

DIN EN 61757-2-1

ICS 33.180.99

Einsprüche bis 2015-10-07
Ersatz für
E DIN EN 61757-2-1:2013-11

Entwurf

**LWL-Sensoren –
Dehnungsmessung –
Teil 2-1: Faser-Bragg-Gitter
(IEC 86C/1288/CD:2014)**

Fibre optic sensors –
Part 2-1: Strain measurement –
Strain sensors based on fibre Bragg gratings
(IEC 86C/1288/CD:2014)

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2015-08-07 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.entwuerfe.din.de bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an dke@vde.com möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/stellungnahme oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 94 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort.....	6
1 Anwendungsbereich.....	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	8
4 Symbole.....	12
5 Allgemeines	13
5.1 Faser-Bragg-Gitter (FBG).....	13
5.2 FBG-Dehnungssensor.....	16
5.3 Messpunkt und Installation.....	16
5.4 Messlänge	17
5.5 Dehnungsbeanspruchung und Referenzdehnung	17
5.6 Referenzwellenlänge	18
5.7 Stabilitätsverhalten	18
5.7.1 Drift und Kriechen.....	18
5.7.2 Formbeständigkeit der Bragg-Gitter-Spitze.....	18
5.7.3 Hysterese	19
5.8 Prüfling.....	19
5.9 Messwertanzeige.....	19
5.10 Nullpunktbezogene Messung	19
5.11 Nicht nullpunktbezogene Messung	19
5.12 Herstellungscharge.....	20
5.13 FBG-Dehnungssensor-Standardmodell	20
5.14 FBG-Dehnungssensorserie	20
6 Berichtspflichtige Merkmale und Kennwerte	20
6.1 Einzelheiten des Aufbaus und geometrischen Abmessungen	20
6.2 Bauform des FBG-Dehnungssensors	20
6.3 Temperatur- und Feuchtebereich.....	20
6.4 Anforderung an den Anschluss	20
7 Zu messende Merkmale und Kennwerte.....	20
7.1 Probenahme und statistische Bewertung.....	20
7.1.1 Probenahme	20
7.1.2 Zufällige Probenahme	21
7.1.3 Typprüfung	21
7.1.4 Serienprüfung	21
7.1.5 Einzelne Stichprobenprüfung	21
7.1.6 Ausweisen des Messergebnisses	21
7.1.7 Aufbereitung des Prüflings	21
7.1.8 Umgebungsprüfbedingungen	22

	Seite
7.1.9 Für die speziellen Kennwerte geforderte Art der Prüfung.....	22
7.2 Bragg-Wellenlänge λ_B	22
7.2.1 Allgemeines.....	22
7.2.2 Messverfahren	23
7.2.3 Auswertung	23
7.2.4 Berichterstattung	23
7.3 Spektralbreite des FBG.....	23
7.3.1 Messverfahren	23
7.3.2 Auswertung	24
7.3.3 Berichterstattung	24
7.4 FBG-Reflexionsgrad.....	24
7.4.1 Messverfahren	24
7.4.2 Auswertung	24
7.4.3 Berichterstattung	25
7.5 Dehnungsempfindlichkeit.....	25
7.5.1 Allgemeines.....	25
7.5.2 Dehnungseinrichtung	25
7.5.3 Messverfahren der Dehnungsprüfung	26
7.5.4 Auswertung	26
7.5.5 Berichterstattung	27
7.6 Dehnungsfaktor k	27
7.6.1 Allgemeines.....	27
7.6.2 Biegeeinrichtung	27
7.6.3 Messverfahren	29
7.6.4 Auswertung	30
7.6.5 Berichterstattung	30
7.7 Maximaler Dehnungsbereich bei Raumtemperatur	31
7.7.1 Allgemeines.....	31
7.7.2 Prüfaufbau.....	31
7.7.3 Messverfahren	31
7.7.4 Auswertung	31
7.7.5 Berichterstattung	32
7.8 Ermüdungsverhalten	32
7.8.1 Prüfaufbau.....	32
7.8.2 Messverfahren	32
7.8.3 Auswertung	33
7.8.4 Berichterstattung	33
7.9 Krümmungsradius der Mindestbetriebsbereitschaft.....	33
7.9.1 Messverfahren	33

	Seite
7.9.2 Auswertung.....	33
7.9.3 Berichterstattung	33
7.10 Temperatur- und Feuchtigkeitsbereiche.....	34
7.10.1 Allgemeines	34
7.10.2 Messverfahren.....	34
7.10.3 Auswertung.....	35
7.10.4 Berichterstattung	35
7.11 Weitere Umwelteinflüsse	35
7.12 Temperaturbedingte Dehnungsreaktion.....	35
7.12.1 Allgemeines	35
7.12.2 Prüfaufbau	36
7.12.3 Messverfahren.....	36
7.12.4 Auswertung.....	36
7.12.5 Berichterstattung	36
7.13 Abnahmeprüfung und Lebensdauerbetrachtungen.....	37
7.13.1 Messverfahren.....	37
7.13.2 Auswertung.....	38
7.13.3 Berichterstattung	38
8 Empfehlungen für den Einsatz von FBG-Messgeräten.....	38
Anhang A (informativ) Weitere Eigenschaften der FBG-Dehnungssensoren	40
A.1 Allgemeines	40
A.2 Ausführliche Erläuterung zu Seitenkeulen eines FBG für unterschiedliche Einsatzbedingungen	40
Anhang B (informativ) Vordruck für Bauartspezifikation.....	44
B.1 Allgemeines	44
B.2 Mechanischer Aufbau des FBG-Dehnungssensors	44
B.3 Betriebseigenschaften des FBG-Dehnungssensors	44
B.4 Einschränkende Parameter des FBG Dehnungssensors	45
B.5 Temperaturdaten des FBG Dehnungssensors	45
B.6 Weitere Angaben des FBG Dehnungssensors, die auf Anforderung anzugeben sind.....	45
B.7 Wichtige Leistungsdaten der FBG-Messeinrichtung	45
Anhang C (informativ) Auswirkungen der Polarisierung.....	47
C.1 Allgemeines	47
Anhang D (informativ) Eingesetzte FBG-Dehnungssensoren	48
D.1 Allgemeines	48
D.2 Empfohlenes Anbindungsverfahren	48
Literaturhinweise.....	49
Bilder	
Bild 1 – Merkmale des Reflexionsspektrums des Bragg-Gitters	9

	Seite
Bild 2 – Funktionsprinzip eines Faser-Bragg-Gitters im Lichtwellenleiter	14
Bild 3 – Reflexionsspektrum eines FBG-Arrays	15
Bild 4 – Reflexionsspektrum eines FBG [berechnetes (links) und gemessenes Spektrum (rechts)]	23
Bild 5 – Bestimmung des R_{FBG} aus dem FBG-Reflexionsspektrum (links) und dem Übertragungsspektrum (rechts)	25
Bild 6 – Beispiel des Aufbaus einer Dehnungseinrichtung	26
Bild 7 – Prüfaufbau (links) für die Vier-Punkt-Biegeprüfung mit Darstellung der Querkraft- und Biegemomentwirkung (rechts)	28
Bild 8 – Bestimmung der Dehnungsbeanspruchung über Wegmessung	28
Bild 9 – Ganzflächig auf einem gebogenen Biegebalken aufgebrachter Sensor	29
Bild 10 – Prüfling mit angebrachtem FBG-Dehnungssensor	33
Bild A.1 – Seitenkeulen im Fall eines einzelnen FBGs als Sensor	41
Bild A.2 – Grundwellenlängenspitzen und erkannte Seitenkeulenspitzen im Fall in Reihe geschalteter Multiplex-FBGs	41
Bild A.3 – Spektrale Spitzen im Fall in Reihe geschalteter Multiplex-FBGs	42
Bild A.4 – Parameter zur Unterscheidung von Grundwellenlängenspitzen und Seitenkeulen	42
Bild A.5 – Unterscheidung von Grundwellenlängenspitzen und Seitenkeulen	43
 Tabellen	
Tabelle 1 – Für die speziellen Kennwerte geforderte Art der Prüfung	22

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 86C/1288/CD:2014 „Fibre optic sensors – Part 2-1: Strain measurement – Strain sensors based on fibre Bragg gratings“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom SC 86C „Fibre optic systems and active devices“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die IEC und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf prEN nur 2 Monate beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium UK 412.2 „Komponenten für Kommunikationskabelanlagen“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils aktuellste Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe des Dokuments.

Der Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden Deutschen Dokumenten ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO [und/oder] IEC sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

LWL-Sensoren – Dehnungsmessung – Teil 2-1: Faser-Bragg-Gitter

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil der IEC 61757-2 legt detailliert Spezifikationen für faseroptische Sensoren fest, die eine oder mehrere Faser-Bragg-Gitter (FBG) als empfindliches Element für Dehnungsmessungen enthalten. Allgemeine Spezifikationen für LWL-Sensoren sind in IEC 61757-1 festgelegt.

Dieser Teil der IEC 61757-2 führt die wichtigsten Eigenschaften und Merkmale eines faseroptischen Sensors für Dehnungsmessungen auf Basis von Faser-Bragg-Gittern als empfindliches Element auf und legt die Verfahren zu deren Bestimmung fest. Darüber hinaus sind die grundlegenden Leistungsparameter und Kennwerte der entsprechenden Messgeräte zum Auslesen des optischen Signals aus dem FBG enthalten. Diese Norm bezieht sich auf die Messung von statischen und dynamischen Werten für die Dehnungsbeanspruchung in einem Frequenzbereich.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60050, *International Electrotechnical Vocabulary*

IEC 60068-2 (alle Teile), *Environmental testing – Part 2: Tests*

IEC 60793-1-30, *Optical fibres – Part 1-30: Measurement methods and test procedures – Fibre proof test*

IEC 60793-1-31, *Optical fibres – Part 1-31: Measurement methods and test procedures – Tensile strength*

IEC 60793-1-33, *Optical fibres – Part 1-33: Measurement methods and test procedures – Stress corrosion susceptibility*

IEC 60793-2, *Optical fibres – Part 2: Product specifications – General*

IEC 60874-1, *Fibre optic interconnecting devices and passive components – Connectors for optical fibres and cables – Part 1: Generic specification*

IEC 61300-2 series, *Fibre optic interconnecting devices and passive components – Basic test and measurement procedures – Part 2: Tests*

IEC 61757-1, *Fibre optic sensors – Part 1: Generic specification*

IEC 62129-1, *Calibration of wavelength/optical frequency measurement instruments – Part 1: Optical spectrum analysers¹⁾*

IEC 62129-2, *Calibration of wavelength/optical frequency measurement instruments – Part 2: Michelson interferometer single wavelength meters*

IEC/TR 61931, *Fibre optic – Terminology*

IEC/TR 62048, *Optical fibres – Reliability – Power law theory*

IEC/TS 62129-3, *Calibration of wavelength/optical frequency measurement instruments – Part 3: Optical frequency meters using optical frequency combs*

¹⁾ Nach Veröffentlichung.

ISO/IEC Guide 99, *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*

ISO 527-4, *Plastics – Determination of tensile properties – Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites*

ISO 14125:1998, *Fibre-reinforced plastic composites – Determination of flexural properties*

ASTM D3039/D3039M, *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*

ASTM E8/E8M, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*

JIS B 7721, *Tension/compression testing machines – Verification and calibration of the force-measuring system (corresponding ISO standard: ISO 7500-1, Metallic materials – Verification of static uniaxial testing machines – Part 1: Tension/compression testing machines – Verification and calibration of the force-measuring system)*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 61757-1, IEC 60050 (IEV), IEC/TR 61931, ISO/IEC Guide 99 (VIM) und die folgenden Begriffe.

ANMERKUNG Langperiodengitter, ungleichmäßige Gitter, Gitter mit einem abgewinkelten Verlauf und FBG in einer polarisationserhaltenden Faser sind nicht berücksichtigt.

3.1

FBG

Faser-Bragg-Gitter

in silikabasierten optischen Einmodenfasern integriertes Phasenbeugungsgitter nach IEC 60793-2, Kategorie B, zum selektiven Reflektieren eines sehr schmalen Bereichs von Wellenlängen, während andere übertragen werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Um diese Eigenschaft zu erreichen, werden Zonen in regelmäßigen Abständen im Faserkern verändert, um unterschiedliche Brechzahlen zu erhalten, die etwas höher als der Kern sind.

3.2

FBG-Dehnungssensor

Bauelement, das ein oder mehrere Faser-Bragg-Gitter (FBG nach 3.1) als empfindliches Element für Dehnungsmessungen enthält

3.3

λ_B

Bragg-Wellenlänge

Wellenlänge des FBG (nach 3.1), in der Regel zurückzuführen auf die Bragg-Reflexionspitze oder das Übertragungsminimum, ohne Dehnungsbeanspruchung bei Referenzumgebungsbedingungen. Sofern mit einem FBG-Dehnungssensor (nach 3.2) verbunden, auf die Konfiguration vor dem Einbau bezogen

3.4

λ_0

Referenzwellenlänge

Wellenlängenempfindlichkeit eines FBG bei festgelegten Belastungen und Umgebungsbedingungen, die bekannt sind

3.5

R_{FBG}

FBG-Reflexionsgrad

Verhältnis zwischen der einfallenden optischen Leistung P_0 und der reflektierten optischen Leistung P_{λ_B} bei der Bragg-Wellenlänge λ_B

Anmerkung 1 zum Begriff: Die zum FBG-Dehnungssensor gelangende Leistung ist aufgrund der Dämpfung in der Faser am Steckverbinder und auch im Gitter geringer als die einfallende optische Leistung (Eingang). Die Definition des FBG-Reflexionsgrads sollte daher die einfallende optische Leistung P_0 verwenden (siehe Gleichungen in 7.4.2), die den messbaren Teil am Steckverbinder eines LWL-Sensors stellt.

Anmerkung 2 zum Begriff: P_0 hängt vom Messgerät ab und ist kein absoluter Kennwert. Für die Betrachtung des Anwenders ist der Reflexionsgrad dann wichtig, wenn Betriebs- oder Einbaubedingungen vorhanden sind, welche die Reflexionseigenschaften beeinflussen.

3.6

Übertragungsämpfung eines FBG-Sensors

Dämpfung der Leistung des übertragenen optischen Signals entlang der optischen Faser, des Faser-Bragg-Gitters und der Bauteile zum Anschließen eines FBG-Dehnungssensors außerhalb des FBG-Spektrums

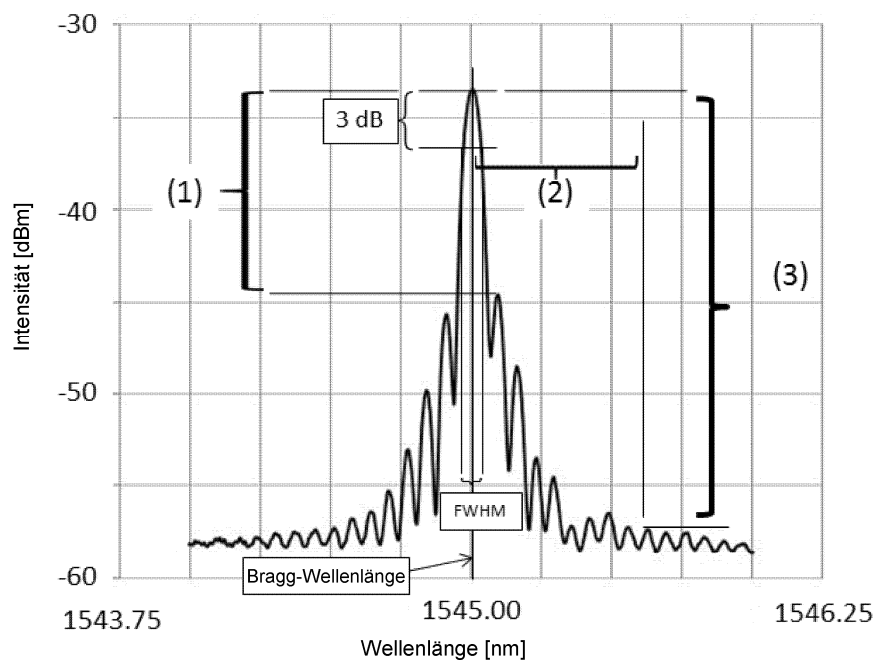
Anmerkung 1 zum Begriff: Bei der Betrachtung der Übertragungsämpfung in einem FBG-Sensor sind alle Teile, die zur Leistungsminderung beitragen, z. B. Übertragungsämpfungen durch Verbindungs- und Anschlusssteile, zu berücksichtigen. Die Übertragungsspektren der Gitter können bedingt von Einflüssen auf die Gitterleistung eine Verminderung der Gitterdurchlässigkeit aufweisen. Solche Übertragungsämpfungen im Gitter sollten getrennt betrachtet werden. Die Anmerkung gilt nur für Wellenlängen von Multiplex-FBG-Dehnungssensoren in Reihenschaltung mit zwei Enden.

3.7

Spektralbreite des FBG

Halbwertsbreite (FWHM) der Reflexionsspitze oder des Übertragungsminimums bei Bragg-Wellenlänge

Anmerkung 1 zum Begriff: Die FWHM eines FBG-Spektrums ist der Wellenlängenbereich des Spektrums, über den die Amplitude den größten Wert der Reflexion um mehr als 50 % (3 dB) bei λ_B übersteigt (siehe Bild 1).



Legende

- (1) Intensitätsunterschied zwischen Bragg-Spitze und der größten Seitenkeule (relativer Seitenkeulenpegel genannt)
- (2) Aufgezeichneter spektraler Abstand (siehe 3.12) vom höchsten Wert einer oder beider Seiten der Bragg-Wellenlänge
- (3) FBG-Signal-Rausch-Verhältnis SNR_{FBG} für (2)

Bild 1 – Merkmale des Reflexionsspektrums des Bragg-Gitters

3.8

Seitenkeulen

Reflexionsspitzen an jeder Seite der Bragg-Wellenlängenspitze eines FBG-Spektrums (siehe Bild 1)

Anmerkung 1 zum Begriff: Seitenkeulen werden auch als Seitenmoden bezeichnet.

Anmerkung 2 zum Begriff: Bei Seitenkeulen müssen die Anwendungsbedingungen berücksichtigt werden (siehe Anhang A, A.2).

3.9

relativer Seitenkeulenpegel

im Allgemeinen in Dezibel ausgedrücktes Verhältnis des größten Werts der Amplitude der festgelegten Feldkomponente in einer Seitenkeule zu dem größten Wert in einer Referenzkeule

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Referenzkeule eines FBG ist die Spitzenleistung bei Bragg-Wellenlänge λ_B ; die Spitzenleistung der größten Seitenkeule im FBG-Spektrum ist die damit verbundene Feldkomponente (siehe Bild 1).

3.10

Pegelbreite

eine in dB ausgedrückte relative Amplitudendifferenz zwischen einem lokalen Höchstwert und einer bestimmten Amplitude, bei der ein spektrales Merkmal anhand einer zweiseitigen Schwellenüberschreitung zur Bestimmung angewandt wird, ob der lokale Höchstwert entweder als Grundwellenlängenspitze oder als Seitenkeule zu bewerten ist.

Die Pegelbreite wird zur Bewertung einer relativen Schwelle eines lokalen Höchstwerts angewandt

3.11

Spitzenbreite

in nm ausgedrückte Breite, über die ein lokaler Höchstwert ein zweiseitiges Spektrum aufweist, das bei einem festgelegten Pegelbreitenparameter einen Schwellenwert überschreitet. Die Anforderung an die Spitzenbreite gilt in Verbindung mit dem Pegelbreitenparameter, um die Grundwellenlängenspitzen von Nebenkeulen in einem System zu unterscheiden, wo Nebenmoden bei einer absoluten Amplitude höher sein können als benachbarte Grundwellenlängenspitzen

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Größe der spektralen Breite des FBGs ist definiert als die spektrale Breite des Grundmodus des FBGs und entspricht mindestens der Spitzenbreitenanforderung des Algorithmus der Spitzenerkennung, wenn die Pegelbreite mit 3 dB festgelegt ist.

3.12

SNR_{FBG}

FBG-Signal-Rausch-Verhältnis

in dB ausgedrücktes Verhältnis des größten Werts der Amplitude der Bragg-Wellenlängenspitze zu dem der gleichzeitig daneben verlaufenden Amplitude der Seitenkeule bei einem Wellenlängenabstand von 1 nm und unbelasteten Bedingungen (siehe Bild 1)

Anmerkung 1 zum Begriff: SNR_{FBG} darf nicht mit den durch den Beschriftungsvorgang und in Abhängigkeit von der Anzahl der Gitter sowie dem Gitterabstand Λ und der Brechzahländerung des FBG verursachten Seitenkeulen eines FBG verwechselt werden. Das Rauschen wird durch die Messvorrichtung erzeugt; die Seitenkeulen werden während des Beschriftungsvorgangs des Gitters erzeugt und sind für die Verwendung eines FBG als Dehnungssensor von großer Bedeutung (siehe 3.7).

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Wert „1 nm“ ist immer noch gültig, wenn die zentrale Wellenlänge des FBG in den sichtbaren Bereich ausgedehnt wird.

3.13

FBG-Dehnungsempfindlichkeit

Verhältnis der relativen Änderung der Wellenlänge $\Delta\lambda/\lambda_0$ für eine festgelegte Dehnungsbeanspruchung $\Delta\varepsilon$. Die Messung der FBG-Dehnungsempfindlichkeit wird durch diese Gleichung definiert

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = (1 - p) \cdot \Delta\varepsilon$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Die FBG-Dehnungsempfindlichkeit drückt die Reaktion eines FBG auf eine einachsige Dehnungsverformung $\Delta\varepsilon$ der Gitterfläche aus. Das Dehnungsverhalten wird durch den photoelastischen Koeffizienten p ausgedrückt. Für die praktische Anwendung wird der Dehnungsfaktor k als lineare Näherung für $(1-p)$ eingeführt. In diesem Fall kann die Empfindlichkeit als lineare Funktion eines nicht-integrierten in eine Richtung gedehnten Gitterbereichs betrachtet werden (siehe 7.6), d. h. nur die optische Faser und die Beschichtung werden verformt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Häufig wird dieser Begriff als Spitzen-Verschiebung ($\Delta\lambda$ in nm) für die Änderung der einwirkenden Dehnung ($\Delta\varepsilon$ in $\mu\text{m/m}$) definiert.

Anmerkung 3 zum Begriff: Die Dehnungsempfindlichkeit kann durch temperaturbedingte Verformung der optischen Faser überlagert werden.

3.14

k

Dehnungsfaktor

Verhältnis der relativen Änderung der Wellenlänge $\Delta\lambda/\lambda_0$ für eine mechanische Dehnungsbeanspruchung $\Delta\varepsilon$ auf einen FBG-Dehnungssensor. Dieses Verhältnis wird durch den dimensionslosen Dehnungsfaktor k ausgedrückt, der vom Hersteller gemessen wird

$$k = \frac{\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}}{\Delta\varepsilon}$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Dehnungsempfindlichkeit der Produkte wird durch den vom Hersteller gemessenen Dehnungsfaktor k ausgedrückt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Beim Dehnungsfaktor k werden alle Einflüsse auf den FBG-Dehnungssensor bezüglich der Dehnungsempfindlichkeit berücksichtigt. Der Dehnungsfaktor kann abhängig von der gewählten Ausführung des Dehnungssensors variieren (z. B. Fasern mit Bragg-Gitter und spezieller Schutzschicht oder FBG-Dehnungsmessstreifen) und somit von der Dehnungsempfindlichkeit eines Bragg-Gitters im LWL abweichen (siehe 3.13).

Anmerkung 3 zum Begriff: Der Dehnungsfaktor k eines FBG-Dehnungssensors nimmt eine lineare Kennlinie an. Betrachtet man das gesamte Messsystem (Sensor, Vorrichtung, Verkabelung), kann der Dehnungsfaktor k für die Komponenten des Messsystems eigenständig definiert werden. Dies gilt nur für festgelegte Bedingungen. Im Falle einer nichtlinearen Kennlinie (z. B. durch Verzögerung des Dehnungsübertragungsverhaltens) kann der Dehnungsfaktor k innerhalb definierter Fehlergrenzen linearisiert werden.

3.15

Krümmungsradius der Mindestbetriebsbereitschaft

Mindestradius, bis zu dem ein FBG ohne Änderung der angegebenen Leistungsparameter gebogen werden kann

3.16

FBG-Sensor-Dehnungsbereich

höchste Belastung, die ein FBG axialer Zug- oder Druckspannung ohne Veränderung der angegebenen Leistungsparameter ausgesetzt sein kann

Anmerkung 1 zum Begriff: Dies könnte axiale Zugspannung und Druck beinhalten.

Anmerkung 2 zum Begriff: Außerhalb dieses Bereichs darf die festgelegte Leistungsmessung beeinträchtigt, der FBG-Dehnungssensor jedoch physikalisch nicht beschädigt werden.

3.17

Λ

FBG-Periode

Abstand zwischen den sich periodisch ändernden Brechzahlbereichen (Gitterebenen) in der Faser, ausgedrückt durch Λ . Die FBG-Periode definiert die Bragg-Wellenlänge (siehe 3.3) durch die Gleichung

$$\Lambda = \frac{\lambda_B}{2 \cdot n_{\text{eff}}}$$

3.18

Ermüdungsverhalten

Änderungen der Sensoreigenschaften infolge sinusförmiger Lastwechsel bei Referenzumgebungsbedingungen

Anmerkung 1 zum Begriff: Die entsprechenden Sensoreigenschaften, die das Ermüdungsverhalten bestimmen, sind die Nullpunktverschiebung (siehe 3.19) und die Änderungen im Reflexionsspektrum des FBG-Dehnungssensors in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel.

3.19

Nullpunkt

Anfangswert eines Messzyklus auf den sich alle folgenden Messwerte beziehen

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Nullpunkt wird auch als Nullmenge bezeichnet.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Nullpunkt muss für alle Arten von Messungen (statisch, dynamisch) aufgezeichnet werden. Im Falle von Offline-Messungen, bei denen Aufnahmegeräte ausgeschaltet oder nicht angeschlossen sind, müssen die fortgesetzten Messungen auf den Nullpunkt zurückzuführen sein.

3.20

Temperatureinfluss auf einen FBG-Dehnungssensor

Änderung der Bragg-Wellenlänge (3.3) des FBG-Dehnungssensors, der nur thermischer Anregung ausgesetzt ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Die temperaturbedingte Dehnung wird als eine scheinbare Dehnung wahrgenommen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Begriff „Temperaturempfindlichkeit“ wird nicht verwendet, da diese sich auf die Temperaturmessung bezieht, während das hier betrachtete Merkmal auf die „Temperaturkompensation“ des Signals bezogen ist.

3.21

Doppelbrechung

optische Eigenschaft eines optisch anisotropen Werkstoffs mit richtungsabhängigen Brechzahlen, die zu unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Licht in unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen führt

Anmerkung 1 zum Begriff: Doppelbrechung ist eine Eigenschaft von optischen Materialien.

Anmerkung 2 zum Begriff: Für LWL-Sensoren trifft der Begriff Doppelbrechung dann zu, wenn Lichtwellenleiter mit doppelbrechender Eigenschaft verwendet werden, z. B. Fasern mit Panda- oder bow-tie-Struktur.

3.22

Polarisationsabhängigkeit

tritt auf, wenn Querbewertung auf eine Faser bewirkt, dass der kreisförmige Nennquerschnitt elliptisch wird mit dem Ergebnis des Teilens der rückreflektierten Bragg-Spektren in zwei ungleich reflektierte oder übertragene Wellen, die eine doppelte Spitze in dem Spektrum erzeugen

Anmerkung 1 zum Begriff: Polarisationsabhängigkeit der Bragg-Wellenlänge kann auch während des Schreibens des Bragg-Gitters auftreten, wenn der Laser nicht genau auf die Kernmitte fokussiert, sondern stattdessen in Richtung einer Seite des Mantels ausgerichtet ist. In diesem Fall werden asymmetrische Brechzahlen des Glases durch die Asymmetrie bei der Erstellung erzeugt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Polarisationsabhängigkeit der Bragg-Wellenlänge kann auch zu Unsicherheiten bei Messungen der Bragg-Wellenlänge, Spektralbreite und des FBG-Reflexionsgrads führen.

4 Symbole

Für die Anwendung dieser Norm gelten die folgenden Symbole:

h	Dicke des deformierten Messobjekts;
I_{ref}	Intensität der optischen Leistung der Referenzfaser;
k	Dehnungsfaktor k
l, L	Länge;
L_0	ursprüngliche Länge des Messobjekts;
L_1	Länge des Messobjekts nach Verformung;
n	Brechzahl der Wellenlänge;

n_{eff}	effektive Brechzahl des Bragg-Gitters (siehe 5.1);
p_{ϵ}	effektiver photoelastischer Koeffizient;
p	photoelastischer Koeffizient;
P_0	einfallende optische Leistung;
$P_{\lambda B}$	optische Leistung des FBG;
R_{FBG}	FBG-Reflexionsgrad;
R_{ref}	FBG-Reflexionsgrad der Referenzfaser;
s	Abstand des LWL-Sensors von der Oberfläche des Messobjekts;
SNR_{FBG}	Signal-Rausch-Verhältnis des FBG;
T	Temperatur;
$\bar{x}$	Mittelwert;
x_i	der i -te Messwert;
X	physikalischer Parameter (z. B. Temperatur, Dehnung oder Druck);
α	Wärmeausdehnungskoeffizient des Glasfaserwerkstoffs;
α_{gm}	Wärmeausdehnungskoeffizient des Trägermaterials des Dehnungsmessstreifens;
α_{sp}	Wärmeausdehnungskoeffizient des Prüflings;
$\Delta\lambda$	Verschiebung der FBG-Spitzenwellenlänge bei einer festgelegten Dehnungsbeanspruchung $\Delta\epsilon$;
ϵ	Dehnungsbeanspruchung (hier immer in Richtung der Faserachse betrachtet);
ϵ_a	am Prüfling angelegte Dehnungsbeanspruchung;
ϵ_{neff}	temperaturbedingte Dehnung (Wärmeleistung);
ϵ_{OF}	Biegedehnung an der Oberfläche des Messobjekts;
ϵ_{OSS}	mit einem FBG-Dehnungssensor gemessene Dehnungsbeanspruchung (für gebogene Messobjekte, siehe 7.6.2)
ϵ_p	Dehnungsbeanspruchung auf der Oberfläche eines Biegeelements;
$\epsilon_{p'}$	mit einem angebrachten Sensor endlicher Dicke gemessene Dehnungsbeanspruchung eines Biegeelements;
ϵ_s	scheinbare Dehnung;
λ_0	Referenzwellenlänge;
λ_B	Bragg-Wellenlänge;
Λ	FBG-Periode;
ξ	thermooptischer Koeffizient;
φ	logarithmische Dehnung.

5 Allgemeines

5.1 Faser-Bragg-Gitter (FBG)

Fibre-Bragg-Gitter sind in Lichtwellenleiter eingeschriebene Phasenbeugungsgitter. Sie werden häufig unter Verwendung von UV-Licht (z. B. mit einem Excimerlaser bei 248 nm) erzeugt. Die Faser wurde dieser UV-Strahlung ausgesetzt, um ein Interferenzmuster zu erzeugen. Durch die Empfindlichkeit gegenüber UV-Strahlung werden in diesem Verfahren dann Änderungen der Brechzahl des Faserkerns erzeugt, der dafür geeignet ist. Das Interferenzmuster ist eine Abbildung einer periodisch wechselnden Brechzahl im Faserkern.

Das einfallende und entlang der Faser übertragene Licht wird zusätzlich an diesen Punkten von einer bestimmten Wellenlänge überlagert (konstruktive Interferenz); dieser spektrale Anteil des einfallenden Lichts wird reflektiert. Im übertragenen Licht wird genau diese Wellenlänge (bezeichnet als Bragg-Wellenlänge λ_B) entsprechend des FBG-Reflexionsvermögens gedämpft. Im Bild 2 ist das Prinzip eines Faser-Bragg-Gitters in einem Lichtwellenleiter dargestellt.

Der Wert der reflektierten Bragg-Wellenlänge λ_B wird bestimmt von der Bragg-Bedingung:

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{\text{eff}} \cdot \Lambda \quad (1)$$

Nach Gleichung (1) hängt die Bragg-Wellenlänge λ_B des FBG von der effektiven Brechzahl des FBG und der FBG-Periode Λ ab. Die Spektralbreite der Bragg-Wellenlängenspitze wird im Wesentlichen durch die Anzahl der Gitterperioden und die Modulation der effektiven Brechzahl bestimmt.

Gemäß Gleichung (1) ist das FBG gegenüber Veränderungen der FBG-Periode und der effektiven Brechzahl empfindlich, die im Wesentlichen durch Änderungen der Dehnungsbeanspruchung und Temperatur beeinflusst werden. Die Bragg-Wellenlänge λ_B ändert sich (wird „verschoben“) mit den Änderungen der FBG-Periode Λ oder mit den Änderungen der effektiven Brechzahl n_{eff} .

Die Wellenlänge wird auf höhere Werte verschoben, wenn das LWL-Gitter gedehnt wird oder die Temperatur ansteigt. Der umgekehrte Prozess tritt auf bei Druckbeanspruchung und einem Absinken der Temperatur. Diese Auswirkungen auf n_{eff} und Λ werden mit Gleichung (2) beschrieben:

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{\partial \lambda_B}{\partial X} = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial X} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial X} \quad (2)$$

dabei ist

X der physikalische Parameter (z. B. Temperatur, Dehnungsbeanspruchung oder Druck).

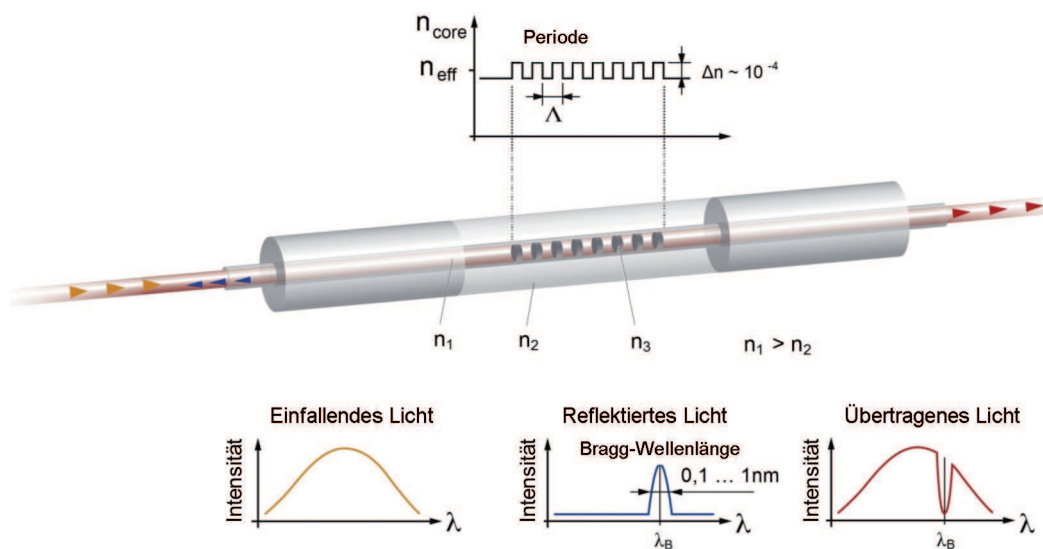


Bild 2 – Funktionsprinzip eines Faser-Bragg-Gitters im Lichtwellenleiter

Faser-Bragg-Gitter sind so in Dehnungsmessungen eingebunden, dass nur die Veränderungen der Dehnungsbeanspruchung entlang der Faserachse und die Temperaturänderungen von Bedeutung sind (die störende Wirkung der Temperatur wird in 7.12 behandelt).

Dadurch ergibt sich die allgemeine Veränderung der Bragg-Wellenlänge durch:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial L} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial L} \right) \Delta L + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (3)$$

Der erste Term in Gleichung (3) beschreibt die Wirkung der mechanischen Verformung ($\partial\Lambda/\partial L$) und die elasto-optische Reaktion ($\partial n_{\text{eff}}/\partial L$) des Lichtwellenleiters. Der zweite Term in Gleichung (3) beschreibt den Temperatureinfluss auf n_{eff} und Λ .

Der Term ($\partial\Lambda/\partial T$) beschreibt die Wirkung der thermischen Ausdehnung des Bragg-Gitters auf die Gitterperiode Λ . Die thermische Wirkung auf die Brechzahl der optischen Faser wird wiederum durch den Term ($\partial n_{\text{eff}}/\partial T$) ausgedrückt.

Die Auswirkungen von Dehnungsbeanspruchung und Temperatur werden praktisch in etwa durch die lineare Beziehung beschrieben

$$\frac{\Delta\lambda_B(\varepsilon, T)}{\lambda_B} = (1 - p_\varepsilon)\varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta T \quad (4)$$

Handelsübliche FBG, die sowohl thermischen als auch mechanischen Veränderungen ausgesetzt sind, reagieren auf diese Kombination mit einer entsprechenden Änderung der Bragg-Wellenlänge. Die gemessene Wellenlängenänderung lässt keine Unterscheidung zwischen den Veränderungen durch Spannungsbeanspruchung bzw. Temperatur zu; es sind besondere Maßnahmen erforderlich, um die beiden Werte (siehe 7.12) zu trennen.

Da jedes Bragg-Gitter, das als Sensor in einer Faser integriert ist, eine eigene Bragg-Wellenlänge besitzen kann, die verschieden von den übrigen ist, können mit Hilfe des Wellenlängenmultiplex-Verfahrens verschiedene Temperatur- oder Dehnungssensoren in einer optischen Faser erkannt und ausgelesen werden. Bild 3 zeigt ein Beispiel von Sensorsignalen (Bragg-Wellenlängen) einer Sensorfaser mit zahlreichen sequentiell angeordneten Bragg-Gittern (FBG-Array).

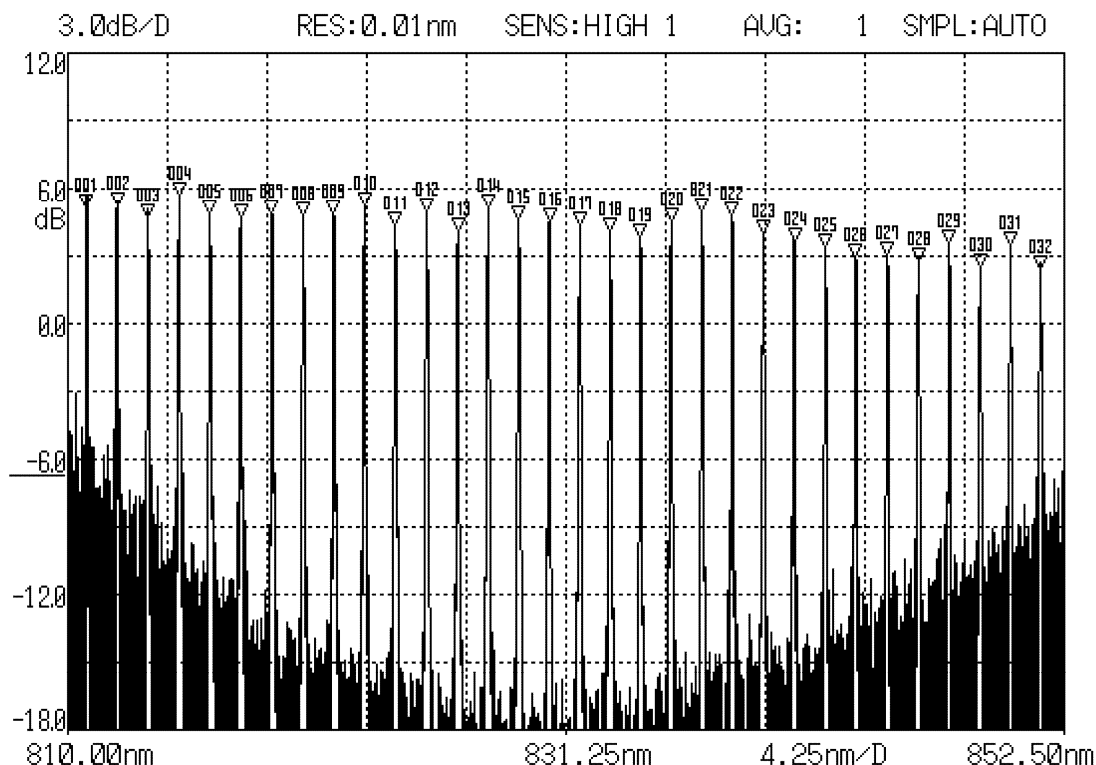


Bild 3 – Reflexionsspektrum eines FBG-Arrays

Um ein FBG bewerten zu können, müssen grundsätzlich die folgenden Parameter gemessen und angegeben werden (siehe Bild 1):

- Länge des FBG;
- Bragg-Wellenlänge in nm (siehe 3.3 und 7.2);
- Reflexionsgrad in % (siehe 3.5 und 7.4);
- Spektralbreite des FBG (FWHM) in nm (siehe 3.7 und 7.3);
- relativer Seitenkeulenpegel in dB (siehe 3.9).

Weitere Merkmale sind auf Verlangen des Kunden anzugeben:

- Fasertyp nach IEC 60793-2;
- vollständiges Spektrum;
- Parameter des Mantelwerkstoffs;
- Betriebstemperaturbereich (siehe 7.10);
- Stabilität bei umgebungsbedingten Einflüssen;
- Art des Beschriftungsvorgangs (beschriftet vor der Beschichtung, während des Ziehverfahrens, Wiederbeschichtung, Beschriftung durch die Beschichtung);
- Signal-Rausch-Verhältnis in dB (siehe 3.12)
- Gitterprofil (beispielsweise einheitlich oder apodisiert);
- durch die Polarisierung verursachte Unsicherheit bei der Messung der Bragg-Wellenlänge in pm (siehe Anhang C);
- durch die Polarisierung verursachte Unsicherheit bei der Messung der FBG-Reflexion in % (siehe Anhang C);
- durch die Polarisierung verursachte Unsicherheit bei der Messung der FBG-Spektralbreite in pm (siehe Anhang C);
- der Abstand zwischen den aufeinanderfolgenden FBGs eines FBG-Arrays;
- Genauigkeit der Markierungen, welche die Position des FBG in der Faser anzeigen;
- Vorspannen des FBG-Sensors;
- Wasserbeständigkeit.

5.2 FBG-Dehnungssensor

Der FBG-Dehnungssensor kann aus unterschiedlichen Materialien bestehen und verschiedene Bauformen annehmen:

- als ein Fasersegment mit einem oder mehreren FBG-Dehnungssensoren (nachfolgend als Bragg-Gitter-Faser bezeichnet). Mehrere hintereinander angeordnete FBGs werden auch als FBG-Array bezeichnet;
- als ein FBG-Dehnungssensor, bei dem die Verbindungsfasern des FBG-Elements auf dem Messobjekt an Verankerungsflächen/-punkten in einem definierten Abstand angebracht sind (allgemein Extensometer oder Dehnungsaufnehmer genannt);
- als ein FBG-Dehnungssensor, in dem das FBG von einem Schutzmantel, der als Übergangszone zwischen dem Sensorelement und dem Messobjekt dient, umgeben ist. Die Übergangszone ist in der Regel flach bzw. eben und wird im Allgemeinen als Dehnungsmessstreifen, als Patch oder Pad bezeichnet.

5.3 Messpunkt und Installation

Die Methode der formschlüssigen Verbindung des FBG-Dehnungssensors zu einer Baugruppe und dessen Kopplung mit einer photonischen Einrichtung wird als FBG-Dehnungssensorinstallation bezeichnet. Unabhängig von Material und Form ist der FBG-Dehnungssensor am Messobjekt auf einer der folgenden Arten angebracht oder eingebettet:

- kontinuierliche Kontaktstruktur: der FBG-Dehnungssensor und das Messobjekt besitzen eine kraftschlüssige Verbindung auf einer durchgehenden Fläche; der FBG-Dehnungssensor misst die durchschnittliche Dehnungsbeanspruchung oder eine Komponente der Dehnungsbeanspruchung, die über das Objekt auf die durchgehende Fläche wirkt;
- diskontinuierliche Kontaktstruktur: der FBG-Dehnungssensor und das Messobjekt besitzen eine kraftschlüssige Verbindung an einzelnen Verankerungsflächen/-punkten (eine Gruppe von Verankerungsflächen/-punkten), die nicht miteinander verbunden sind; der FBG-Dehnungssensor misst die durchschnittliche Dehnungsbeanspruchung oder eine Komponente der Dehnungsbeanspruchung, die zwischen den einzelnen Verankerungsflächen/-punkten wirkt.

Die Anschlussleitungen oder Kabel, die den FBG-Dehnungssensor verlassen, sind so anzuordnen, dass diese weder das Messobjekt behindern noch das Messsignal beeinträchtigen.

5.4 Messlänge

Die Messlänge ist die Länge von einem Messobjekt, über die der Sensor Informationen erfasst. Bei einem Dehnungssensor ist dies die Länge, innerhalb der eine Dehnungsbeanspruchung eine Messwertänderung des FBG-Dehnungssensors bewirkt. Die Messlänge ist abhängig von der Art des jeweiligen FBG-Dehnungssensors.

Im Fall eines punktuell befestigten FBG-Dehnungssensors (durch Kleben, Schweißen, Klemmen an die einzelnen Verankerungsflächen/-punkte) wird die Messlänge anhand der Messstrecke L zwischen den beiden Befestigungspunkten bzw. der Aneinanderreihung von Punkten auf der Oberfläche bestimmt.

Für einen FBG-Dehnungsmessstreifen ist die Messlänge die gemittelte und umgewandelte Länge, über der die angelegte Dehnungsbeanspruchung gemessen wurde. Diese Messlänge entspricht in der Regel nicht der Faser-Bragg-Gitterlänge.

5.5 Dehnungsbeanspruchung und Referenzdehnung

Die Dehnungsbeanspruchung ε wird in der Dehnungsmesstechnik üblicherweise als technische Dehnung bezeichnet und beschreibt die Erweiterung oder Schrumpfung ΔL eines Messobjekts bei einer bekannten mechanischen oder thermischen Belastung, bezogen auf die ursprüngliche Länge L_0 .

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (5)$$

Bei der Messung von Verformungen in Folge mehrfacher Belastungen sind verschiedene Referenzsysteme erforderlich, um die Dehnungsbeanspruchung zu berechnen. Die Dehnungskomponenten sind auf die jeweilige ursprüngliche Länge des Messobjekts bezogen, die nach vorheriger Beanspruchung bestimmt wurde. Dieser Dehnungswert wird als die logarithmische oder „wahre“ Dehnung φ bezeichnet und für kleine Dehnungsabweichungen näherungsweise berechnet als

$$\varphi = \int_{L_0}^{L_1} \frac{dl}{l} = \ln \frac{L_1}{L_0} \quad (6)$$

Das FBG innerhalb des FBG-Dehnungssensors erfasst die an das Element angelegte Dehnungsbeanspruchung über die Schutzbeschichtung, das Trägermaterial oder das Klebemittel. Die vom FBG-Dehnungssensor gemessene Dehnungsbeanspruchung kann durch das plastische/unelastische Verhalten dieser Materialien beeinflusst werden.

Sofern Bragg-Gitter-Fasern verwendet werden, kann eine unzureichende Übermittlung der Dehnungsbeanspruchung zu Abweichungen führen. Dies führt bei dem Messobjekt zu einer fehlerhaften Dehnungsempfindlichkeit.

5.6 Referenzwellenlänge

Verschiedene Auswertungsverfahren und unterschiedliche Geräte führen bei der gleichen Filterfunktion des Bragg-Gitters zu unterschiedlichen Wellenlängen, die aufgezeichnet werden. Entsprechend dieser Norm wird daher das Ergebnis der Wellenlängenmessung nach der Installation des FBG-Dehnungssensors mit der festgelegten Einrichtung als Referenzwellenlänge λ_0 gewertet.

Die Referenzwellenlänge muss nicht notwendigerweise gleich der vom Hersteller des FBG festgelegten Bragg-Wellenlänge sein. Aufgrund der sehr geringen Differenz zwischen Referenzwellenlänge und Bragg-Wellenlänge können in den nachfolgenden Gleichungen beide Wellenlängenwerte verwendet werden, ohne erhebliche Fehler herbeizuführen.

Sofern die Referenzwellenlänge am Anfang eines Messzyklus gemessen wird, kann diese Wellenlängenmessung als Nullpunkt-Messwert betrachtet werden (siehe 3.19).

5.7 Stabilitätsverhalten

5.7.1 Drift und Kriechen

Stabilität ist im Allgemeinen die Fähigkeit eines Messsystems, seine messtechnischen Merkmale über die vorgesehene Betriebszeit beizubehalten und andere Spezifikationen zu erfüllen. Stabilität im Sinne dieser Norm ist die Eigenschaft des eingesetzten FBG-Dehnungssensors, seine optischen Kennwerte über einen durch die Zielsetzung vorgegebenen Zeitraum der Nutzung gleichbleibend beizubehalten bzw. nur eine geringe zulässige Abweichung aufzuweisen.

Messwertabweichungen dürften nur auftreten

- wenn die betreffenden Werkstoffe einer Langzeitbeanspruchung ausgesetzt sind (Kriechen);
- ohne dass eine Beanspruchung auftritt (Nullpunktdrift).

Dies kann durch langsames Fortschreiten chemischen oder physikalischen Abbaus innerhalb der Werkstoffe verursacht werden (z. B. bei Alterung) oder durch eine Änderung der physikalischen Anfangsbedingungen (z. B. Temperatur oder Luftfeuchtigkeit).

Kriechen ist eine Größe, die von den eingesetzten Werkstoffen, dem Aufbau des Sensors und der Betriebsweise abhängig ist und die nur experimentell ermittelt werden kann. Nach den bisher gesammelten Erfahrungen bleibt die Fehlerauswirkung infolge des Kriechens innerhalb der festgelegten Messunsicherheit auf den Dehnungsfaktor k unerheblich, sofern das vom Hersteller vorgeschriebene Klebemittel verwendet wird.

Drift wird durch eine langsame Veränderung der messtechnischen Merkmale des Messsystems verursacht. Der Driftfehler des FBG-Dehnungssensors ist nach dem Stand der Technik vernachlässigbar klein; daher sind für den Zweck dieser Norm keine weiteren Angaben erforderlich. Wenn Drift jedoch beispielsweise durch ein verändertes Herstellungsverfahren oder unzureichendes Wiederbeschichtungsmaterial erzeugt wird, sollte Drift angegeben werden.

5.7.2 Formbeständigkeit der Bragg-Gitter-Spitze

Bei einem fehlerfreien Betrieb treten keine erheblichen Abweichungen im Profil der spektralen Empfindlichkeit auf. Die spektrale Empfindlichkeit und Stabilität eines FBG-Elements ist vom Herstellungsverfahren und der anschließenden Behandlung des Gitters abhängig. Bei der Weiterverarbeitung des FBG in einen FBG-Dehnungsmessstreifen oder einen FBG-Dehnungssensor können Schwankungen bei der spektralen Empfindlichkeit auftreten, die zu einer Verschlechterung der erforderlichen Stabilitätseigenschaften führen. Ein Spektrum ist annehmbar, wenn die höchste Seitenkeule mindestens 5 dB unterhalb der Hauptspitze liegt. Die Spezifikation des FBG gilt für den Auslieferungszustand des FBG-Dehnungssensors.

5.7.3 Hysterese

Hysterese in der Werkstoffkunde bedeutet, dass nach dem Wegfall der Eingangsgröße ein bestimmter Werkstoff nicht bzw. erst nach einer Zeitverzögerung seinen ursprünglichen Zustand erreicht. Dies bedeutet, dass der Ausgangswert eines elasto-plastischen Verformungsverhaltens nicht nur vom Eingangswert, sondern auch von zeitabhängigen Umkehrprozessen abhängig ist.

Bei Änderung der Dehnung (oder der Temperatur) erfolgt die Spitzen-Verschiebung bei silikabasierten FBGs üblicherweise ohne Hysterese-Effekt. Beschichtungen von silikabasierten FBGs oder FBG-Dehnungssensoren, in denen (nach 5.2) das FBG von einem Schutzmantel, der als Übergangszone zwischen dem Sensorelement und dem Messobjekt dient, umgeben ist, können Hysterese-Effekte hervorrufen. Sofern Hysterese bei wiederholter oder zyklischer Beanspruchung auftritt, ist darauf hinzuweisen. Die Hysterese eines nicht auf einen Prüfling angebrachten geprüften FBG-Dehnungssensors, kann im Allgemeinen vernachlässigt werden. Diese kann bei auf einen Prüfling angebrachten angebrachten FBG-Dehnungssensoren auftreten, jedoch ist der Hysterese-Effekt in der Regel vernachlässigbar klein. Sofern Hysterese für hochpräzise Dehnungsmessungen nicht vernachlässigt werden kann, muss der Wert der elastischen Auswirkung angegeben werden.

5.8 Prüfling

Die Biegeelemente, Platten oder andere Gegenstände auf denen FBG-Dehnungssensoren installiert sind, um deren Eigenschaften zu bestimmen und zu überprüfen, werden als Prüfling bezeichnet. Das Konzept eines „Normprüflings“ wird zusammen mit der Kalibrierung und der Prüfung angewandt. Für die allgemeine Beschreibung der Messverfahren wird der Begriff „Messobjekt“ verwendet.

5.9 Messwertanzeige

Die in dem FBG erzeugten dehnungsabhängigen Veränderungen in der Bragg-Wellenlänge werden durch ein angeschlossenes Messgerät erfasst (Messwerte) und für die messtechnische Auswertung verarbeitet (Ergebnis der Messung). Es ist üblich, dass die Messeinrichtung das optische Eingangssignal für den Sensor bereitstellt und das Antwortsignal des Sensors aufzeichnet.

5.10 Nullpunktbezogene Messung

Mit „Nullpunktmessung“ bzw. statischer oder quasi-statischer Messung werden alle Messungen bezeichnet, bei denen der Messwert sich auf einen Anfangswert (den Nullpunkt, siehe 3.19) bezieht.

Dabei müssen auch die folgenden Einflussfaktoren berücksichtigt werden:

- die Drift des Messgeräts;
- das Bewertungsverfahren:
 - verschiedene Bewertungsverfahren (Messgeräte) können in Bezug auf den Nullpunkt zu unterschiedlichem Messversatz führen. Bei einem Austausch des Messgerätes sollte der Nullpunktversatz zwischen dem alten und dem neuen Messgerät dementsprechend bestimmt werden;
- Kriechen beim eingesetzten Sensor.

Der Abtastvorgang durch die FBG-Sensoren muss auf neutrale Weise erfolgen, so dass die Eigenschaften der Anschlussleitungen und der optischen Steckverbinder oder Spleiße keinen Einfluss auf den Nullpunkt haben. Dennoch wird eine regelmäßige Überprüfung des Nullpunkts empfohlen.

5.11 Nicht nullpunktbezogene Messung

Bei nicht nullpunktbezogenen oder periodisch dynamischen Messungen sind die gemessenen Werte nicht auf einen festen Anfangswert bezogen. Dies gilt nur für die Amplitudenmessung einer periodischen Schwingung.

5.12 Herstellungscharge

Eine FBG-Charge ist eine Gruppe von FBG, die im gleichen Fertigungsprozess hergestellt wurde.

5.13 FBG-Dehnungssensor-Standardmodell

Das Standardmodell eines FBG-Dehnungssensors ist eine Gruppe von FBG-Dehnungssensoren mit identischen physikalischen Eigenschaften (geometrische Abmessungen, Herstellungsverfahren, verwendete Werkstoffe, Nachbearbeitung, Bragg-Wellenlänge).

5.14 FBG-Dehnungssensorserie

Eine Serie ist eine Gruppe von FBG-Dehnungssensoren, bei denen die verwendeten Werkstoffe und die Herstellungsprozesse identisch sind, deren Bragg-Wellenlänge oder Abmessungen jedoch unterschiedlich sein können.

6 Berichtspflichtige Merkmale und Kennwerte

6.1 Einzelheiten des Aufbaus und geometrischen Abmessungen

Die Merkmale, die anzugeben sind, müssen sich auf das entsprechende Sensormodell nach 5.2 beziehen. Die einschlägige Modellbezeichnung muss angegeben werden.

Die geometrischen Angaben der Länge, Breite, Höhe und der Abstand des Sensors vom Messobjekt sowie die entsprechenden Maße für die Montage müssen vom Hersteller bereitgestellt werden.

6.2 Bauform des FBG-Dehnungssensors

Die Bauform des Sensors nach 5.2 ist vom Hersteller anzugeben. Sofern über mehr als eine Bauform berichtet wird, müssen für jede Bauform die nach Abschnitt 7 gemessenen Merkmale und Eigenschaften angegeben werden.

6.3 Temperatur- und Feuchtebereich

Vom Hersteller sind Temperatur- und Feuchtebereich für Lagerung, Montage und Betrieb vorzugeben.

6.4 Anforderung an den Anschluss

Es ist anzugeben, ob der Sensor mit einem optischen Steckverbinder bereitgestellt wird. Ist dies der Fall, muss der Typ nach IEC 60874-1 angegeben werden. Der kleinste zulässige Radius für die Verlegung der Anschlussleitungen muss festgelegt werden. Sofern der Sensor mit dem Anschlusskabel verbunden ist, muss die Kompatibilität bezüglich des Durchmessers des Modenfeldes sichergestellt werden. Spleißverluste entstehen durch fehlerhafte Abstimmung. Wenn es zu Spleißverlusten kommt, muss der Hersteller über die Faserparameter und diese zusätzliche Dämpfung informieren. Wenn der FBG-Dehnungssensor nur von einer Seite betrieben werden kann, muss der Hersteller die Verbindungsseite markieren. Dies kann der Fall sein, wenn FBG-Arrays mit einer hohen Reflexion eingesetzt werden.

7 Zu messende Merkmale und Kennwerte

7.1 Probenahme und statistische Bewertung

7.1.1 Probenahme

Die folgenden Probenahmeverfahren müssen entsprechend dem beabsichtigten Umfang der Prüfung angewandt werden

- zufällige Probenahme;
- Typprüfung;
- Serienprüfung;
- einzelne Stichprobenprüfung.

Viele Eigenschaften des FBG-Dehnungssensors können nur an einem installierten Sensor bestimmt werden. In diesem Fall muss eine statistische Auswertung durchgeführt werden. Die Anzahl der verwendeten Sensorproben ist anzugeben.

7.1.2 Zufällige Probenahme

Bei der Anforderung nach einer zufälligen Probenahme wird davon ausgegangen, dass die Kennlinie nach einer Gaußschen Verteilung verläuft. Alle Sensoren, die zur Prüfung der Kennwerte ausgewählt wurden, müssen der gleichen Herstellungscharge entstammen. Eine aussagefähige Anzahl von Proben (mindestens fünf) müssen ausgewählt werden. Das Ergebnis einer Prüfung mit zufälliger Probenahme gilt für die gesamte Herstellungscharge.

7.1.3 Typprüfung

Die Typprüfung ist eine Prüfung mit zufälliger Probenahme nach 7.1.2. Hier ist das Ergebnis der Prüfung mit mindestens fünf Prüflingen dieses Modells für alle Herstellungschargen gültig.

7.1.4 Serienprüfung

Die Serienprüfung ist eine Prüfung mit zufälliger Probenahme nach 7.1.2, wobei das Ergebnis für ein einziges Muster aus einer Dehnungssensorserie bestimmt und für die komplette Serie gültig erklärt wird.

7.1.5 Einzelne Stichprobenprüfung

Hier ist jeder Prüfling aus einer Sensorserie oder nur ein Prototyp eines einzigartigen FBG-Dehnungssensors zu prüfen.

7.1.6 Ausweisen des Messergebnisses

Das Ergebnis der Serienprüfungen, Typprüfungen und der Prüfung mit zufälliger Probenahme wird als arithmetischer Mittelwert mit der entsprechenden Standardabweichung angegeben. Die Form der Angabe der Standardabweichung muss festgelegt werden.

Wenn die Sensoren X_1 bis X_n geprüft werden, dann wird die Kennlinie als Mittelwert $\bar{x}$ des n -ten ermittelten Wertes x_1 bis x_n der Sensoren aufgeführt.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

Die Standardabweichung (des Einzelwerts) ergibt sich durch

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

7.1.7 Aufbereitung des Prüflings

Den für die Prüfung ausgewählten Sensoren muss es ermöglicht werden, ein Gleichgewicht mit den Umgebungsbedingungen, in der die Prüfung durchzuführen ist, herzustellen; die Lagerung in einer solchen Umgebung sollte auf jeden Fall für mindestens 6 Stunden vorgenommen werden.

7.1.8 Umgebungsprüfbedingungen

Alle Prüfungen müssen bei Umgebungsbedingungen mit einer bestimmten Temperatur und relativen Feuchte durchgeführt werden; die Werte der Parameter und deren Toleranz sind aufzuzeichnen.

7.1.9 Für die speziellen Kennwerte geforderte Art der Prüfung

Tabelle 1 – Für die speziellen Kennwerte geforderte Art der Prüfung

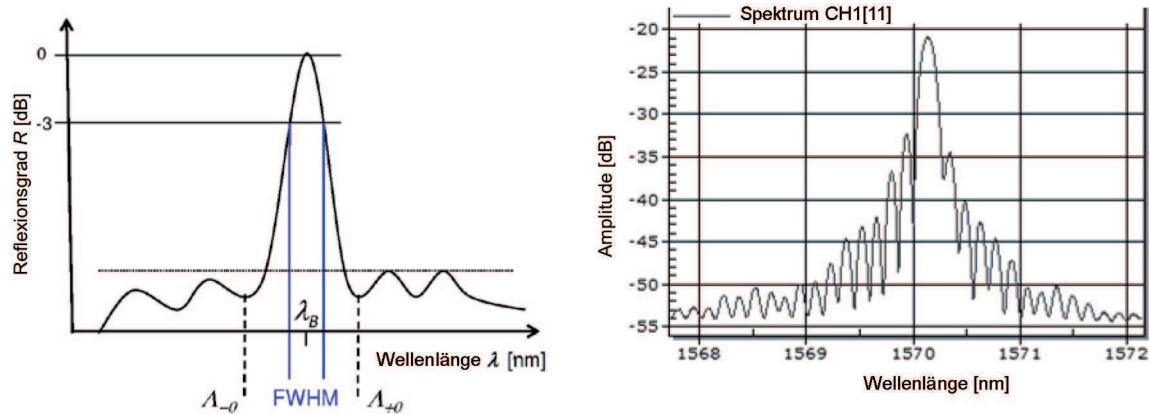
Bauartbedingte Merkmale und Kennwerte	Prüfung
Betriebstemperatur- und Feuchtigkeitsbereiche	Serienprüfung
Bragg-Wellenlänge	einzelne Stichprobenprüfung
FBG-Spektralbreite	Serienprüfung
Reflexionsgrad	Typprüfung
FBG-Dehnungsempfindlichkeit	zufällige Probenahme
FBG-Dehnungsfaktor	zufällige Probenahme
maximaler Dehnungsbereich bei Umgebungsbedingungen (siehe 7.1.8)	Serienprüfung
Ermüdungsverhalten	Serienprüfung
Krümmungsradius der Mindestbetriebsbereitschaft	Serienprüfung
temperaturbedingte Dehnung	zufällige Probenahme

7.2 Bragg-Wellenlänge λ_B

7.2.1 Allgemeines

Die folgenden Kennwerte eines FBG-Spektrums müssen auf Anforderung des Kunden entsprechend dieser Norm gemessen werden:

- Bragg (Spitzen)-Wellenlänge in nm;
- FBG-Spektralbreite in nm;
- FBG-Reflexionsgrad in %;
- relativer Seitenkeulenpegel in dB;
- FBG-Signal-Rausch-Verhältnis in dB;
- λ_{+0} , λ_{-0} die ersten Pole (Kleinstwerte) der Bragg-Gitter-Reflexionsspitzen (siehe Bild 4);
- durch die Polarisierung verursachte Unsicherheit bei der Messung der Bragg (Spitzen)-Wellenlänge;
- durch die Polarisierung verursachte Unsicherheit bei der Messung der FBG-Spektralbreite;
- durch die Polarisierung verursachte Unsicherheit bei der Messung der Reflexion;



ANMERKUNG Der Wert λ_B ergibt sich aus dem mathematischen Algorithmus des Gerätes. Die räumliche Auflösung, die Abtastrate und die implementierten Softwarefilter der Vorrichtung bestimmen die Genauigkeit der Wellenlänge.

Bild 4 – Reflexionsspektrum eines FBG [berechnetes (links) und gemessenes Spektrum (rechts)]

7.2.2 Messverfahren

Für FBG mit einem geringeren Reflexionsgrad ($R_{\text{FBG}} < 50 \%$) muss die Bragg-Wellenlänge der Reflexion gemessen werden. Für FBG mit einem höheren Reflexionsgrad ($R_{\text{FBG}} > 90 \%$) muss diese allerdings im Übertragungsteil gemessen werden. Bei einem besonders stark reflektierenden FBG ($R_{\text{FBG}} > 90 \%$) wird es zunehmend schwieriger, die höchste Bragg-Wellenlängenspitze genau zu bestimmen. In diesem Fall wird die niedrigste Übertragung für die Bragg-Wellenlängenmessung verwendet. Für Zwischenwerte des Reflexionsgrads kann jede Konfiguration verwendet werden.

Im Fall einer symmetrisch verlaufenden Spektralempfindlichkeit muss die Bragg-Wellenlänge ersatzweise als das arithmetische Mittel berechnet werden, z. B. zwischen den beiden Fallpunkten bei 3 dB (siehe Bild 4).

Alle Messungen müssen bei ungebogenem FBG-Dehnungssensor durchgeführt werden. Die Bragg-Wellenlänge des FBG muss bei ausreichender spektraler Auflösung gemessen und aufgezeichnet werden. Die verwendeten Messverfahren und die entsprechende Unsicherheit (spektrale Auflösung) sind anzugeben. Bei Polarisierungseffekten sind spezielle Messungen durchzuführen (siehe Anhang C).

7.2.3 Auswertung

Es ist keine besondere Auswertung erforderlich.

7.2.4 Berichterstattung

Die gemessene bzw. errechnete Bragg-Wellenlänge und das Messverfahren sind anzugeben. Auf Anforderung des Kunden muss das FBG-Spektrum ebenfalls ausgewiesen werden.

7.3 Spektralbreite des FBG

7.3.1 Messverfahren

Das FBG-Spektrum des FBG-Dehnungssensors muss bei ausreichender spektraler Auflösung gemessen werden. Alle Messungen müssen bei ungebogenem FBG-Dehnungssensor durchgeführt werden.

Die Möglichkeit von Schwankungen bei ungleichmäßiger Dehnungsbeanspruchung innerhalb des FBG, die zu Änderungen der Spektralbreite führen können, muss bei Dehnungsmessungen berücksichtigt werden. Änderungen der Spektralbreite können auftreten, wenn FBG-Dehnungsmessstreifen verwendet werden. Die Ursachen einer Veränderung der Spektralbreite sind zu finden.

- bei der Installation selbst, sofern unterschiedliche Wirkkräfte (Verzerrungen) eingearbeitet wurden,
- bei Auftreten von Schichtablösungen,
- wenn am Messpunkt erhebliche ungleichmäßige Dehnungsbeanspruchung auftritt.

Die Beständigkeit der Spektralbreite hat bei Anwendung der mathematischen Bewertungsverfahren zur Ermittlung von λ_B entscheidenden Einfluss auf die Messunsicherheit. Die Spektralbreite kann durch verschiedene Einflussgrößen beeinflusst werden, z. B. Temperatur, die größtmögliche Dehnungsbeanspruchung und fortwährende Schwingungen.

Die Spektralbreite kann auch stark vom Polarisationszustand der optischen Lichtquelle beeinflusst werden, sofern an der Stelle, wo sich in der Faser das FBG befindet, eine Doppelbrechung auftritt. Messungen der Spektralbreite bei verschiedenen Polarisationszuständen der optischen Quelle geben deutliche Hinweise auf den Zustand des Sensors.

Obwohl die Polarisationsabhängigkeit entweder durch Ungleichmäßigkeiten während des ursprünglichen Herstellungsverfahrens des FBG, ungleichmäßige Bindung des FBG innerhalb der Dehnungssensoreinrichtung oder durch ungleichmäßiges Anbringen der Dehnungssensoreinrichtung an den Aufnahmeträger hervorgerufen werden kann, ist alles als unerwünscht anzusehen und beeinträchtigt die Messgenauigkeit (siehe 5.7).

7.3.2 Auswertung

Das gemessene FBG-Spektrum ist nach den Festlegungen auszuwerten (siehe 3.7 und die Bilder 1 und 4). Die Spektralbreite wird aus einem Reflexionsspektrum bestimmt, wobei der Abstand der beiden Wellenlängenwerte zwischen den beiden Fallpunkten bei 3 dB von beiden Seiten der größten Reflexion genommen wird. Alternativ wird das Übertragungsspektrum verwendet und eine geeignete Spektrumbewertung angewandt.

7.3.3 Berichterstattung

Die Spektralbreite muss angegeben werden. Auf Anforderung des Kunden muss das FBG-Spektrum ebenfalls ausgewiesen werden.

7.4 FBG-Reflexionsgrad

7.4.1 Messverfahren

Das FBG-Spektrum des FBG-Dehnungssensors muss bei ausreichender spektraler Auflösung gemessen werden. Alle Messungen müssen bei ungebogenem FBG-Dehnungssensor durchgeführt werden.

7.4.2 Auswertung

Das gemessene FBG-Spektrum ist nach den Festlegungen auszuwerten (siehe 3.5 und Bild 5).

$$R_{\text{FBG}} = \frac{P_{\lambda_B}}{P_0} \cdot 100\%$$

$$R_{\text{FBG}} = \frac{P_0 - P_{\lambda_B}}{P_0} \cdot 100\%$$

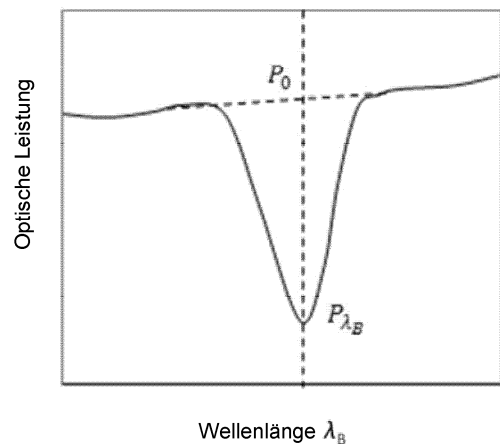
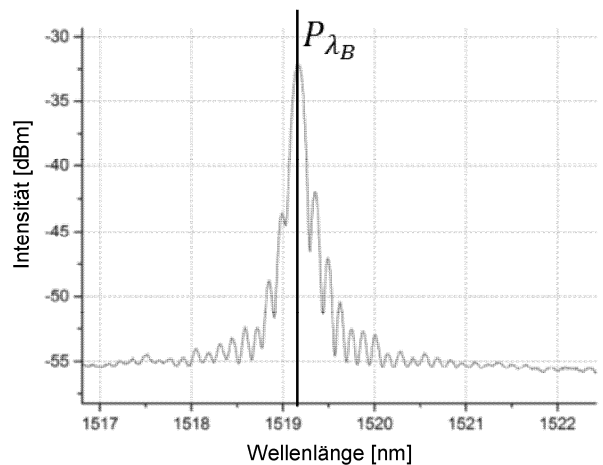


Bild 5 – Bestimmung des R_{FBG} aus dem FBG-Reflexionsspektrum (links) und dem Übertragungsspektrum (rechts)

7.4.3 Berichterstattung

Die Spektralbreite muss angegeben werden. Auf Anforderung des Kunden muss das FBG-Spektrum ebenfalls ausgewiesen werden.

7.5 Dehnungsempfindlichkeit

7.5.1 Allgemeines

Die Dehnungsempfindlichkeit von Fasergittern wird üblicherweise mit der Zugbeanspruchungsprüfung bestimmt. Der Prüfling wird mit Hilfe eines geeigneten Werkzeugs, das ein Fasersegment mit dem Fasergitter darauf gleichmäßig streckt, einer einachsigen Zugbeanspruchung ausgesetzt. Diese Zugprüfung liefert mit der einachsigen Dehnungsbeanspruchung genaue Angaben über die Dehnungseigenschaften eines FBG. Unter der Voraussetzung, dass das Messsystem mit einer Genauigkeit arbeitet, die mindestens einem Zehntel der festgelegten Genauigkeit des Sensors entspricht, kann die Bestimmung der Dehnungsempfindlichkeit durch die Zugbeanspruchungsprüfung als Kalibrierung betrachtet werden.

Die Bestimmung der Dehnungsempfindlichkeit kann auch dazu verwendet werden, den Dehnungsfaktor k der Dehnungssensorprüflinge zu ermitteln. Sofern der Dehnungssensor zur Untersuchung auf einem Werkstoff angebracht ist und wenn die Zugprüfeinrichtung mit einem Messsystem ausgerüstet ist (z. B. einem digitalen Bildkorrelationssystem oder einem System auf Basis von Speckle-Interferometrie, das physisch eigenständig von der Bewertungsmethode ist, um die Dehnungsbeanspruchung zu bestimmen) können die Einflüsse der beteiligten Werkstoffe wie die Beschichtung, der Klebstoff usw. auf die Dehnungseigenschaften ausgewertet werden.

Insbesondere im Falle von Langzeit-Dehnungsmessungen müssen bei der Bestimmung der Dehnungsempfindlichkeit auch die Temperatur- und Feuchtigkeitseffekte berücksichtigt werden. Es wird empfohlen, die Prüfung unter gleichzeitigen mechanischen, thermischen und umgebungsbedingten Belastungen durchzuführen.

7.5.2 Dehnungseinrichtung

Ein Prüfling, der in eine Belastungseinrichtung eingespannt wird, welche eine einachsige Zugspannung ausübt (Bild 6), wird zur Bestimmung der Dehnungsempfindlichkeit verwendet. Der zu prüfende Sensor (auf einem Prüfling angebrachte Sensoren, Probestücke) ist mittig auf dem Prüfling in der Hauptrichtung der Belastung anzubringen. Der Prüfling ist gut auszurichten und muss in der Einspannung so befestigt sein,

dass die Achse der Kraftanwendung mit der Dehnungsbelastung des zu bewertenden Sensors zusammenfällt. Während der Beanspruchung darf die Einspannung keine Biegung des Prüflings zulassen.

Die Zugprüfeinrichtung muss die Anforderungen einer entsprechenden Norm, z. B. ASTM E8/E8M oder JIS B 7721 erfüllen.

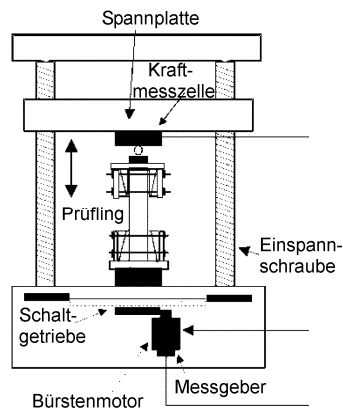


Bild 6 – Beispiel des Aufbaus einer Dehnungseinrichtung

Für bestimmte Arten von FBG-Dehnungssensoren, z. B. mit langen Messlängen, können andere Prüfaufbauten für die Dehnungseinrichtung verwendet werden. Das Funktionsprinzip und die Standardunsicherheit dieser Einrichtung sollten dokumentiert und auf Anfrage bereitgestellt werden.

7.5.3 Messverfahren der Dehnungsprüfung

Die Dehnungsempfindlichkeit wird bestimmt durch das Anlegen einer einachsigen Beanspruchung an den Prüfling, auf dem der Sensor installiert ist.

Während der Messung müssen Referenzumgebungsbedingungen mit einer Temperaturstabilität von mindestens $\pm 0,5$ K vorherrschen, um die temperaturbedingte Änderung der Elastizität (E-Modul) der Prüflinge zu vermeiden. Die Temperaturstabilität muss verbessert werden, wenn besondere Anforderungen an die zu prüfenden Sensoren vorliegen. Nach ordnungsgemäßer Lagerung ist der FBG-Dehnungssensor auf dem Normprüfling oder in der Prüfeinrichtung unter Standardbedingungen nach den Anweisungen des Herstellers zu installieren.

Es muss sichergestellt werden, dass die Installationsbedingungen (Art der Bindung) bei der Bestimmung der Dehnungsempfindlichkeit mechanisch gesehen identisch zu den Installationsbedingungen für den Betrieb des Sensors sind.

Die Dehnung des Prüflings sollte von einem Extensometer mit einer mindestens fünfmal besseren Auflösung als die der Messauflösung des Sensorsignals gemessen werden. Die Dehnung des eingesetzten FBG sollte mit einem Dehnungsmessstreifen verglichen werden, der an einer Stelle eingesetzt wird, welche für die FBG-Verformung am repräsentativsten ist. Bei dem gemeinsamen Verfahren treten jedoch Dehnungsübertragungsfehler auf, die eventuell durch die Wahl einer ungeeigneten Befestigungsmethode, in erster Linie durch den Klebstoff verursacht werden. Es wird die Verwendung eines physikalisch und anwendungsunabhängigen Bezugssystems wie Bildkorrelation oder das Specklemuster-Interferometriesystem empfohlen. Optische berührungsfreie Messverfahren ermöglichen die Messung der Oberflächenverschiebungen aller Teile des eingesetzten Sensors (Sensor mit Beschichtung, Befestigungsmaterial, Prüflingsmaterial). Die Wahl der optischen Methode hängt von den Anforderungen in Bezug auf den Dehnungsbeanspruchungsbereich, die Dehnungsauflösung und die Umgebungsbedingungen ab.

7.5.4 Auswertung

Die Dehnungsverformung $\Delta\varepsilon$ muss aus den Messungen der Länge und der Längenänderung ermittelt werden. Dies erfolgt nach Gleichung (5).

Die Dehnungsempfindlichkeit wird mit der folgenden Gleichung bestimmt:

$$\frac{\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}}{\Delta\varepsilon} = (1 - \rho) \quad (9)$$

Die FBG-Dehnungsempfindlichkeit ist oft eine Funktion mit einer komplexen Form (insbesondere bei extremen Temperaturen oder Dehnungsbeanspruchungen). Die FBG-Dehnungsempfindlichkeit, dargestellt durch $(1-\rho)$, muss nicht gleich dem Dehnungsfaktor sein, weil der Dehnungsfaktor nur eine lineare Annäherung an die FBG-Dehnungsempfindlichkeit ist, die nur die Beanspruchung des FBG-Dehnungssensors über einen schmalen (vom Hersteller festzulegen) Betriebsbereich berücksichtigt.

7.5.5 Berichterstattung

Die Merkmale der Dehnungsempfindlichkeit (funktionaler Zusammenhang zwischen der relativen Änderung der Wellenlänge $\Delta\lambda/\lambda_0$ und der aufgetragenen Dehnungsbeanspruchung ε) sowie das Messverfahren sind aufzuzeichnen.

7.6 Dehnungsfaktor k

7.6.1 Allgemeines

Für die praktische Anwendung wird der Dehnungsfaktor k als lineare Näherung eingeführt. Genau genommen muss die Dehnungsempfindlichkeit von jedem Dehnungssensor nicht linear sein, sondern kann von einer linearen Funktion abweichen. Der Dehnungsfaktor wird unter definierten Bedingungen für eine einfache Darstellung des Dehnungsmessergebnis verwendet. Die Verwendung des Dehnungsfaktors wurde in den vergangenen Jahrzehnten etabliert. Die Hersteller geben diesen für ihre Dehnungssensoren an und legen dafür bestimmte Einsatzbedingungen und die Unsicherheit fest, für die der Dehnungsfaktor gilt. Der Hersteller muss die Stabilität des Dehnungsfaktors für alle angegebenen Bedingungen sicherstellen und gewährleisten, dass alle festgelegten Umgebungs- und Langzeiteinflüsse auf die Dehnungsempfindlichkeit innerhalb des Unsicherheitsbereichs des Dehnungsfaktors liegen.

Um den Dehnungsfaktor k der Dehnungssensoren zu bestimmen, wird üblicherweise die Vier-Punkt-Biegeprüfung angewandt. Abhängig von der Verfügbarkeit der Prüfeinrichtung können sowohl die Vierpunkt-Biegeprüfung als auch die Dehnungsprüfung durchgeführt werden. Die besonderen Anforderungen an den Werkstoff, auf dem der Sensor angebracht ist, müssen für die Auswahl des Prüfverfahrens berücksichtigt werden.

Insbesondere im Falle von Langzeit-Dehnungsmessungen müssen bei der Bestimmung des Dehnungsfaktors k auch die Temperatur- und Feuchtigkeitsauswirkungen berücksichtigt werden. Es wird empfohlen, die Prüfung unter gleichzeitigen mechanischen, thermischen und umgebungsbedingten Belastungen durchzuführen. Die Bestimmung des Dehnungsfaktors k sollte mit einer Dehnungsempfindlichkeitsmessung verglichen werden, um die Fehlergrenze festzulegen. Dieser Unsicherheitsbereich ist bei Abweichungen von den Dehnungssensorkennwerten zu berücksichtigen.

7.6.2 Biegeeinrichtung

Zur Messung des Dehnungsfaktors k von Dehnungssensoren wird ein Biegebalken verwendet. Der zu prüfende Sensor wird auf dem Träger in der Hauptrichtung der Beanspruchung angebracht. Der Prüfaufbau für die Vier-Punkt-Biegeprüfung wird eingesetzt, um die lineare Belastung und die Beanspruchungsverteilung in der Mitte des Balkens und das konstante Biegemoment zwischen den inneren Punkten der aufgetragenen Last bewirken zu können. Dies verhindert Ungleichmäßigkeiten innerhalb des Balkenmaterials, die den Sensor während des Biegemomentwechsels beeinflussen würden. Die Sensoren sind in der Mitte des Biegebalkens anzubringen. Entsprechende Prüfeinrichtungen werden in ISO 14125 vorgeschlagen.

Die Biegung muss durch gesteuerte Verschiebung und nicht durch Gewichte erzeugt werden, um Kriecheffekte des Biegebalkens zu vermeiden. Die Vorrichtung zum Aufbringen der Kraft (Bild 7) muss starr genug

sein; mit geeigneten Mitteln, muss verhindert werden, dass so wenig wie möglich Torsion im Biegebalken erzeugt wird.

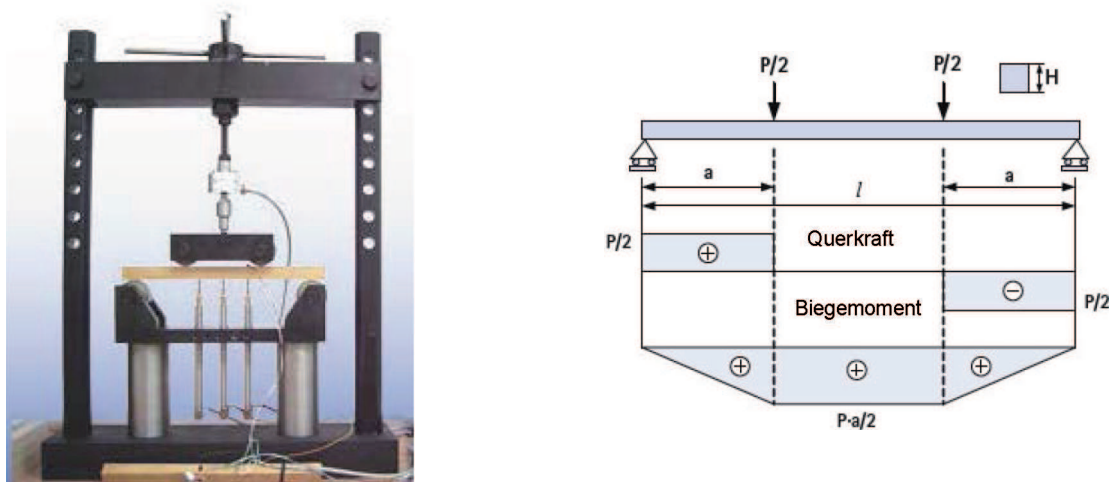
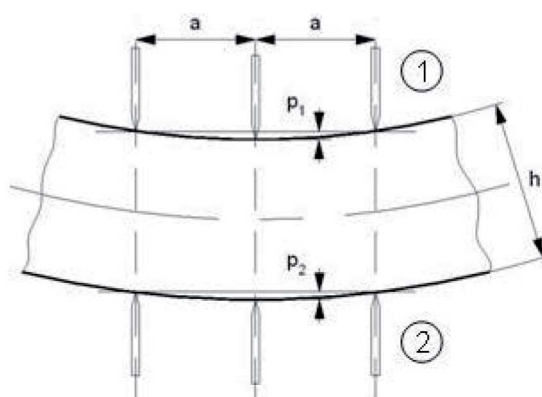


Bild 7 – Prüfaufbau (links) für die Vier-Punkt-Biegeprüfung mit Darstellung der Querkraft- und Biegemomentwirkung (rechts)

Die am zu prüfenden Sensor angelegte Dehnungsbeanspruchung ε_a muss im Dehnungsbereich zwischen $-1\,000\ \mu\text{m}/\text{m}$ und $+1\,000\ \mu\text{m}/\text{m}$ erfolgen, wobei eine Abweichung von $\pm 100\ \mu\text{m}/\text{m}$ zulässig ist, während die Belastungsgrenzen nach dem Werkstoff des Biegebalkens gewählt werden sollten. Es muss sichergestellt werden, dass die Dehnungsbeanspruchung im zulässigen elastischen Bereich bleibt, welcher 70 % der Dehngrenze ($R_{P0,2}$) für metallische Werkstoffe beträgt. Die Dehngrenze anderer Werkstoffe ist nach den einschlägigen Normen zu definieren, z. B. ISO 527-4 oder ASTM D3039/D3039M oder muss durch Prüfungen ermittelt werden. Die Dehnungsbeanspruchung ε_a wird mit einer Messunsicherheit von 0,5 % bei Maximum bestimmt. Innerhalb des Belastungsbereiches des Biegebalkens darf die Dehnungsbeanspruchung einen Unsicherheitswert von 0,5 % nicht übersteigen.

Die Prüfeinrichtungen sollten das Anlegen einer statischen Dehnungsbeanspruchung über mehrere Laststufen ermöglichen.

Die Biegung des Biegebalkens wird durch eine Wegmessung gemessen (siehe Bild 8).



Legende

- (1) Oberfläche unter Druck
- (2) Oberfläche in Spannung

Bild 8 – Bestimmung der Dehnungsbeanspruchung über Wegmessung

Die Dehnungsbeanspruchung der Oberfläche bei der Messung auf der konkaven Seite des Biegebalkens kann angegeben werden als

$$\varepsilon_p = \frac{h}{\frac{a^2}{p_1} + p_1 + h} \quad (10)$$

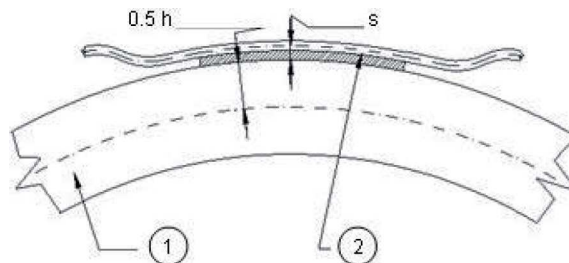
Die Dehnungsbeanspruchung der Oberfläche bei der Messung auf der konvexen Seite des Biegebalkens kann angegeben werden als

$$\varepsilon_p = \frac{h}{\frac{a^2}{p_2} + p_2 - h} \quad (11)$$

Weil der FBG-Dehnungssensor in einem Abstand s von der Oberfläche des Biegebalkens angeordnet ist (siehe Bild 9), muss die gemessene Dehnungsbeanspruchung ε_{OSS} im FBG korrigiert werden.

Die korrigierte Dehnungsbeanspruchung ε_p' am Biegebalken ist gegeben durch:

$$\varepsilon_p' = \frac{0,5 \cdot h}{0,5 \cdot h + s} \cdot \varepsilon_{OSS} \quad (12)$$



Legende

- 0,5 h Abstand der Oberfläche des Biegebalkens von der neutralen Achse
- s Abstand des Sensors von der Oberfläche
- (1) Biegebalken mit gekennzeichnete neutraler Achse
- (2) auf der Oberfläche angebrachter zu prüfender Sensor

Bild 9 – Ganzflächig auf einem gebogenen Biegebalken aufgebracht Sensor

7.6.3 Messverfahren

Der Dehnungsfaktor k eines FBG-Dehnungssensors ist mit Hilfe einer der beiden Methoden zu ermitteln:

- a) Anlegen einer Dehnungsbeanspruchung auf einen Biegebalken, auf dem der zu prüfende Sensor angebracht ist, oder
- b) Befestigen des zu prüfenden Sensors an zwei Punkten mit einem Abstand L_0 , der während der Messung relativ zueinander axial verschoben wird.

Die Beanspruchung kann kontinuierlich oder stufenweise aufgebracht werden. Das stufenweise Aufbringen der Beanspruchung wird empfohlen, um Änderungen in den Festigkeitseigenschaften des Zugprüflings oder des Balkenwerkstoffs zu vermeiden. Die Anzahl der Laststufen muss nach dem Beanspruchungsbereich festgelegt werden, den der Sensor zu erfüllen hat. Nähern und ständige Kontrolle der Laststufen sollte weggesteuert sein, um Kriechen zu vermeiden.

Während der Messung müssen Referenzumgebungsbedingungen herrschen mit einer Temperaturstabilität von mindestens $\pm 0,5$ K, um eine temperaturbedingte Änderung der Elastizität (E-Modul) der Prüflinge zu vermeiden. Die Temperaturstabilität muss verbessert werden, wenn besondere Anforderungen an die zu prüfenden Sensoren vorliegen. Nach ordnungsgemäßer Lagerung ist der FBG-Dehnungssensor auf dem