

DIN EN 61757-2-1

ICS 33.180.99

Einsprüche bis 2013-12-18

Entwurf**LWL-Sensoren –
Dehnungsmessung –
Teil 2-1: Faser-Bragg-Gitter
(IEC 86C/1178/CD:2013)**

Fibre optic sensors –
Strain measurement –
Part 2-1: Fibre Bragg gratings
(IEC 86C/1178/CD:2013)

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2013-10-18 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@din.de 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 im DIN und VDE (Hausanschrift: 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 77 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE

Inhalt

	Seite
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	7
4 Symbole	10
5 Allgemeines	11
5.1 Faser-Bragg-Gitter (FBG)	11
5.2 FBG-Dehnungssensor	15
5.3 Messpunkt und Installation	15
5.4 Messlänge	15
5.5 Dehnungsbeanspruchung und Referenzdehnung	15
5.6 Referenzwellenlänge	16
5.7 Stabilitätsverhalten	16
5.7.1 Drift und Kriechen	16
5.7.2 Formbeständigkeit der Bragg-Gitter-Spitze	17
5.8 Prüfling	17
5.9 Messwertanzeige	17
5.10 Nullpunktbezogene Messung	17
5.11 Nicht nullpunktbezogene Messung	17
5.12 Herstellungscharge	18
5.13 FBG-Dehnungssensormodell	18
5.14 FBG-Dehnungssensorserie	18
6 Berichtspflichtige Merkmale und Kennwerte	18
6.1 Einzelheiten des Aufbaus und geometrischen Abmessungen	18
6.2 Bauform des FBG-Dehnungssensors	18
6.3 Temperatur- und Feuchtebereich	18
6.4 Empfohlene Art der Anbringung	18
6.5 Anforderung an den Anschluss	18
7 Zu messende Merkmale und Kennwerte	19
7.1 Probenahme und statistische Bewertung	19
7.1.1 Probenahme	19
7.1.2 Zufällige Probenahme	19
7.1.3 Typprüfung	19
7.1.4 Serienprüfung	19
7.1.5 Einzelne Stichprobenprüfung	19
7.1.6 Ausweisen des Messergebnisses	19
7.1.7 Aufbereitung des Prüflings	20
7.1.8 Umgebungsprüfbedingungen	20
7.1.9 Für die speziellen Kennwerte geforderte Art der Prüfung	20

	Seite
7.2 Bragg-Wellenlänge λ_B	20
7.2.1 Allgemeines	20
7.2.2 Messverfahren	21
7.2.3 Auswertung	21
7.2.4 Berichterstattung	21
7.3 Spektralbreite	22
7.3.1 Messverfahren	22
7.3.2 Auswertung	22
7.3.3 Berichterstattung	22
7.4 FBG-Reflexionsgrad	22
7.4.1 Messverfahren	22
7.4.2 Auswertung	22
7.4.3 Berichterstattung	23
7.5 Dehnungsempfindlichkeit (Dehnungsfaktor k)	23
7.5.1 Allgemeines	23
7.5.2 Biegeeinrichtung	23
7.5.3 Dehnungseinrichtung	25
7.5.4 Messverfahren für die Biegeprüfung	25
7.5.5 Messverfahren für die Dehnungsprüfung	26
7.5.6 Auswertung	27
7.5.7 Berichterstattung	27
7.6 Maximaler Dehnungsbereich bei Raumtemperatur	27
7.6.1 Allgemeines	27
7.6.2 Prüfaufbau	27
7.6.3 Messverfahren	28
7.6.4 Auswertung	28
7.6.5 Berichterstattung	28
7.7 Ermüdungsverhalten	28
7.7.1 Prüfaufbau	28
7.7.2 Messverfahren	29
7.7.3 Auswertung	29
7.7.4 Berichterstattung	29
7.8 Krümmungsradius der Mindestbetriebsbereitschaft	29
7.8.1 Messverfahren	29
7.8.2 Auswertung	30
7.8.3 Berichterstattung	30
7.9 Temperaturbedingte Dehnung	30
7.9.1 Allgemeines	30
7.9.2 Messverfahren	31

	Seite
7.9.3 Auswertung.....	31
7.9.4 Berichterstattung	31
7.10 Temperaturbedingte Dehnungsreaktion.....	31
7.10.1 Allgemeines	31
7.10.2 Prüfaufbau	32
7.10.3 Messverfahren.....	32
7.10.4 Auswertung.....	33
7.10.5 Berichterstattung	33
8 Empfehlungen für den Einsatz von FBG-Messgeräten.....	33
Anhang A (informativ) Weitere Eigenschaften der FBG-Dehnungssensoren	34
A.1 Allgemeines	34
Anhang B (informativ) Vordruck für Bauartspezifikation.....	35
B.1 Allgemeines	35
B.2 Mechanischer Aufbau des FBG-Dehnungssensors	35
B.3 Betriebseigenschaften des FBG-Dehnungssensors	35
B.4 Einschränkende Parameter des FBG Dehnungssensors	36
B.5 Temperaturdaten des FBG Dehnungssensors	36
B.6 Weitere Angaben des FBG Dehnungssensors, die auf Anforderung anzugeben sind.....	36
B.7 Wichtige Leistungsdaten der FBG-Messeinrichtung	36
Anhang C (informativ) Auswirkungen der Polarisation	37
C.1 Allgemeines	37
Anhang D (informativ) Eingesetzte FBG-Dehnungssensoren	38
D.1 Allgemeines	38
Literaturhinweise.....	39
 Bild 1 – Bestimmung von R_{FBG} aus dem FBG-Übertragungsspektrum	 8
Bild 2 – Funktionsprinzip eines Faser-Bragg-Gitters im Lichtwellenleiter	12
Bild 3 – Reflexionsspektrum eines FBG-Arrays	13
Bild 4 – Merkmale des Reflexionsspektrums des Bragg-Gitters	14
Bild 5 – Reflexionsspektrum eines FBG [berechnetes (links) und gemessenes Spektrum (rechts)]	21
Bild 6 – Prüfaufbau (links) für die Vier-Punkt-Biegeprüfung mit Darstellung der Querkraft- und Biegemomentwirkung (rechts).....	23
Bild 7 – Bestimmung der Dehnungsbeanspruchung über Wegmessung.....	24
Bild 8 – Ganzflächig auf einem gebogenen Biegebalken aufgebrachter Sensor	25
Bild 9 – Prinzipdarstellung der Dehnungseinrichtung.....	25
Bild 10 – Prüfling mit angebrachtem FBG-Dehnungssensor.....	29
 Tabelle 1 – Für die speziellen Kennwerte geforderte Art der Prüfung	 20

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 86C/1178/CD:2013 „Fibre optic sensors – Strain measurement – Part 2-1: 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 im DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

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

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

Der Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen 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.

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

1 Anwendungsbereich

Diese Norm ist Teil der Internationalen Normenreihe IEC 61757 und legt detailliert Spezifikationen fest für faseroptische Dehnungsmessungen, bei denen der Sensor (dehnungsempfindliches Bauteil) ein Faser-Bragg-Gitter (FBG) ist. Allgemeine Spezifikationen für LWL-Sensoren sind in IEC 61757-1 festgelegt.

Diese Internationale Norm führt die wichtigsten Eigenschaften und Merkmale eines FBG-Dehnungssensors für Dehnungsmessungen 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 von 0 Hz bis in den Kilohertzbereich (kHz).

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

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

IEC/TR 61931, *Fibre optic – Terminology*

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

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 anisotropic fibre-reinforced plastic composites*

ASTM D3039, *Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*

ASTM E8/E8M-11, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*

JIS B 7721, *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

Faser-Bragg-Gitter

FBG

in einem Lichtwellenleiter nach IEC 60793-2 integriertes optisches Interferenzfilter 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

Lichtwellenleiter oder Vorrichtung, die einen Lichtwellenleiter nach IEC 60793-2 enthält mit mindestens einem dehnungsempfindlichen FBG, das in einem zu messenden Objekt eingebaut oder an diesem befestigt ist

3.3

Bragg-Wellenlänge

λ_B

auf die Bragg-Reflexions- oder Übertragungsspitze zurückzuführende Wellenlänge bei Referenzumgebungsbedingungen ohne Dehnungsbeanspruchung

3.4

Referenzwellenlänge

λ_0

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

3.5

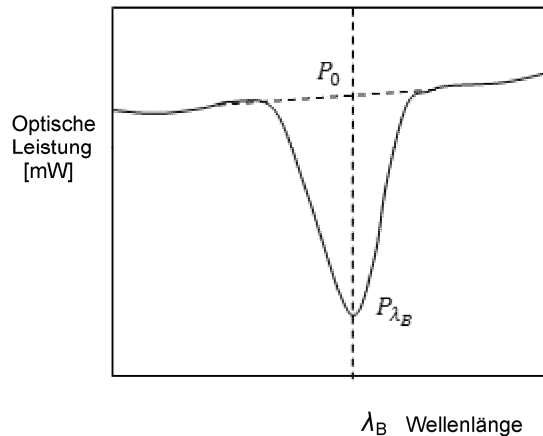
FBG-Reflexionsgrad

R_{FBG}

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

Anmerkung 1 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.

$$R_{\text{FBG}} = \frac{(P_0 - P_{\lambda_B})}{P_0} \times 100\%$$

Bild 1 – Bestimmung von R_{FBG} aus dem FBG-Übertragungsspektrum

3.6

Spektralbreite des FBG

Halbwertsbreite (FWHM) der Reflexions- oder Übertragungsspitze 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 4).

3.7

Seitenkeulen

Reflexionsspitzen neben der Bragg-Wellenlängenspitze eines einheitlichen FBG-Spektrums (siehe Bild 4)

3.8

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 4).

[QUELLE: IEC 60050-311:2001, 712-02-28, abgeändert – Anmerkung 1 zum Begriff wurde ergänzt.]

3.9

FBG-Signal-Rausch-Verhältnis

SNR_{FBG}

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 4)

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).

3.10

FBG-Dehnungsempfindlichkeit

Dehnungsfaktor (k)

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

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

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Dehnungsempfindlichkeit wird durch den gemessenen Dehnungsfaktor k ausgedrückt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Dehnungsfaktor k kann abhängig von der gewählten Ausführung des Dehnungssensors variieren (z. B. Fasern mit Bragg-Gitter und spezieller Schutzschicht oder FBG-Dehnungsmessstreifen) und somit von dem Dehnungsfaktor k für eine Faser mit Bragg-Gitter abweichen.

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 kann der Dehnungsfaktor k innerhalb definierter Fehlergrenzen linearisiert werden.

Anmerkung 4 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.

3.11

Krümmungsradius der Mindestbetriebsbereitschaft

Radius, bis zu dem ein FBG-Dehnungssensor gebogen werden darf, um innerhalb der festgelegten Leistungsgrenzen noch voll einsatzfähig zu bleiben

3.12

FBG-Dehnungsbereich

Fähigkeit eines FBG-Dehnungssensors unter Zugspannung zu deformieren und innerhalb der festgelegten Leistungsgrenzen noch voll einsatzfähig zu bleiben

Anmerkung 1 zum Begriff: Außerhalb dieses Bereichs darf die festgelegte Leistungsmessung beeinträchtigt, der FBG-Dehnungssensor jedoch physikalisch nicht beschädigt werden.

3.13

Ermüdungsverhalten

Änderungen der Sensoreigenschaften infolge sinusförmiger Lastwechsel bei Referenzumgebungsbedingungen

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

3.14

Temperatureinfluss auf einen FBG-Dehnungssensor

Änderung der Wellenlänge 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 für einen auf FBG basierenden Dehnungssensor verwendet, da die Temperaturempfindlichkeit die Abhängigkeit der Änderung der Wellenlänge des FBG von der Temperatur beschreibt, falls es als Temperatursensor verwendet wird.

3.15

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.

3.16

Polarisation

tritt auf, wenn Querbelastrung 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: Polarisation 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: Polarisation 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_{FBG}	Intensität des FBG;
I_{ref}	Intensität der Referenzfaser;
k	Dehnungsempfindlichkeit, 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;
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;
T_{FBG}	Transmissionswert für das FBG;
T_{ref}	Transmissionswert der Referenzfaser;
T_{loss}	Übertragungsverlust im Übertragungsspektrum;
$\bar{x}$	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 festgelegte Dehnungsbeanspruchung ϵ ;

— Entwurf —

ε	Dehnungsbeanspruchung (hier immer in der Richtung der Faserachse betrachtet);
ε_a	am Prüfling angelegte Dehnungsbeanspruchung;
$\varepsilon_{\text{neff}}$	temperaturbedingte Dehnung (Wärmeleistung);
ε_{OF}	Biegespannung an der Oberfläche des Messobjekts
ε_{OSS}	mit dem FBG-Dehnungssensor gemessene Dehnungsbeanspruchung (für gebogene Messobjekte);
ε_p	Dehnungsbeanspruchung auf der Oberfläche eines Biegeelements;
$\varepsilon_{p'}$	mit einem angebrachten Sensor endlicher Dicke gemessene Dehnungsbeanspruchung eines Biegeelements;
ε_s	scheinbare Dehnungsbeanspruchung;
Λ_0	Referenzwellenlänge;
Λ_B	Bragg-Wellenlänge;
Λ	Änderungsperiode der Brechzahl des Faser-Bragg-Gitters;
ξ	thermooptischer Koeffizient;
φ	logarithmische Dehnung.

5 Allgemeines

5.1 Faser-Bragg-Gitter (FBG)

Fibre-Bragg-Gitter sind in Lichtwellenleiter eingeschriebene optische Interferenzfilter. 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 fehlt genau diese Wellenlänge (bezeichnet als Bragg-Wellenlänge λ_B).

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 der optischen Faser und der Gitterkonstante ab. Die Spektralbreite der Bragg-Wellenlängenspitze wird im Wesentlichen durch die Anzahl der Gitterperioden und die Modulation der Brechzahl bestimmt.

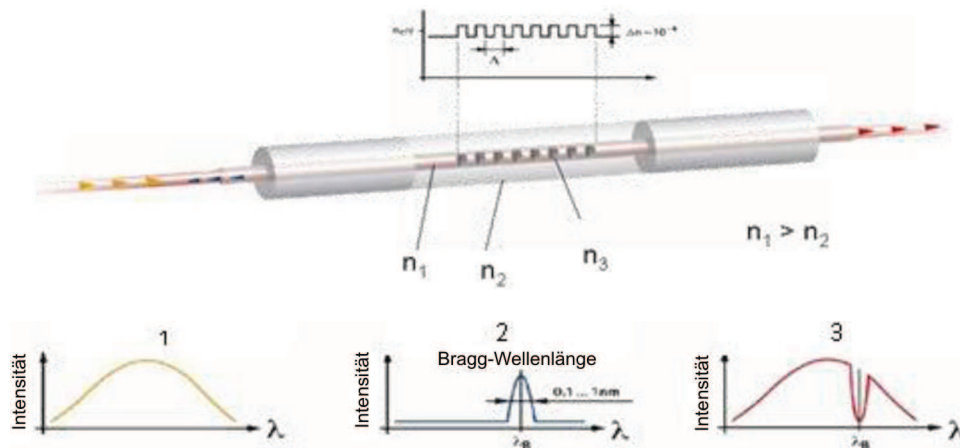
Gemäß Gleichung (1) ist das FBG gegenüber Veränderungen der Gitterkonstante und der Brechzahl empfindlich, die im Wesentlichen durch Änderungen der Dehnungsbeanspruchung und Temperatur beeinflusst werden. Die Bragg-Wellenlänge λ_B ändert sich (wird "verschoben") mit den Änderungen des Abstands Λ in der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

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

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

dabei ist

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



ANMERKUNG 1 – einfallendes Licht, 2 – reflektiertes Licht, 3 – übertragenes Licht

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 7.10 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

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

Der Ausdruck $(1 - p_\varepsilon)$ beschreibt die Dehnungsempfindlichkeit, die auch als Dehnungsfaktor k bezeichnet wird (siehe 3.10 und 7.5). Üblicherweise hat der Dehnungsfaktor k einen Wert von $k = 0,78$.

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 7.10) zu trennen.

Da jedes Bragg-Gitter, das als Sensor in einer Faser integriert ist, eine eigene Bragg-Wellenlänge besitzt, 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).

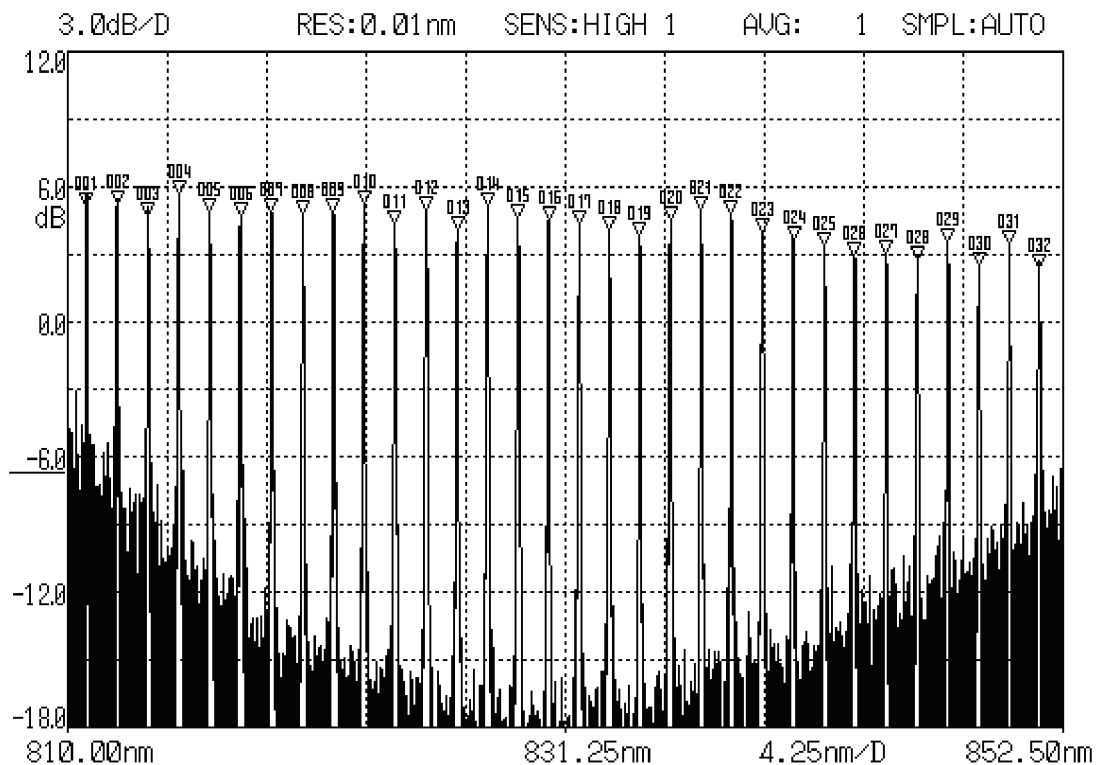
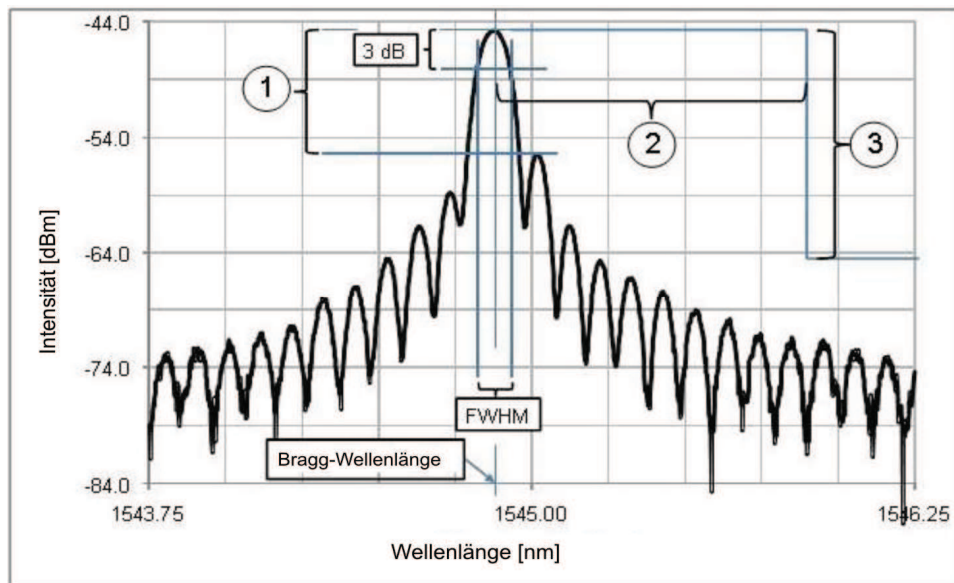


Bild 3 – Reflexionsspektrum eines FBG-Arrays



ANMERKUNG (1) – Intensitätsunterschied zwischen Bragg-Spitze und größtem Seitenkeulenpegel (SLS-Seitenkeulenunterdrückung); (3) – Signal-Rausch-Verhältnis SNR (2) eines aufgezeichneten spektralen Abstands von dem höchsten Wert einer oder beider Seiten der Bragg-Wellenlänge.

Bild 4 – Merkmale des Reflexionsspektrums des Bragg-Gitters

Um ein FBG bewerten zu können, müssen grundsätzlich die folgenden Parameter gemessen und angegeben werden (siehe Bild 4):

- Länge des FBG;
- Bragg-Wellenlänge in [nm] (siehe 3.3 und 7.2);
- Reflexionsgrad in [%] (siehe 3.4 und 7.4);
- Spektralbreite (FWHM) in [nm] (siehe 3.5 und 7.3);
- relativer Seitenkeulenpegel in [dB] (siehe 3.7)

Weitere Merkmale sind auf Verlangen des Kunden anzugeben:

- Fasertyp nach IEC 60793-2;
- Parameter des Mantelwerkstoffs;
- Betriebstemperaturbereich (siehe 7.9);
- Stabilität bei umgebungsbedingten Einflüssen;
- Art des Beschichtungsverfahrens (beschichtet während des Ziehverfahrens / Wiederbeschichtung / umhüllt mit Sekundärbeschichtung);
- Signal-Rausch-Verhältnis in [dB] (siehe 3.9)
- durch die Polarisierung verursachte Unsicherheit bei der Messung der Bragg-Wellenlänge [pm];
- durch die Polarisierung verursachte Unsicherheit bei der Messung der FBG-Reflexion [%];
- durch die Polarisierung verursachte Unsicherheit bei der Messung der Spektralbreite [pm].

5.2 FBG-Dehnungssensor

Der FBG-Dehnungssensor kann verschiedene Bauformen annehmen:

- als eine Faser mit einem oder mehreren FBG (im folgenden als Bragg-Gitter-Faser bezeichnet); mehrere hintereinander angeordnete FBG werden auch als FBG Array bezeichnet;
- als ein FBG-Dehnungsaufnehmer, bei dem die Verbindungsfasern des FBG-Elements auf dem Messobjekt an zwei Punkten in einem definierten Abstand mit Hilfe von mechanischen Bauteilen angebracht sind; eine typische Ausführung ist ein Extensometer;
- als ein FBG-Dehnungsmessstreifen, 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 oder formschlüssig mit einem Träger verbunden.

ANMERKUNG Der FBG-Dehnungsmessstreifen wird im Allgemeinen 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. Der Messpunkt wird durch die formschlüssige Klebefläche des FBG-Dehnungssensors bestimmt.

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) 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.

Bei Bragg-Gitter-Fasern ist die Messlänge von der Anwendung abhängig. Sofern ein Anwender eine vorbestimmte Messlänge erhalten will, muss er sehr vorsichtig auswählen wie der Sensor befestigt/angebracht/ eingebettet sein soll. Bei durchgehend befestigten Sensoren muss die Befestigungslänge die festgelegte Messlänge um einige zehn Faserdurchmesser überragen, um Shear-Lag-Probleme an den Rändern zu vermeiden. Im speziellen Fall eines Bruches oder Rissen innerhalb der Messlänge des Prüflings wird die endgültige Messlänge von der Messlänge an der Bruchstelle ab berechnet, indem der elastische Teil der Ausdehnung von letzterer subtrahiert wird.

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.

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 Null-Punkt-Messung nach der Installation des FBG-Dehnungssensors als Referenzwellenlänge λ_0 gewertet.

Die Referenzwellenlänge muss nicht notwendigerweise gleich der 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.

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 konstanten Dehnungsbeanspruchung 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 der 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. Die Driftfehler des FBG-Dehnungssensors ist nach dem Stand der Technik vernachlässigbar klein; daher sind für den Zweck dieser Norm keine weiteren Angaben erforderlich.

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 oder wenn das Spektrum eine Struktur aufweist, die nicht weiter auszuwerten ist. Die Spezifikation des FBG gilt für den Auslieferungszustand des FBG-Dehnungssensors.

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 optischen 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) 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
bei Dehnungsaufnahmen oder beschichteten Sensorfasern müssen die Auswirkungen des Kriechens berücksichtigt werden.

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 Charge ist eine Gruppe von FBG-Dehnungssensoren, die im selben Herstellungsprozess angefertigt worden sind (Herstellungscharge). Alle eingesetzten Materialien müssen aus der gleichen Herstellungscharge genommen werden.

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

5.13 FBG-Dehnungssensormodell

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 Materialien 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.

6.3 Temperatur- und Feuchtebereich

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

6.4 Empfohlene Art der Anbringung

Vom Hersteller ist eine Empfehlung zur Art der Anbringung einschließlich der entsprechenden Materialien zu geben (z. B. Klebstoff).

6.5 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 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 Herstellungsladung entstammen. Eine aussagefähige Anzahl von Proben, mindestens fünf, müssen ausgewählt werden. Das Ergebnis einer Prüfung mit zufälliger Probenahme gilt für die gesamte Herstellungsladung.

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 Herstellungsladungen 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.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (13)$$

Die Standardabweichung (des Einzelwerts) ergibt sich durch

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (14)$$

7.1.7 Aufbereitung des Prüflings

Die für die Prüfung ausgewählten Sensoren müssen unmittelbar vor Beginn den Prüfungen über einen Zeitraum von mindestens dem Zehnfachen der Zeitkonstante des Sensors in Standardumgebungsbedingungen (Temperatur $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$, relative Luftfeuchte $(50 \pm 5)\%$) gelagert werden. Der anzuwendende Klebstoff wird durch den Hersteller empfohlen. Die Richtlinien des Herstellers zur Art der Anbringung müssen eingehalten werden.

7.1.8 Umgebungsprüfbedingungen

Alle Prüfungen sind bei Standardumgebungsbedingungen durchzuführen (Temperatur $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$, relative Luftfeuchte $(50 \pm 5)\%$), sofern nicht anders angegeben. Bei Prüfungen, die nicht unter Standardbedingungen durchgeführt werden, sind die Prüfbedingungen und die Toleranzwerte für die Messung der Temperatur und der relativen Feuchte anzugeben.

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
Betriebstemperaturbereich	Serienprüfung
Bragg-Wellenlänge	einzelne Stichprobenprüfung
Spektralbreite	Serienprüfung
Reflexionsgrad	Typprüfung
Dehnungsempfindlichkeit (Dehnungsfaktor)	zufällige Probenahme
maximaler Dehnungsbereich bei Raumtemperatur	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];
- Reflexionsgrad in [%];
- relativer Seitenkeulenpegel bei $\pm 0,4$ nm in [dB];
- Signal-Rausch-Verhältnis in [dB];
- $\Lambda+0$, $\Lambda-0$ (die ersten Pole (Kleinstwerte) der Bragg-Gitter-Reflexionsspitzen);
- durch die Polarisation verursachte Unsicherheit bei der Messung der Bragg (Spitzen)-Wellenlänge;

— Entwurf —

- durch die Polarisation verursachte Unsicherheit bei der Messung der Spektralbreite;
- durch die Polarisation verursachte Unsicherheit bei der Messung der Reflexion.

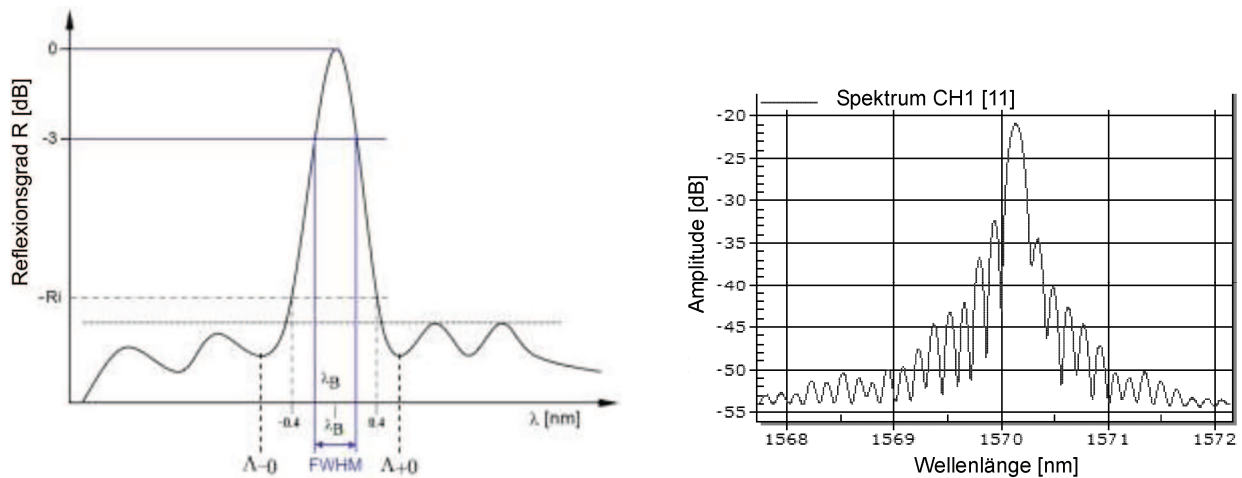


Bild 5 – Reflexionsspektrum eines FBG [berechnetes (links) und gemessenes Spektrum (rechts)]

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.

7.2.2 Messverfahren

Für FBG mit einem geringeren Reflexionsgrad ($R_{\text{FBG}} < 90\%$) muss die Bragg-Wellenlänge der Reflexion gemessen werden. Für FBG mit einem höheren Reflexionsgrad ($R_{\text{FBG}} > 50\%$) 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.

Die Bragg-Wellenlänge wird aus dem Reflexionsspitzenwert oder dem niedrigsten Übertragungsspektrum ermittelt. Im Fall einer symmetrischen Bragg-Wellenlängenspitze muss die Bragg-Wellenlänge ersatzweise als das arithmetische Mittel berechnet werden, z. B. zwischen den beiden Fallpunkten bei 3 dB (siehe Bild 5).

Alle Messungen müssen bei ungebogenem FBG-Dehnungssensor durchgeführt werden. Die Bragg-Wellenlänge des FBG muss bei ausreichender spektraler Auflösung gemessen werden. 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

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, müssen bei Dehnungsmessungen berücksichtigt werden. Änderungen der Spektralbreite können auftreten, wenn FBG-Dehnungsmessstreifen verwendet werden oder Bragg-Gitter-Fasern form- und kraftschlüssig angebracht 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 5.7.2).

7.3.2 Auswertung

Das gemessene FBG-Spektrum ist nach den Festlegungen auszuwerten (siehe 3.5 und die Bilder 4 und 5). 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 3.4 und Bild 5).

7.4.3 Berichterstattung

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

7.5 Dehnungsempfindlichkeit (Dehnungsfaktor k)

7.5.1 Allgemeines

Zur Bestimmung der Dehnungsempfindlichkeit der eingesetzten Dehnungssensoren werden üblicherweise die Vier-Punkt-Biegeprüfung und die Zugbeanspruchungsprüfung angewandt. Beide Verfahren können je nach Einsetzbarkeit der Prüfeinrichtung angewandt werden. Bei der Wahl des Prüfverfahrens sind besondere Anforderungen an das Material, auf dem der Sensor installiert ist, zu berücksichtigen.

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

7.5.2 Biegeeinrichtung

Zur Messung des Dehnungsfaktors k 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 aufgebrachten 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.

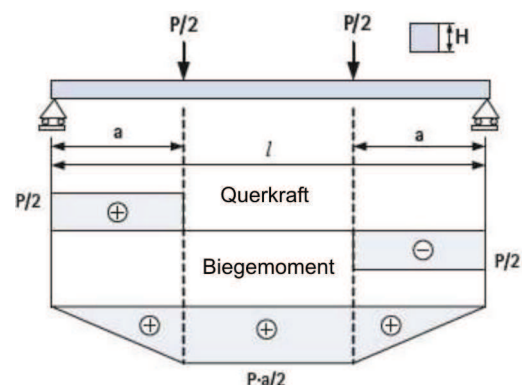


Bild 6 – Prüfaufbau (links) für die Vier-Punkt-Biegeprüfung mit Darstellung der Querkraft- und Biegemomentwirkung (rechts)

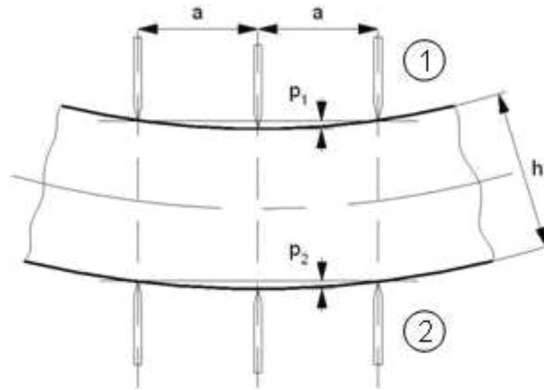
Die Biegung muss durch gesteuerte Verschiebung und darf nicht durch Gewichte erzeugt werden, um Kriecheffekte des Biegebalkens zu vermeiden. Die Vorrichtung zum Aufbringen der Kraft (Bild 6) muss starr genug sein; mit geeigneten Mitteln, muss verhindert werden, dass so wenig wie möglich Torsion im Biegebalken erzeugt wird.

Die am zu prüfenden Sensor angelegte Dehnungsbeanspruchung ε_a muss im Dehnungsbereich zwischen $-1\,000\ \mu\text{m/m}$ und $+1\,000\ \mu\text{m/m}$ erfolgen, wobei eine Abweichung von $\pm 100\ \mu\text{m/m}$ 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 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 6).



ANMERKUNG 1 – Oberfläche unter Druck; 2 – Oberfläche in Spannung

Bild 7 – Bestimmung der Dehnungsbeanspruchung über Wegmessung

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

$$\varepsilon_p = \frac{h}{\frac{a^2}{p_1} + p_1 + h} \quad (17a)$$

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

$$\varepsilon_p = \frac{h}{\frac{a^2}{p_2} + p_2 - h} \quad (17b)$$

Der Abstand des Sensors von der Oberfläche des Biegebalkens ist zu korrigieren.

Die korrigierte Dehnungsbeanspruchung ε_p' am Biegebalken ist gegeben durch:

$$\varepsilon_p' = \frac{0,5 \cdot h}{0,5 \cdot h + s} \cdot \varepsilon_{ODS} \quad (18)$$