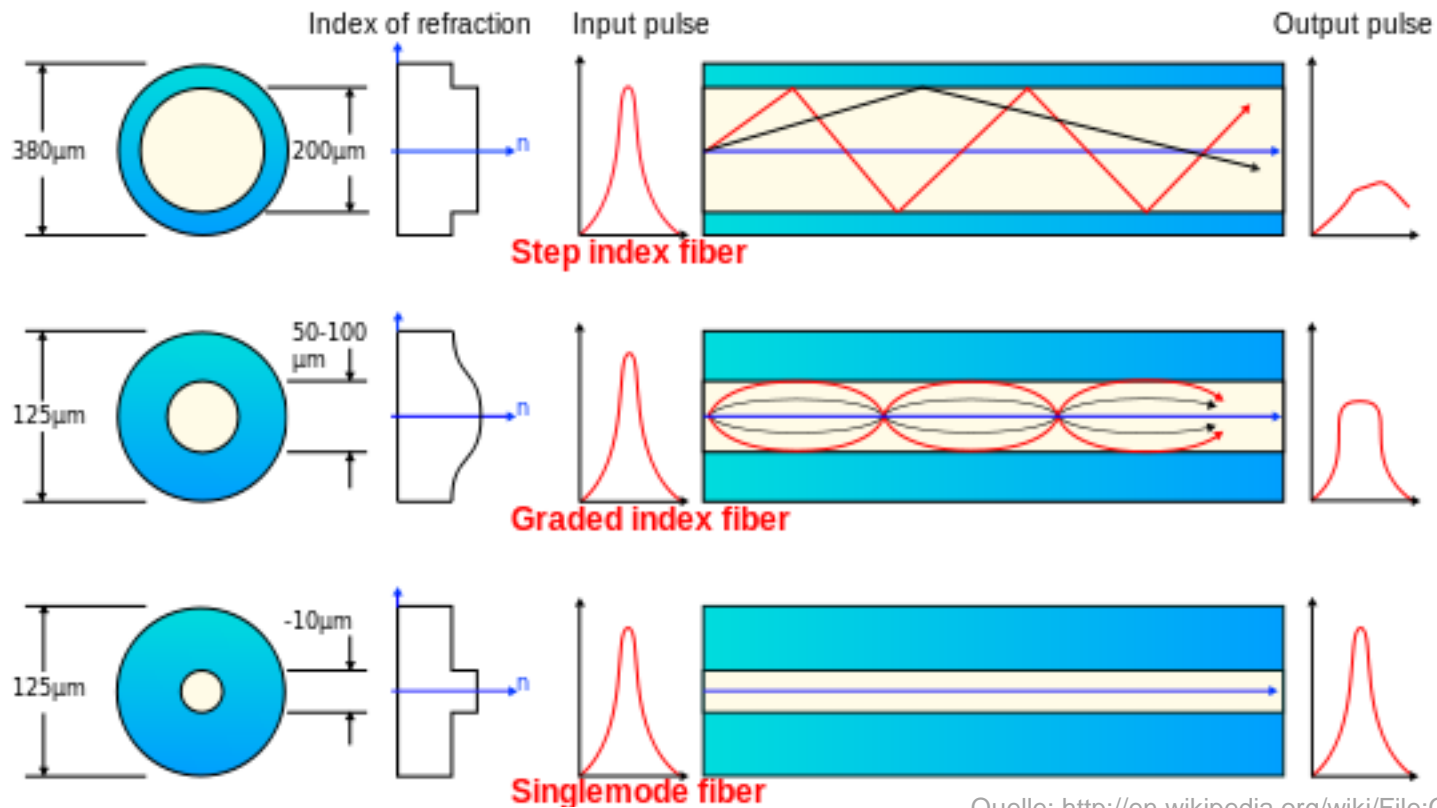
Lösungsansätze:

- **Monomode-Faser:** Hier wird nur eine Mode übertragen und die Modendispersion entfällt
Nachteile: schlechte Einkopplungseffizienz, Laserleistungsbegrenzung
- **Gradientenindex-Faser:** hier wird die Modendispersion gemindert, da durch die kontinuierliche Brechindexstruktur Moden mit kürzerem Laufweg durch optisch dichteres Material gesendet werden. Das Produkt aus Geschwindigkeit und Laufweg bleibt konstant.
- **Kurzpuls laser:** Der Einfluss chromatischer Dispersion kann durch Verwendung von monochromatischem Licht (Laser) gemindert werden.

Die Minderung von Dispersionseffekten ist vor allem für schnelle Datenkommunikation wichtig und hat in den zurückliegenden Jahrzehnten eine Reihe innovativer Entwicklungen sowohl bei Lichtwellenleitern als auch bei Lichtquellen und Detektoren befördert.



Lichtwellenleiterarten



Quelle: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Optical_fiber_types.svg



Lichtübertragungsverluste

Intensitätsverluste gibt es durch folgende Mechanismen:

Intrinsische Verluste:

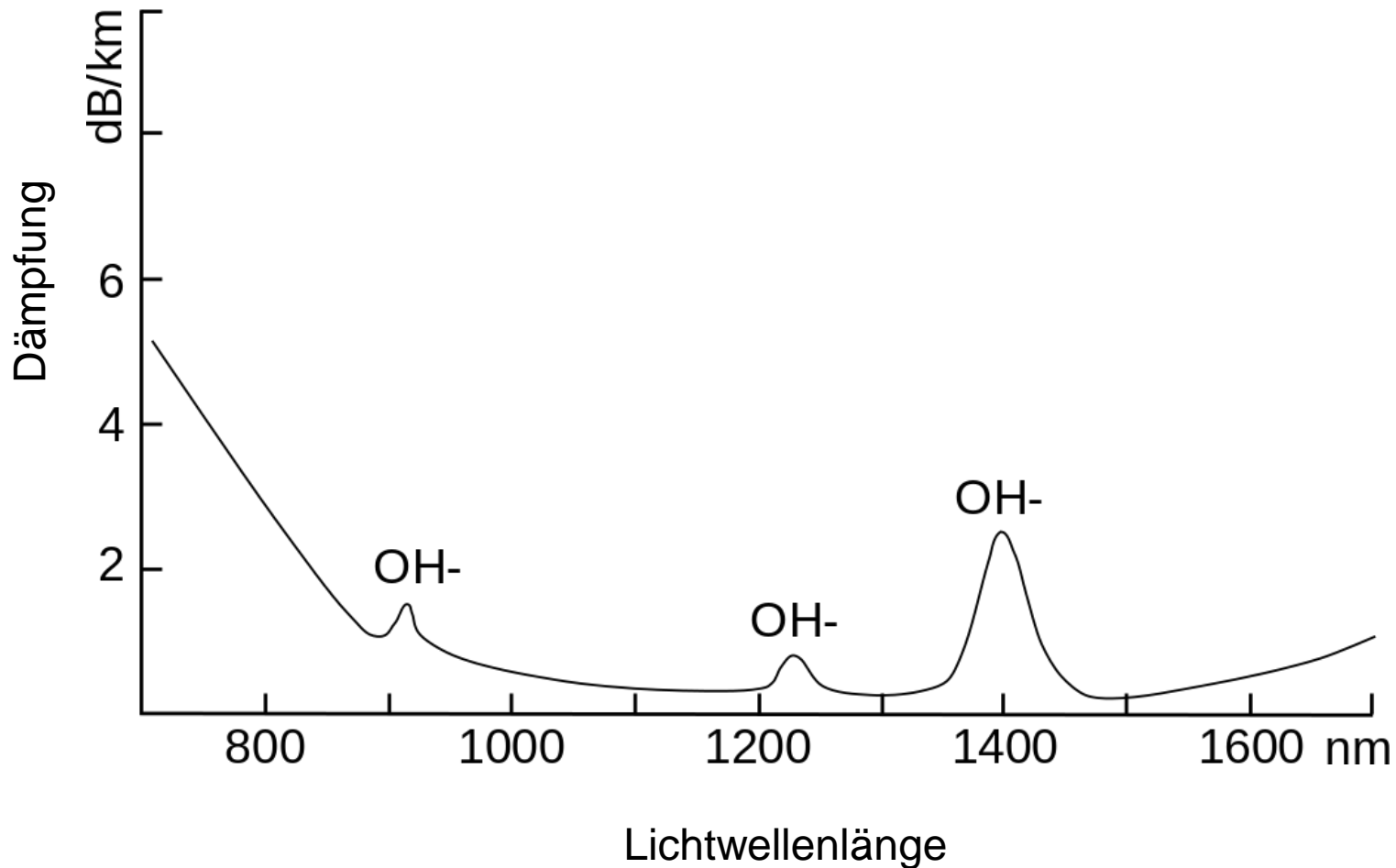
- Lichtabsorption an OH⁻ Ionen (Absorptionsbanden bei 2,7 µm, 1,38 µm, 1,24 µm, 950 nm und 720 nm)
- Metallionen aus der Glasherstellung (Cr³⁺, Fe²⁺ und Cu²⁺)
- zum UV-Bereich hin steigt die Absorption in Quarzglas
- Lichtstreuung (Rayleigh-Streuung, Mie-Streuung) in Bereichen variierenden Brechindexen

Äußere Verluste:

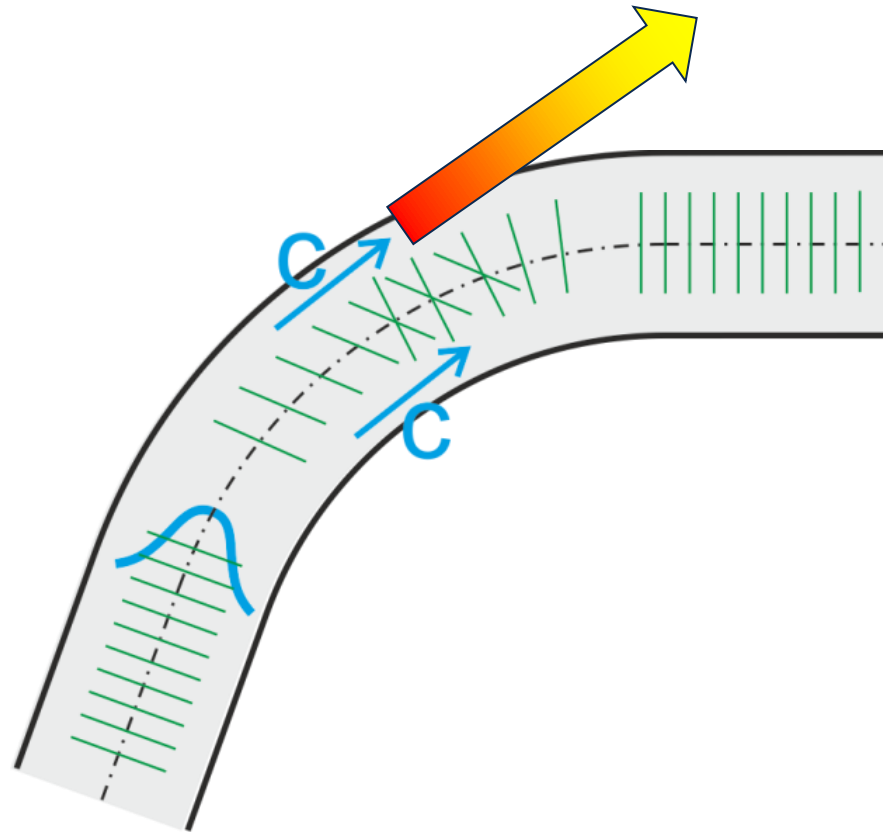
- durch Faserbiegung
- an Koppelstellen



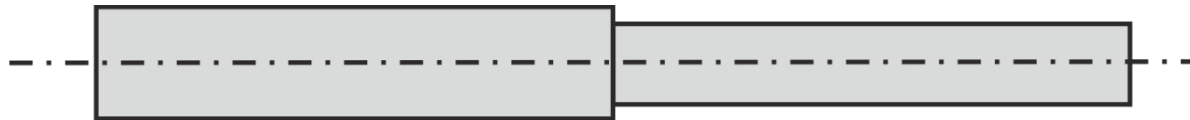
Lichtübertragungsverluste



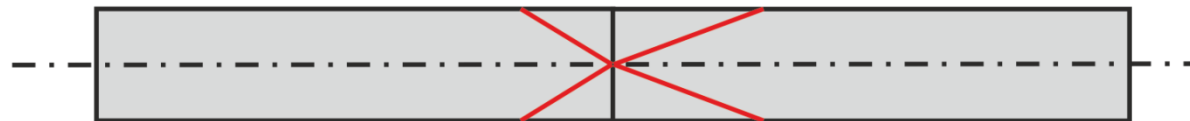
Lichtübertragungsverluste



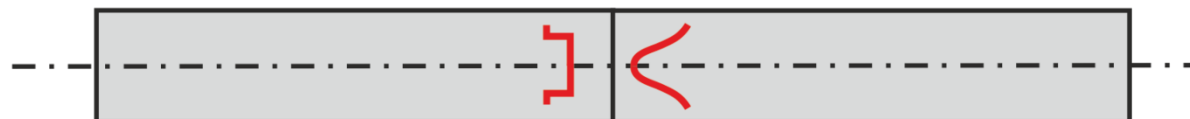
Lichtübertragungsverluste an Koppelstellen



Verschiedene
Kerndurchmesser



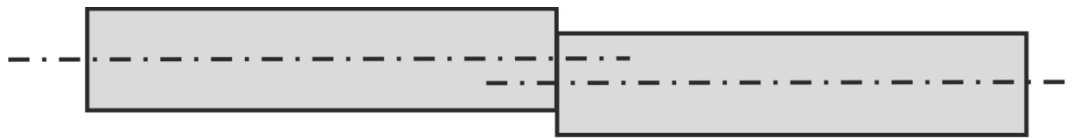
Verschiedene
numerische Aperturen



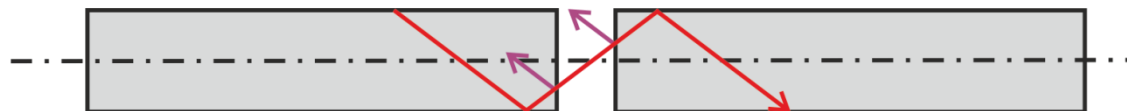
Verschiedene
Brechindexprofile



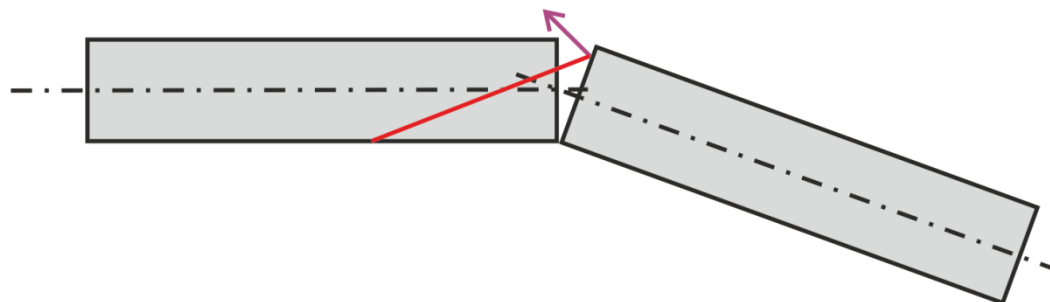
Lichtübertragungsverluste an Koppelstellen



Axialer Versatz



Koppelspalt



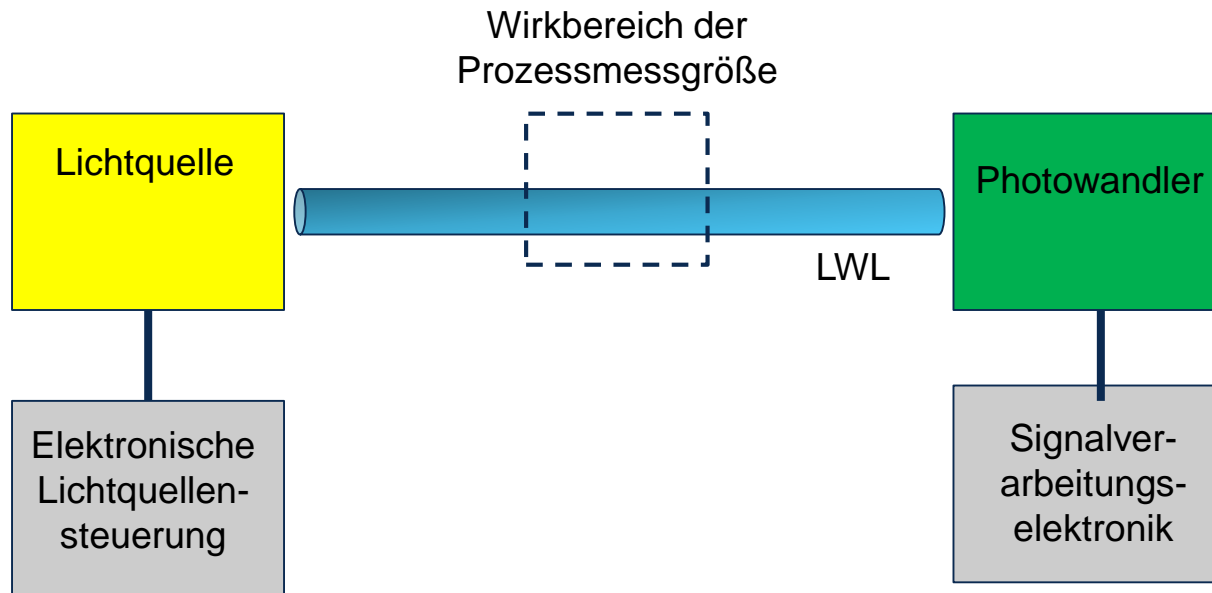
Verkipfung



Faseroptische Sensoren Grundprinzipien



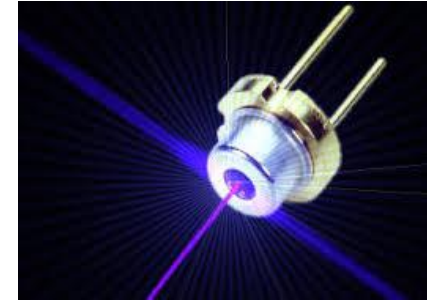
Faseroptisches Messsystem – Prinzipieller Aufbau



Komponenten faseroptischer Sensoren und Messsysteme

Lichtquellen:

- Halogen-Glühlampen (u.a. für Spektrometer)
- LED
- Superlumineszenzdioden
- Laser (Laserdioden, Festkörperlaser, Gaslaser)



Lichtwandler:

- Si-Photodioden (pn, pin, APD)
- Photoelektronenvervielfacher (PMT)
- Diodenarrays, CCD-Zeilen



Lichtwellenleiter:

- Monomode, Multimode (Gradienten und Stufenindex)
- Glas, Quarz, Kunststoff
- Spezial-LWL, zum Beispiel Chalkogenid und Halogenid-Fasern für IR-Licht



Fein- und mikromechanische Komponenten:

- Faserkoppler, Mikrooptiken, Strahlteiler, etc.



Faseroptische Sensoren können heute fast jede Messgröße erfassen!



Faseroptische Sensoren
für pH und Gelöstgasgehalt
(Sauerstoff, Kohlendioxid)
in Flüssigkeiten
(Quelle: Presens GmbH)



Faseroptische
Temperaturmessung
(Quelle: Optocon GmbH)



Faseroptische
Dehnungsmessung
(Quelle: Polytec GmbH)



Sensorische Grundprinzipien faseroptischer Sensoren

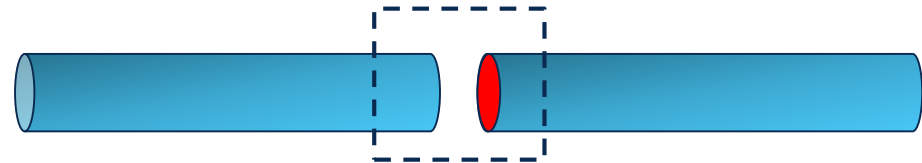
Messfunktion in der Faser

- Intensitätsmodulation durch Dehnung, Biegung
- Bragg-Faser-Gitter
- Rayleigh-Streuung, Raman-Streuung



Messung in Transmission

- Spektroskopie
- Trübungsmessung



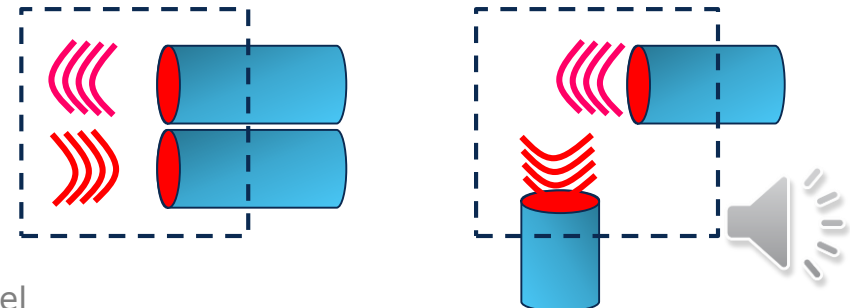
Messfunktion am Faserende

- Phasenindikator
- Chemosensorik
- Plasmonenresonanz
- ...



Messfunktion durch Reflexion oder Rückstreuung im Medium

- Streulichtmessung
- Fluoreszenzmessung
- ...



Vorteile von faseroptischen Sensoren und Lichtwellenleitern in der Sensortechnik

Einsatz in schwierigen Umgebungen

- Chemisch aggressive Umgebungen, z.B. Chemieindustrie
- Starke Felder und Strahlung, z.B. Kerntechnik, Hochspannungstechnik
- hohe Temperaturen, z.B. Kraftwerks- und Verfahrenstechnik, Metallurgie
- schwer zugängliche Bereiche

Störungsarme Signalübertragung

- Potentialtrennung und Isolation, z.B. Medizintechnik, Windkraftanlagen
- gute EMV-Verträglichkeit, z.B. Luftfahrt
- Überbrückung großer Distanzen (Fernüberwachung)

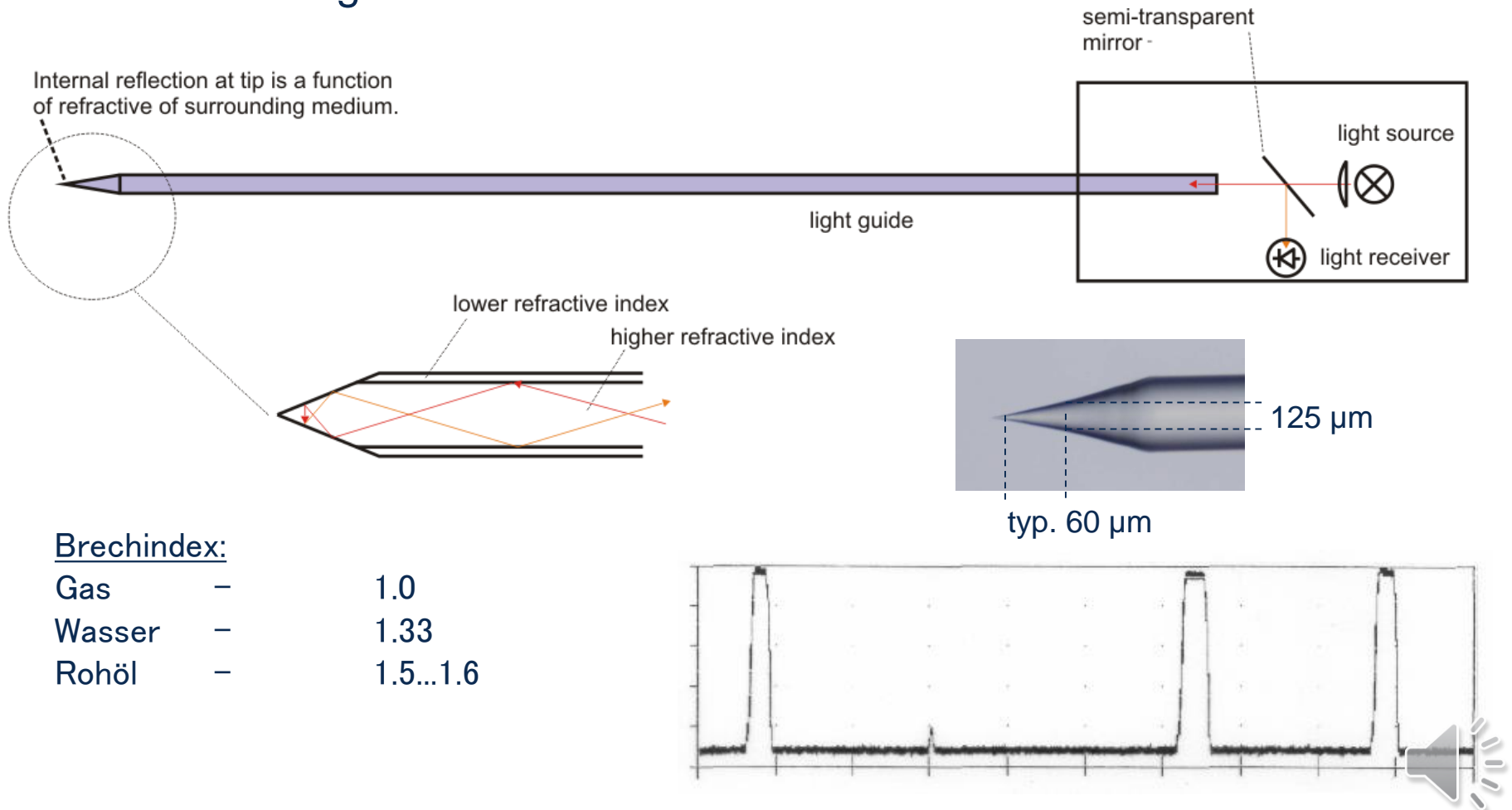
Gute Möglichkeiten zur Sensorintegration und Miniaturisierung



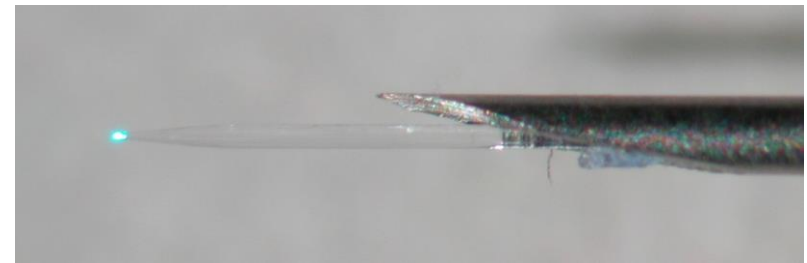
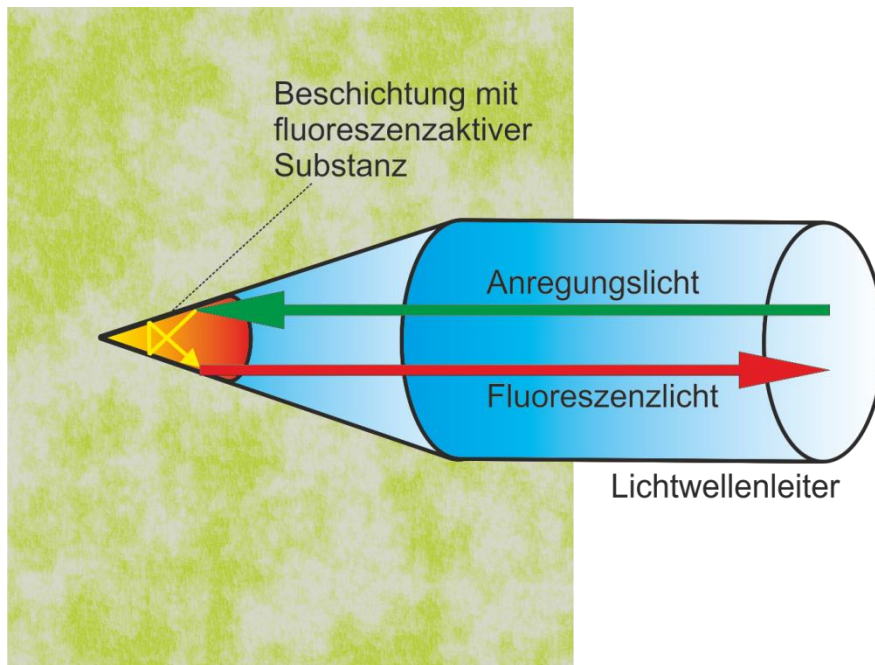
Faseroptische Sensoren mit Messfunktion am Faserende



Faseroptische Nadelsonde Phasenerfassung über Brechindex



Faseroptische Messung von pH und Gelöstgasspezies



Fluoreszenz-Sensor an Faserspitze (140 µm Glasfaser)

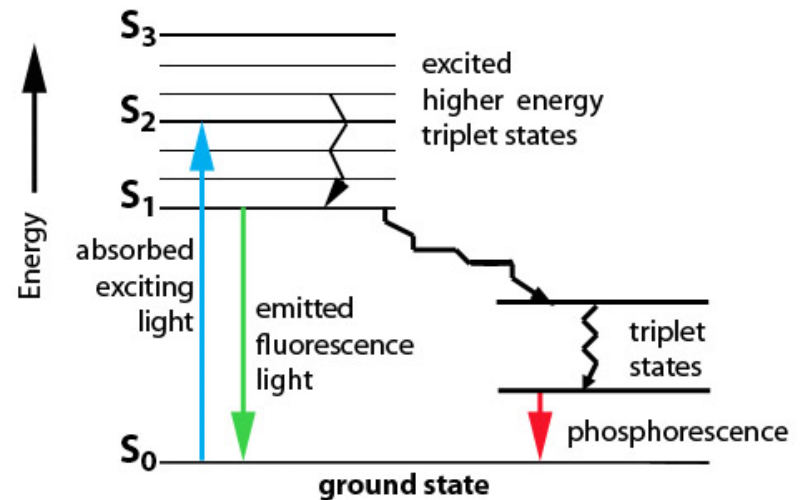
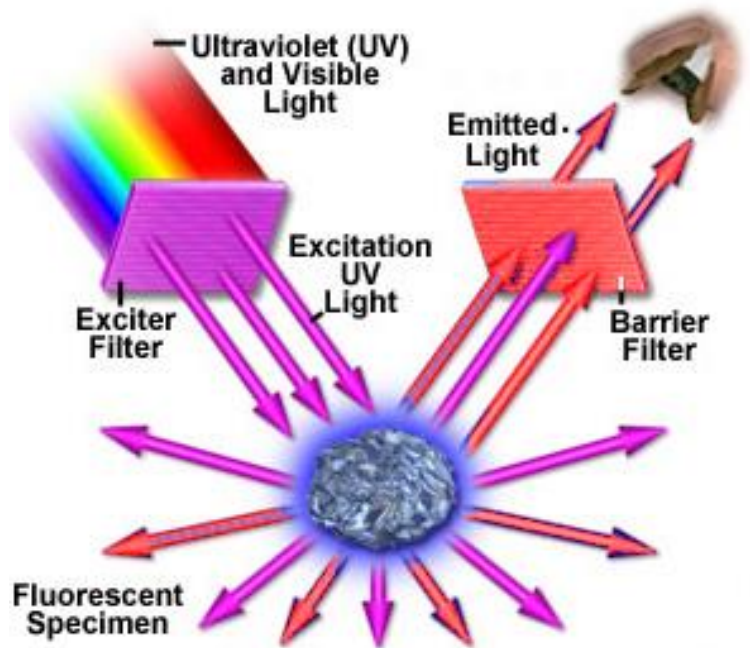


- Beschichtung der Faserspitze mit fluoreszenzaktiver Substanz
- Messung des in die Faser gestreuten Fluoreszenzlichtes
- Selektive Fluoreszenzlöschung (Quenching) durch Energietransfer von Gasmolekülen (O_2 , CO_2) oder
- Nutzung der pH-Sensitivität des Fluoreszenzfarbstoffs

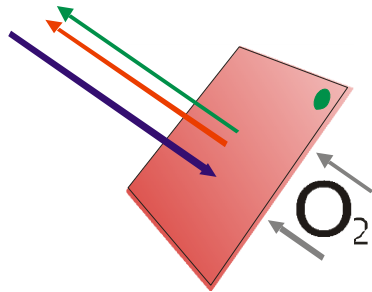


Quelle: PreSens GmbH

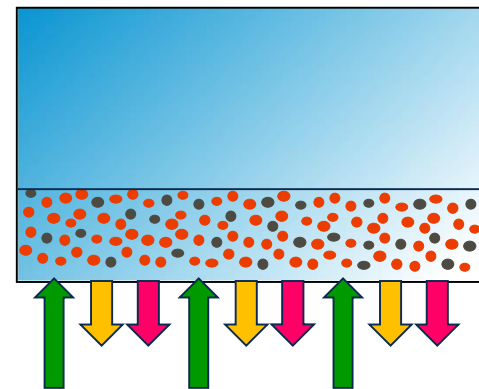
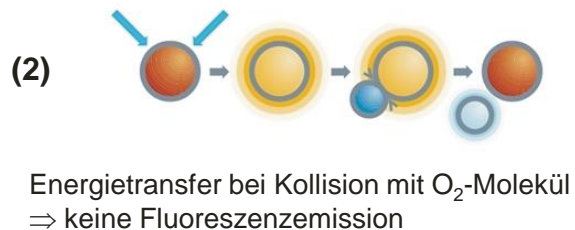
Faseroptische Messung von Ph und Gelöstgasspezies



Selektive Fluoreszenzlöschung



Dynamische Fluoreszenzlöschung



Untersuchungsmedium

sensitive Polymerschicht

↑ Anregungslicht

↑ Fluoreszenzlicht des Sauerstoffindikators

↑ Fluoreszenzlicht des Referenzindikators

● Sauerstoffindikator

● Referenzindikator

Quelle: PreSens GmbH



Faseroptische Messung von pH und Gelöstgasspezies



*Messung von Stoffkonzentrationen in
einem Blasensäulenreaktor*



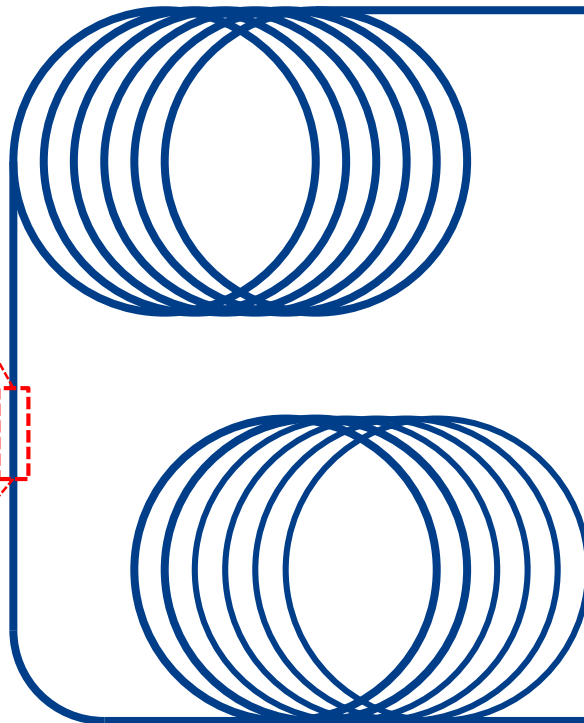
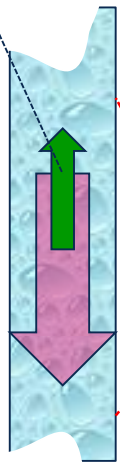
Quelle: PreSens GmbH

Faseroptische Sensoren mit Messfunktion in der Faser

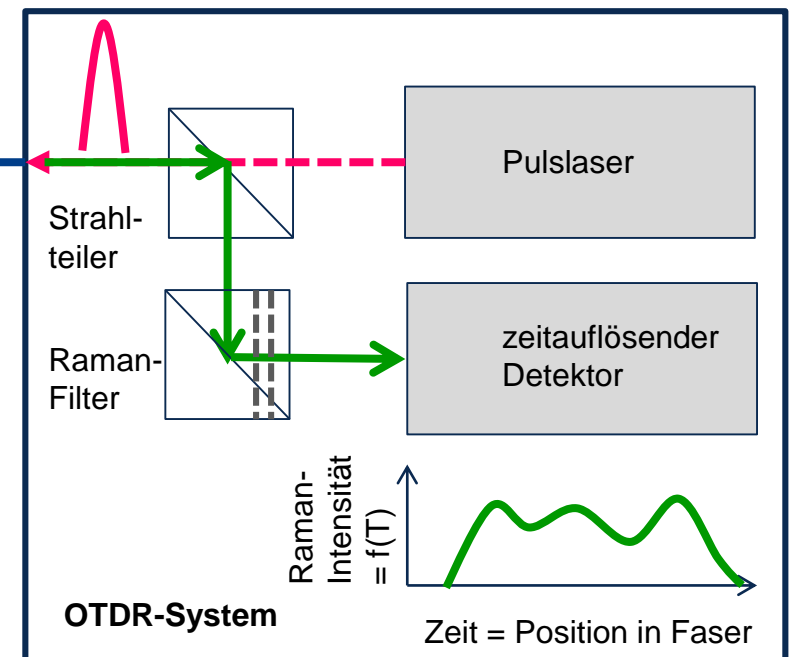


Beispiel: Ortskontinuierliche faseroptische Temperaturmessung mittels OTDR (optical time domain reflectance) und Raman-Streuung

an Raman-aktiven
Molekülen
rückgestreutes
Raman-Licht



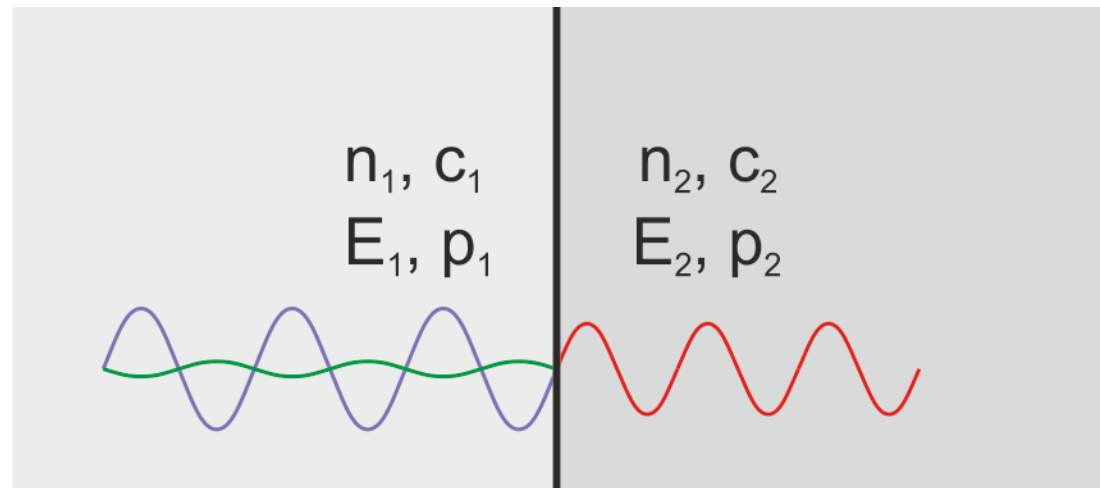
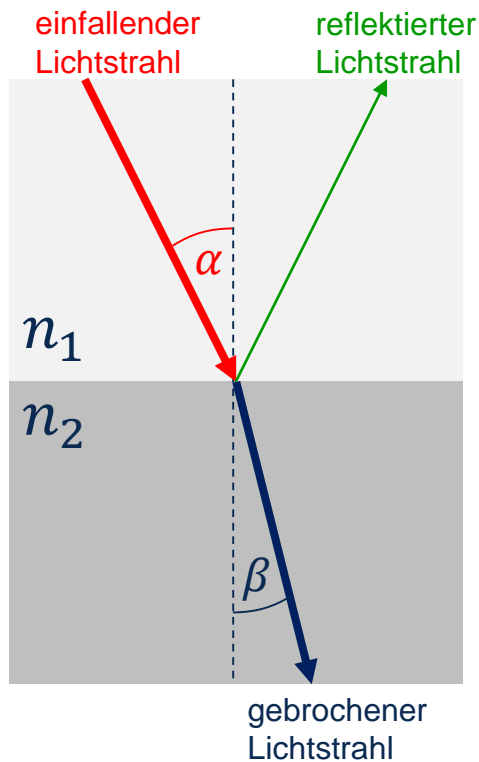
optische Faser



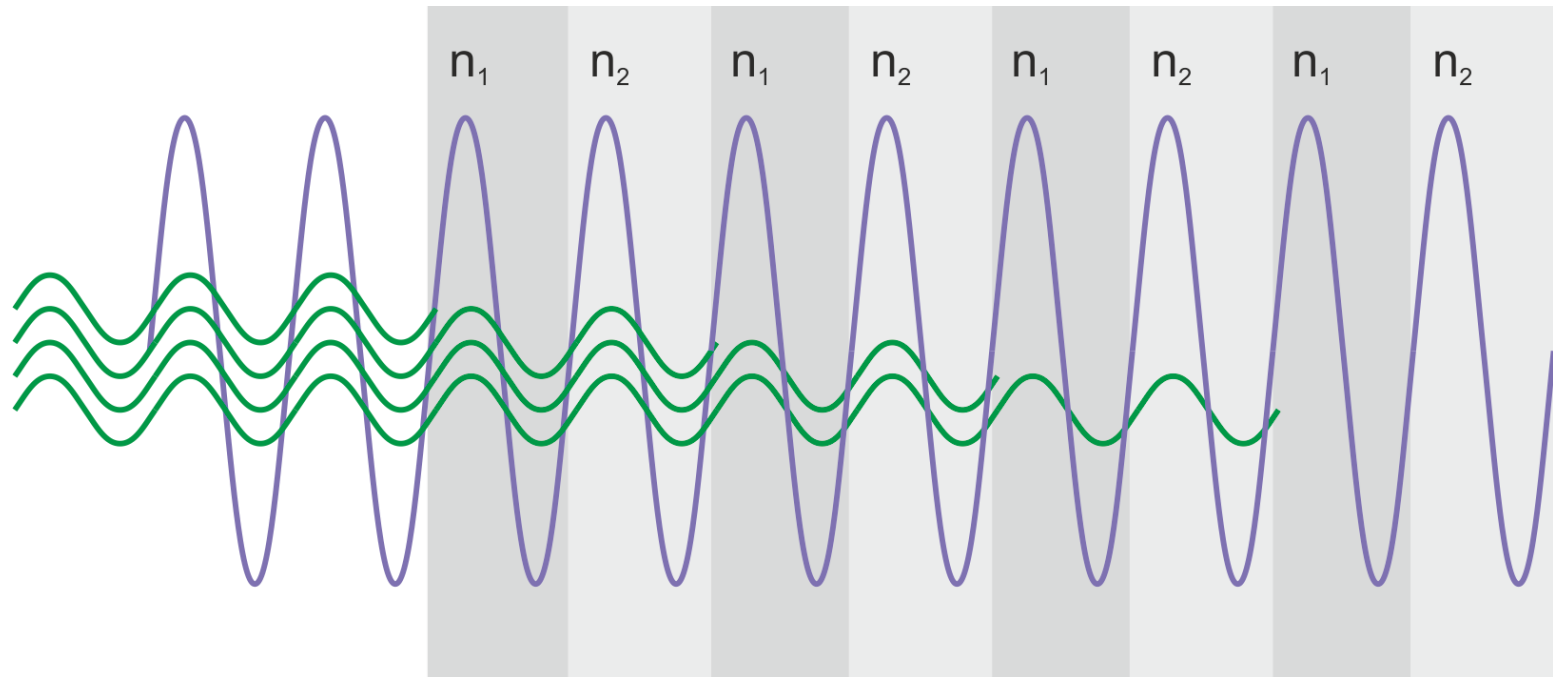
- Das OTDR-System ist ein faseroptisches Radar
- Die Laufzeit der Pulsantwort kodiert den Ort in der Faser
- Die zugeordnete Intensität die Stärke des Raman-Signals
- Das Raman-Signal ist temperaturabhängig



Lichtreflexion an Brechindexübergängen



Bragg-Reflexion an einem optischen Vielschichtsystem



Konstruktive Interferenz der reflektierten elektromagnetischen Wellen bei Erfüllung der Bragg-Bedingung

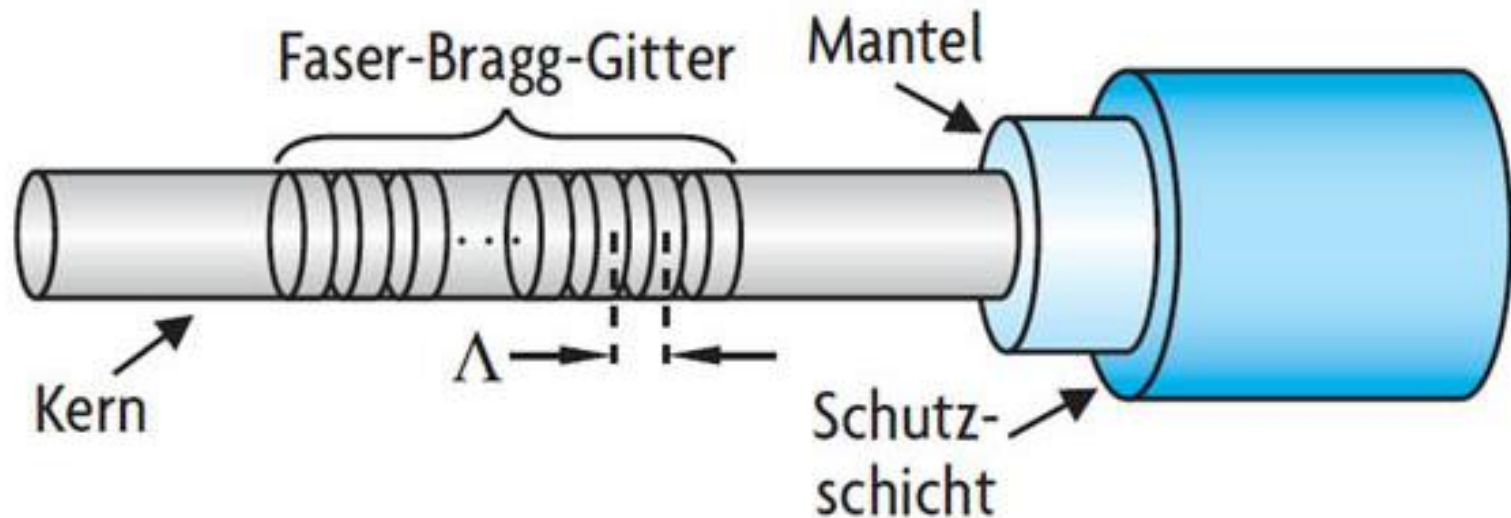
$$\lambda_B = 2n\Lambda$$

⇒ Messbarer Effekt einer schmalbandigen Retroreflexion

λ_B	- Bragg-Wellenlänge
n	- effektiver Brechindex
Λ	- Gitterperiode



Bragg-Gitter

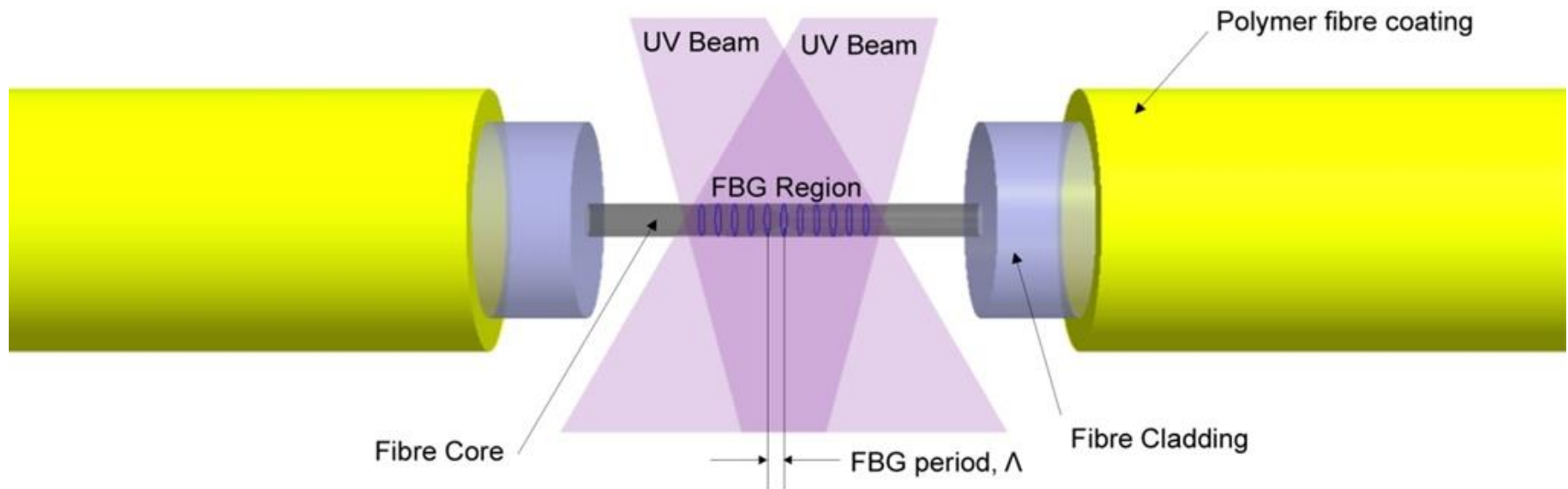


http://www.elektroniknet.de/messen-testen/technik-know-how/messgeraete/article/77016/0/Grundlagen_der_optischen_Sensormessung_mit_Faser-Bragg-Gittern/



Bragg-Gitter

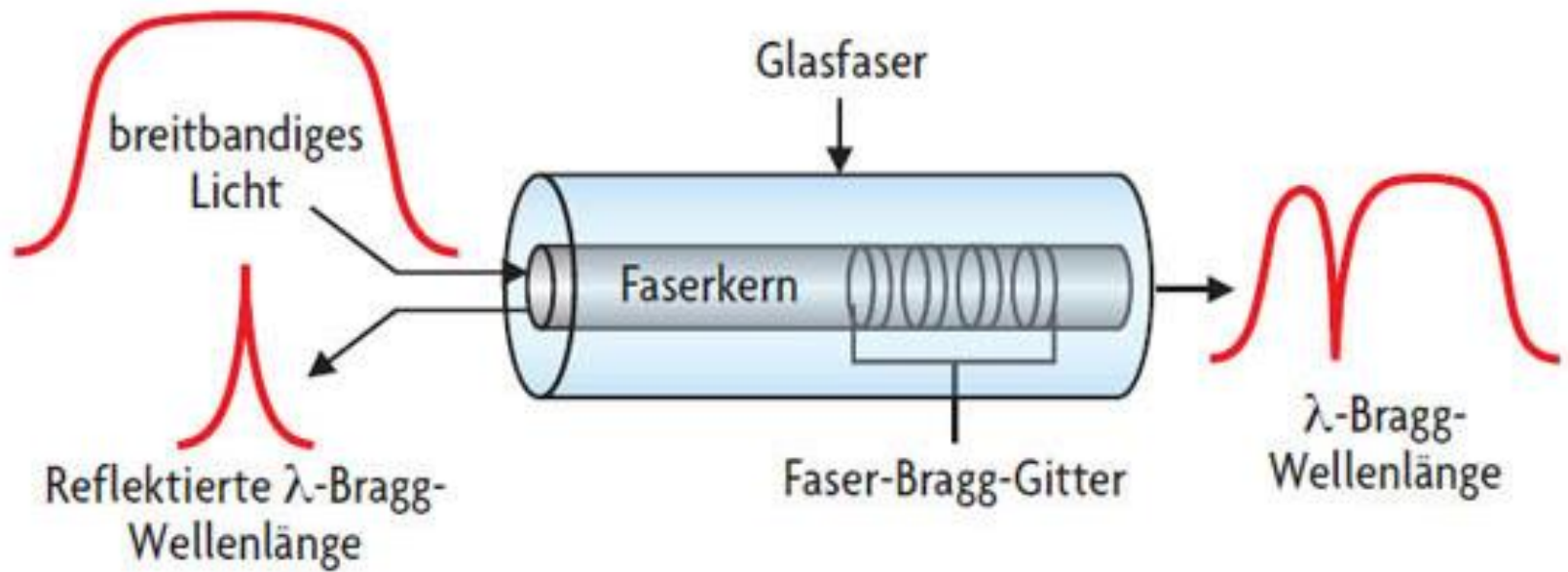
Holographisches „Gitterschreiben“ mittels UV-Laser



<http://www.smartfibres.com/fibre-bragg-grating>



Bragg-Gitter

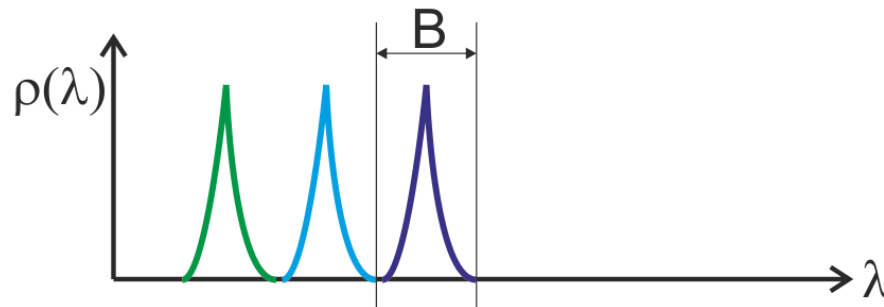
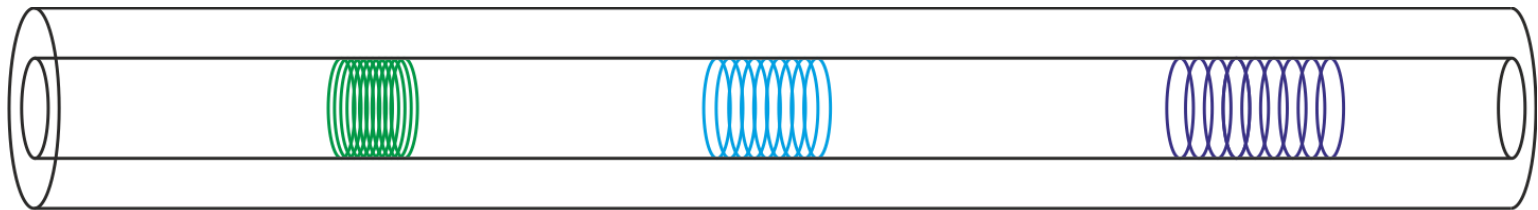


http://www.elektroniknet.de/messen-testen/technik-know-how/messgeraete/article/77016/0/Grundlagen_der_optischen_Sensormessung_mit_Faser-Bragg-Gittern/



Verteilte Temperaturmessung mit Bragg-Gitter-Faser

- „Einschreiben“ vieler Gitter mit leicht verschiedenen Gitterkonstanten in eine Faser
- Lichtreflexion einzelner Gitter spektral auflösbar
- Temperaturabhängige Verschiebung der Zentralwellenlänge innerhalb des Bandabstandes B



Bragg-Gitter – Trennung von Temperatur und Dehnung

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = (1 - p_e)\Delta\varepsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T$$

Relative Wellenlängenänderung

Photoelastischer Koeffizient

Gitterdehnung

Wärmeausdehnungskoeffizient

Thermooptischer Koeffizient

n

Λ

Λ

n

T



Bragg-Gitter – Trennung von Temperatur und Dehnung

Für Temperaturmessung:

- Einlegen der optischen Faser in Metallkanüle (Verhindern von mechanischer Faserdehnung)
- thermische Dehnung bei Glas ist wesentlich kleiner als thermische Brechindexänderung
- Messung über $T=f(\alpha_n)$

