

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Fibre optic sensors –

Part 2-1: Temperature measurement – Temperature sensors based on fibre Bragg gratings

Capteurs fibroniques –

Partie 2-1: Mesure de la température – Capteurs de température basés sur des réseaux de Bragg à fibres

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61757-2-1:2021



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2021 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigendum or an amendment might have been published.

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee, ...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and once a month by email.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: sales@iec.ch.

IEC online collection - oc.iec.ch

Discover our powerful search engine and read freely all the publications previews. With a subscription you will always have access to up to date content tailored to your needs.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 000 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 18 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études, ...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et une fois par mois par email.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: sales@iec.ch.

IEC online collection - oc.iec.ch

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 000 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Fibre optic sensors –

Part 2-1: Temperature measurement – Temperature sensors based on fibre Bragg gratings

Capteurs fibroniques –

Partie 2-1: Mesure de la température – Capteurs de température basés sur des réseaux de Bragg à fibres

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 33.180.99

ISBN 978-2-8322-1009-5

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Terms, definitions, abbreviated terms and symbols of quantities.....	7
3.1 Terms and definitions.....	8
3.2 Abbreviated terms.....	11
3.3 Symbols of quantities.....	12
4 Design and characteristics of an FBG temperature sensor.....	13
4.1 Fibre Bragg grating (FBG).....	13
4.2 Dependence of Bragg wavelength on temperature	13
4.3 Design features.....	14
5 Performance parameters	14
6 Test apparatuses for performance parameter determination	15
6.1 Temperature calibration equipment.....	15
6.2 Optical spectrum analyzer and interrogator	16
6.3 Broadband light source	16
7 Test procedures of performance parameters.....	16
7.1 Sample preparation and test set-up	16
7.2 Bragg wavelength λ_{Bref}	17
7.2.1 Measuring procedure	17
7.2.2 Evaluation	18
7.2.3 Reporting.....	18
7.3 FBG peak spectral width.....	18
7.3.1 Measuring procedure.....	18
7.3.2 Evaluation	18
7.3.3 Reporting.....	18
7.4 FBG reflectivity.....	18
7.4.1 Measuring procedure.....	18
7.4.2 Evaluation	18
7.4.3 Reporting.....	19
7.5 Side-lobe suppression ratio.....	19
7.5.1 Measuring procedure.....	19
7.5.2 Evaluation	20
7.5.3 Reporting.....	20
7.6 Signal-to-noise ratio.....	21
7.6.1 Measuring procedure.....	21
7.6.2 Evaluation	21
7.6.3 Reporting.....	21
7.7 Characteristic curve.....	22
7.7.1 Measuring procedure.....	22
7.7.2 Evaluation	23
7.7.3 Reporting.....	27
7.8 Thermal time constant.....	28
7.8.1 Measuring procedure.....	28
7.8.2 Evaluation	28

7.8.3	Reporting.....	28
7.9	Sensor stability	29
7.9.1	Measuring procedure	29
7.9.2	Evaluation	29
7.9.3	Reporting.....	29
Annex A (informative)	Blank detail specification	30
A.1	General.....	30
A.2	Mechanical and optical set-up.....	30
A.3	Operational characteristics	30
A.4	Limiting parameters	31
A.5	Further information given upon request.....	31
Annex B (informative)	Examples of specific temperature calibration equipment.....	32
B.1	Simple liquid bath	32
B.2	Liquid tube-thermostat	33
B.3	Solid-state calibration equipment	34
Annex C (informative)	Contributions to measurement uncertainty	37
Bibliography		38
Figure 1	– Principal test set-up for FBG	17
Figure 2	– Determination of the FBG reflectivity from the reflection spectrum (left) and transmission spectrum (right).....	19
Figure 3	– Side-lobes in the case of a single FBG temperature sensor.....	20
Figure 4	– Signal-to-noise ratio determination	21
Figure 5	– Example of a polynomial fit of calibration points $\lambda_{B,i}(T_{N,i})$	24
Figure 6	– Example of a third-order polynomial fit	25
Figure 7	– Example of a fourth-order polynomial fit	26
Figure 8	– Example of a polynomial fit of the sensitivity	27
Figure 9	– Typical response time curve.....	28
Figure B.1	– Schematic representation of a simple liquid bath [3]	32
Figure B.2	– Schematic representation of liquid calibration device for connection to laboratory liquid thermostats [4]	33
Figure B.3	– Schematic representation of a long-tube fluid calibration device [3]	34
Figure B.4	– Schematic representation of a solid-state calibration device for higher temperatures [4]	35
Figure B.5	– Schematic representation of a dry-block calibrator for calibrating an FBG temperature sensor at higher temperatures.....	36
Table 1	– Calibration bath fluids.....	15

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

FIBRE OPTIC SENSORS –

**Part 2-1: Temperature measurement –
Temperature sensors based on fibre Bragg gratings**

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

IEC 61757-2-1 has been prepared by subcommittee 86C: Fibre optic systems and active devices, of IEC technical committee 86: Fibre optics. It is an International Standard.

The text of this International Standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
86C/1725/FDIS	86C/1737/RVD

Full information on the voting for its approval can be found in the report on voting indicated in the above table.

The language used for the development of this International Standard is English.

This document was drafted in accordance with ISO/IEC Directives, Part 2, and developed in accordance with ISO/IEC Directives, Part 1 and ISO/IEC Directives, IEC Supplement, available at www.iec.ch/members_experts/refdocs. The main document types developed by IEC are described in greater detail at www.iec.ch/standardsdev/publications.

A list of all parts in the IEC 61757 series, published under the general title *Fibre optic sensors*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under webstore.iec.ch in the data related to the specific document. At this date, the document will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61757-2-1:2021

INTRODUCTION

This document is based on the guideline VDI/VDE 2660 Blatt 2:2020-04, *Technical temperature measurement – Optical temperature sensor based on fibre Bragg gratings – Recommendation on temperature measurement and statement of measurement uncertainty* [1]¹. It was prepared in cooperation with VDI/VDE-GMA Technical Committee 2.17 "Fibre optic measurement techniques".

The IEC 61757 series is published with the following logic: the sub-parts are numbered as IEC 61757-M-T, where M denotes the measure and T, the technology.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61757-2-1:2021

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

FIBRE OPTIC SENSORS –

Part 2-1: Temperature measurement – Temperature sensors based on fibre Bragg gratings

1 Scope

This part of IEC 61757 specifies the terminology, characteristic performance parameters and related test methods of optical temperature sensors based on fibre Bragg gratings (FBG) that carry out temperature measurements in the temperature range between $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $600\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Generic specifications for fibre optic sensors are defined in IEC 61757.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60050 (all parts), *International Electrotechnical Vocabulary (IEV)* (available at www.electropedia.org)

IEC 61757, *Fibre optic sensors – Generic specification*

IEC 61757-1-1:2020, *Fibre optic sensors – Part 1-1: Strain measurement – Strain sensors based on fibre Bragg gratings*

ISO/IEC GUIDE 98-3, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

3 Terms, definitions, abbreviated terms and symbols of quantities

For the purposes of this document, terms and definitions given in IEC 60050 (all parts), IEC 61757, IEC 61757-1-1, and the following apply.

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

3.1 Terms and definitions

3.1.1

Bragg wavelength under reference conditions

λ_{Bref}

wavelength of maximal reflectance or minimal transmittance of a mechanically stress-free fibre Bragg grating at reference or standard temperature conditions, without the effect of a temperature change

Note 1 to entry: The term Bragg wavelength λ_B specified in the data sheet of the manufacturer of a fibre Bragg grating normally describes the Bragg wavelength without further details on reference or standard temperature conditions.

[SOURCE: IEC 61757-1-1:2020, 3.3, modified – transformed to temperature sensing.]

3.1.2

birefringence

optical property of the directional dependence of the index of refraction of an optically anisotropic material having orientation-dependent refractive indices that lead to different propagation velocities of light in different propagation and polarization directions

Note 1 to entry: In fibre optic sensors terminology, the term "birefringence" is mainly applied when optical waveguides with birefringence properties, such as PANDA or bow-tie fibres, are used. Birefringence in fibre Bragg gratings becomes important only when polarized light is used for the measurement. Because of the properties of fibre Bragg gratings, this can lead to an additional systematic increase in the measurement uncertainty.

[SOURCE: IEC 61757-1-1:2020, 3.22, modified – clarified and Note modified.]

3.1.3

drift

shift of the characteristic curve (or, rarely, change of the characteristic curve parameters) under the same measuring and operating conditions or reference conditions due to material ageing or/and mechanical and/or thermal continuous or alternating stress

3.1.4

dynamic measurement deviation

$\Delta T(t)$

time-dependent thermal measurement deviation resulting from time-varying differences between the sensor temperature $T_S(t)$ and the temperature of the medium $T_M(t)$ with

$$\Delta T(t) = T_S(t) - T_M(t) \quad (1)$$

3.1.5

FBG peak

reflection peak or transmission minimum in the Bragg grating reflectance or transmittance spectrum

Note 1 to entry: Maximum peak value is typically at the Bragg wavelength λ_B .

3.1.6

FBG peak spectral width

full width at half maximum (FWHM) of the FBG peak

Note 1 to entry: Full width at half maximum of the FBG peak is the wavelength range of the spectrum for which the amplitude is greater than 50 % (3 dB).

[SOURCE: IEC 61757-1-1:2020, 3.7, modified – transformed for temperature sensor.]

3.1.7**FBG period** Λ

distance between the periodically changing refractive index zones (grating planes) in an optical waveguide having an effective refractive index n_{eff}

Note 1 to entry: The FBG period defines the Bragg wavelength λ_B through the formula

$$\Lambda = \frac{k \cdot \lambda_B}{2 n_{\text{eff}}} \quad \text{for } k = \text{positive integer} \quad (2)$$

[SOURCE: IEC 61757-1-1:2020, 3.18, modified – definition extended.]

3.1.8**FBG temperature sensor**

fibre optic sensor that uses a fibre Bragg grating as a sensitive element for temperature measurements

Note 1 to entry: FBG temperature sensors can be used in a series configuration with multiple gratings allowing to perform distributed measurements.

3.1.9**FBG temperature sensing system**

measurement set-up consisting of one or more serial arranged FBG temperature sensors connected to an interrogation unit consisting of a light source, detector module, processor, data archive, and user interface

Note 1 to entry: An FBG temperature sensing system normally works as follows: After light from the light source is sent into the fibre and partially reflected or transmitted by the FBG temperature sensor, it is guided to the detector module of the interrogator, which determines the FBG peak wavelength. From a shift of the FBG peak wavelength caused by temperature change, the temperature change can be quantitatively determined in the measuring units.

3.1.10**maximum operating temperature**

highest value of temperature at which the FBG temperature sensor meets the specified performance

3.1.11**minimum operating temperature**

lowest value of temperature at which the FBG temperature sensor meets the specified performance

3.1.12**minimum bending radius**

minimum radius at which an FBG temperature sensor is bent without change of the specified performance parameters

Note 1 to entry: This value can differ from the minimum bending radius given for transport and storage.

[SOURCE: IEC 61757-1-1:2020, 3.16, modified – transformed for temperature sensor.]

3.1.13**parasitic strain effect**

non-thermally induced deformation of the fibre Bragg grating during temperature measurement resulting in a change in the wavelength response of the FBG

Note 1 to entry: A non-reversible deformation of the FBG during temperature measurement occurs as an apparent temperature change in the response signal and shall therefore be excluded or be assessable.

3.1.14 reference wavelength

λ_{ref}

wavelength response of a fibre Bragg grating to which a specific temperature T_{ref} value is referred

Note 1 to entry: Depending on the evaluation method, the interrogator devices of the sensor often emit different wavelengths to determine the filter function of the Bragg grating. The reference wavelength is not necessarily equal to the Bragg wavelength λ_B . However, because of the small difference between the reference wavelength and Bragg wavelength, both wavelengths can be used in Formulae (6) to (8) and in Formulae (16) to (20) without relevant errors occurring.

[SOURCE: IEC 61757-1-1:2020, 3.4, modified – transformed to temperature sensing]

3.1.15 reference wavelength at reference temperature

$\lambda_{T_{\text{ref}}}$

Bragg wavelength of the fibre Bragg grating for a specified reference temperature T_{ref} not equal to 0 °C

3.1.16 reference wavelength at 0 °C

$\lambda_{T_{\text{ref}},0}$

Bragg wavelength of the fibre Bragg grating at reference temperature $T_0 = 0$ °C

3.1.17 response time

t_R

time after which the difference between the sensor temperature $T_S(t)$ and the temperature of the medium T_M is smaller than a meaningful defined fraction δ of the initial temperature difference $T_S(0) - T_M$, as described by Formula (3)

$$T_S(t_R) - T_M = \delta [T_S(0) - T_M] \quad (3)$$

3.1.18 sensitive area

<of an FBG temperature sensor> length of the fibre Bragg grating that is sensitive to the temperature to be measured and thereby changes the wavelength response of the fibre Bragg grating

3.1.19 side-lobe suppression ratio

R_{SLS}

ratio of the intensity of the FBG peak to the nearest largest side-lobe

Note 1 to entry: It is expressed in dB.

3.1.20 sensor stability

ability of the FBG temperature sensor to keep its performance characteristics under specified limits within a specified time interval, all other conditions being the same

3.1.21 static thermal measurement deviation

ΔT_{th}

time-invariant temperature difference in the steady state between the sensor temperature $T_S(t)$ and the temperature of the medium T_M

$$\Delta T_{\text{th}} = T_{\text{S}}(t) - T_{\text{M}} \text{ for } t \rightarrow \infty \quad (4)$$

3.1.22

temperature sensitivity

$S(T)$

ratio of the wavelength change $\Delta\lambda_{\text{T}}$ of an FBG temperature sensor caused by a temperature change ΔT in steady state, which is the temperature-dependent slope of the characteristic curve $\lambda_{\text{T}}(T)$ expressed in nm/K

$$S(T) = \frac{\Delta\lambda_{\text{T}}}{\Delta T} \quad (5)$$

Note 1 to entry: The unit can also be pm/K.

3.1.23

operating temperature range

interval for which the FBG temperature sensor under specified conditions is able to perform temperature measurements in accordance with the specified performance

3.1.24

thermal time constant

τ

t_{63}

time it takes an FBG temperature sensor to reach 63,2 % of the total difference between the initial and the final medium or body temperature when subjected to a step-like change in temperature under defined conditions

Note 1 to entry: In many industrial applications, the thermal time constant is also provided for 50 % of the total temperature difference and for 90 % of the total temperature difference, so as to characterize the dynamic behaviour of the temperature sensor. The dynamic response of some surface temperature sensors, such as jacketed thermocouples with a measuring point at the temperature sensor bottom and similar approaches, does not follow an exponential function but is rather characterized by an initial rapid rise in temperature and a subsequent slow creep to the final value. For these temperature sensors, the thermal time constant is also specified for 95 % and 99 % of the total temperature difference.

3.1.25

thermal measurement deviation

time-dependent difference between the sensor temperature $T_{\text{S}}(t)$ and the temperature of origin to be measured, of the measuring medium or body $T_{\text{M}}(t)$

Note 1 to entry: For $t \rightarrow \infty$, the thermal measurement deviation is equal to static thermal measurement deviation.

3.2 Abbreviated terms

ASE	amplified spontaneous emission
FBG	fibre Bragg grating
ITS-90	international temperature scale of 1990
OSA	optical spectrum analyzer

3.3 Symbols of quantities

k	number of order (mathematical description)
ΔL	length change of the Bragg grating due to external load in the fibre direction
n	index of refraction
n_{eff}	effective index of refraction (of the Bragg grating)
P_0	incident optical power
P_{SL}	optical power of the nearest side-lobe
P_{λ_B}	optical power of the FBG at λ_B
R_{FBG}	FBG reflectivity
R_{SLS}	side-lobe suppression ratio expressed in dB
SNR_{FBG}	FBG signal-to-noise ratio
$S(T)$	temperature sensitivity in nm/K
T	temperature in °C
T_0	reference temperature for $T = 0$ °C, at which the FBG has the reference wavelength λ_0 in °C
T_B	reference temperature (freely selectable) in °C
T_M	actual temperature of the medium/measuring object to be measured in °C
T_N	actual temperature provided by the standard thermometer
T_{ref}	defined reference temperature at which the FBG has the reference wavelength λ_{ref} in °C
T_s	output signal of the temperature sensor (measured temperature) in °C
$T_s(0)$	output signal of the temperature sensor at an abrupt change of the temperature of the measuring body or medium in °C
ΔT_{th}	static thermal measurement deviation in K
x_i	i -th measured value
α	coefficient of thermal expansion in 1/K
δ	part of the initial temperature difference, which has appropriately to be determined according to the uncertainty of measurement in K
σ	mechanical stress
ε	strain applied to the temperature sensor (always considered in the direction of the fibre axis)
p_ε	effective photo-elastic (stress-optical) constant
λ_0	reference wavelength for $T = 0$ °C in m
λ_B	Bragg wavelength in m
$\lambda_{\text{FBG}0}$	reference wavelength of the FBG of a temperature sensor at $T = 0$ °C in m
λ_{Bref}	Bragg wavelength under reference conditions, mechanically stress-free operated at a specified reference temperature in m
λ_{ref}	reference wavelength in m
$\lambda_{T_{\text{ref}},0}$	Bragg wavelength of the FBG at reference temperature $T_0 = 0$ °C
$\lambda_{T_{\text{ref}}}$	Bragg wavelength of the FBG at reference specified temperature $T_{\text{ref}} \neq 0$ °C
Λ	FBG period
τ, t_{63}	thermal time constant
ξ	thermo-optic coefficient

4 Design and characteristics of an FBG temperature sensor

4.1 Fibre Bragg grating (FBG)

A detailed description of the structure, function, principle characteristics and manufacturing process of an FBG is provided in IEC 61757-1-1.

4.2 Dependence of Bragg wavelength on temperature

As explained in IEC 61757-1-1, the change of the Bragg wavelength caused by a change in the grating temperature can be described by Formula (6).

$$\Delta\lambda_B = 2 \cdot \left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial L} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial L} \right) \cdot \Delta L + 2 \cdot \left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \cdot \Delta T \quad (6)$$

where

$\Delta\lambda_B$ is the Bragg wavelength shift;

T is the temperature;

ΔT is the temperature difference;

n_{eff} is the effective index of refraction (of the Bragg grating);

ΔL is the change of length of the Bragg grating due to external load in fibre direction;

Λ is the FBG period.

The first two terms on the right side of Formula (6) describe the effects resulting from the mechanical deformation ($\partial\Lambda/\partial L$) and the elasto-optical response ($\partial n_{\text{eff}}/\partial L$) of the optical fibre; these effects are to be considered parasitic in temperature measurements. The last two terms in Formula (6) describe the effects of temperature on the quantities n_{eff} and Λ .

The term ($\partial\Lambda/\partial T$) describes the effect of the thermal expansion of the Bragg grating with regard to the grating period Λ . The thermal effect on the refractive index of the optical fibre, on the other hand, is expressed by the term ($\partial n_{\text{eff}}/\partial T$).

In practice, the effects of strain and temperature are approximately described by the linear relationship displayed in Formula (7).

$$\frac{\Delta\lambda_B(\varepsilon, T)}{\lambda_B} = (1 - p_\varepsilon) \cdot \varepsilon + (\alpha + \xi) \cdot \Delta T \quad (7)$$

where

ε is the strain of the fibre in axial direction;

p_ε is the effective photo-elastic (stress-optical) constant;

α is the coefficient of thermal expansion;

ξ is the thermo-optic coefficient.

When a temperature change is applied to a mechanically unstressed FBG, a corresponding shift of the Bragg wavelength is observed in the optical spectrum. In practice, the effect of a temperature change ΔT on the Bragg wavelength can approximately be described by the linear relationship in Formula (8)

$$\frac{\Delta\lambda_B(T)}{\lambda_B} = (\alpha + \xi) \cdot \Delta T \quad (8)$$

where

- $\lambda_B, \Delta\lambda$ are the Bragg wavelength and wavelength shift;
- $T, \Delta T$ are the temperature and temperature difference;
- α is the coefficient of thermal expansion;
- ξ is the thermo-optic coefficient.

4.3 Design features

Fibre Bragg gratings are usually supplied with a so-called primary coating, which protects the sensor against damage or fibre breakage. If the fibre Bragg grating is applied without mechanical stress to the measurement object, the fibre sensor usually includes this primary coating. Since the thickness of the coating is in the range of several tens of micrometres, the heat transfer from the object of measurement to the sensor is not impeded significantly. However, the impact of thermally induced deformations of the temperature sensor caused by the object of measurement shall be considered. The coating can also remain on the sensor fibre in other installations of the FBG sensor. In certain cases, the coating can be removed during the manufacturing process of encapsulated temperature sensors, in order to achieve mechanical decoupling. In these cases, precautions should be taken not to expose the fibre to corrosion, the so-called stress corrosion.

Depending on the measurement application, an FBG is pre-assembled in steel tubes, ceramic tubes or other housings to form the complete FBG temperature sensor. The pre-assembly usually includes gluing, screwing or fastening of the components. It is essential to achieve optimal heat transfer (heat transition, heat conduction) to the temperature-sensing element, which depends on both the mechanical and the thermal coupling.

Depending on the measurement task, the temperature sensor may contain a single FBG or a chain of concatenated FBGs (sensor array). A single sensor arrangement allows local (pointwise) measurement of temperature, whereas a chain of concatenated fibre Bragg gratings (so-called quasi-distributed temperature sensors) allows measurement of temperature profiles or temperatures at different locations on the object of measurement with a single optical fibre sensor.

When several FBG sensors are concatenated with relatively long connecting fibre cables, the transmission losses of the entire FBG temperature sensor shall be considered. When specifying the transmission loss in the FBG temperature sensor, all loss contributions should be determined, including attenuation in the optical fibre and in the FBG outside the FBG spectrum as well as losses in connectors and splices. The signal amplitudes in the FBG transmission spectrum can be reduced by application-specific effects impacting the sensor quality. For example, transmission losses of serially operated wavelength-multiplexed FBG temperature sensors should be considered separately.

5 Performance parameters

A single FBG temperature sensor shall be characterized by the following technical performance parameters. Clause 7 describes the related test procedures to determine the parameters:

- Bragg wavelength λ_{Bref} (7.2)
- FBG peak spectral width (7.3)
- FBG reflectivity (7.4)

- side-lobe suppression ratio (7.5)
- signal-to-noise ratio (7.6)
- characteristic curve (7.7)
- sensitivity (7.7.2)
- hysteresis (7.7.2)
- thermal time constant (7.8)
- response times (on request only) (7.8.2)
- sensor stability (7.9)

These performance parameters and additional technical information are needed for practical applications and shall be provided by the manufacturer when referring to this document. A blank detailed specification template is provided in Annex A.

6 Test apparatuses for performance parameter determination

6.1 Temperature calibration equipment

Suitable temperature calibration equipment shall be used for determining the performance parameters and for calibrating an FBG temperature sensor. The principal options are commercially available stirred liquid baths (up to approximately 550 °C) as well as block calibrators or the specific temperature calibration equipment shown in Annex B. For higher temperatures, tube furnaces are usually employed, whose limited thermal properties can be appreciably improved through the use of so-called compensation bodies (metal inserts) or heat pipes.

A temperature calibration bath is a uniform enclosure with a stirred fluid that can be adjusted to various temperature test points. By using a stirred fluid (e.g. water, silicone oil, methanol, ethanol), baths provide excellent thermal contact, uniformity, and stability for temperature sensor calibration. They offer a large working volume and flexibility for calibrating temperature sensors of different shapes and sizes. Typically, temperature calibration baths are equipped with a reference thermometer for calibration traceability. Depending on the temperature range, the fluids listed in Table 1 should be used for testing and calibration of FBG temperature sensors.

Block calibrators use pre-drilled metal inserts for inserting the temperature sensor to be calibrated. These block calibrators have a removable metal insert with pre-drilled holes where sensors are inserted for measurement. The insert provides a stable temperature source, which can be adjusted to different test points. In order to provide sufficiently good thermal contact between the metal insert and the temperature sensor, inserts with different hole sizes are available. Typically, block calibrators are equipped with a reference thermometer for calibration traceability.

Table 1 – Calibration bath fluids

Temperature range	Medium
–180 °C to –90 °C	Refrigerant R13
–140 °C to 5 °C	Pentane
–110 °C to 5 °C	Alcohol
–90 °C to 10 °C	Methanol
–40 °C to 60 °C	Water/glycol mixture
+5 °C to 95 °C	Water
–30 °C to 300 °C	Silicon or mineral oil

6.2 Optical spectrum analyzer and interrogator

A commercial high resolution optical spectrum analyzer or an optical spectrum analyzer system specifically designed for FBG spectral analysis shall be used to perform comprehensive spectral analysis. The minimum requirements for such a device are:

- spectral resolution ≤ 2 pm for a single FBG under test (≤ 1 pm for a chain of concatenated FBGs under test)
- wavelength deviation $\leq \pm 5$ pm
- dynamic range ≥ 40 dB

If the entire fibre optic temperature measurement system (FBG temperature sensor and interrogator) is to be characterised, the tests should be carried out as far as possible with the interrogator provided.

6.3 Broadband light source

A commercial off-the-shelf high quality amplified spontaneous emission (ASE) light source designed for FBG spectrum analysis shall be used to perform comprehensive spectrum analysis. The minimum requirements for such a device are:

- total output power: $> +3$ dBm (> 2 mW) at 840 nm to 853 nm and $> +10$ dBm (> 10 mW) at 975 nm to 1 050 nm
- spectral power density: > -20 dBm/nm at 840 nm to 853 nm and > -30 dBm/nm at 975 nm to 1 050 nm
- output power stability: $< \pm 0,01$ dB

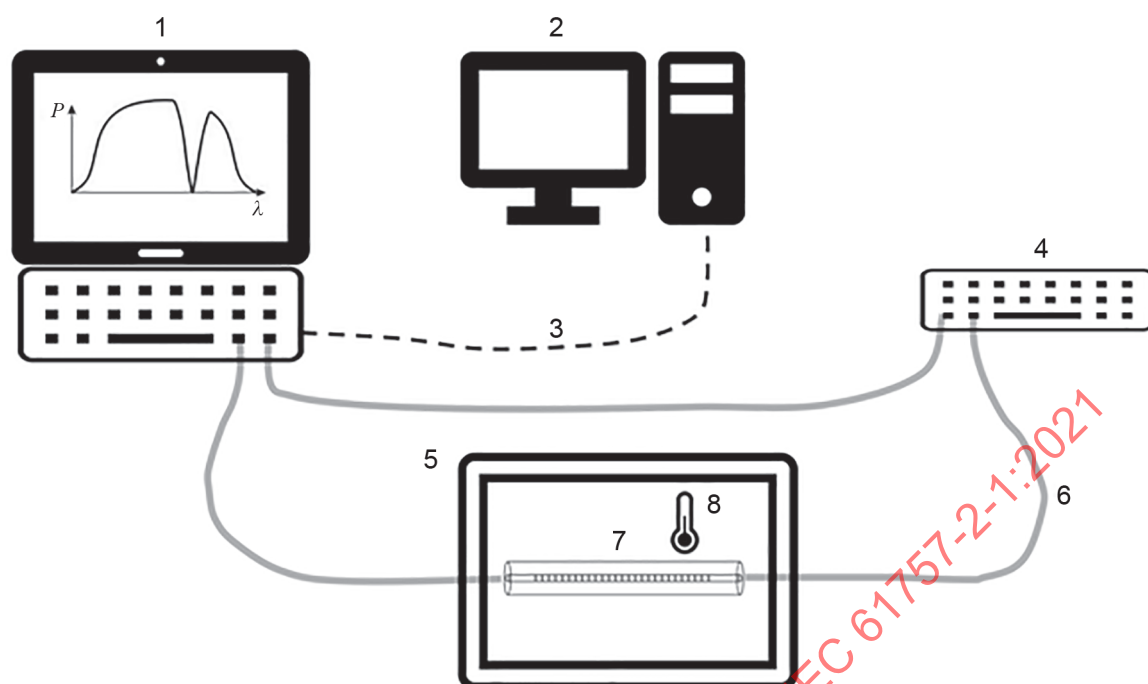
7 Test procedures of performance parameters

7.1 Sample preparation and test set-up

The FBG temperature sensor to be tested shall be stored for at least a pre-determined duration in a standard atmospheric environment of (23 ± 5) °C and (50 ± 10) % RH before the test is started. The pre-determined duration should be decided according to the thermal capacity of the optical fibre sensors to be tested. The sensor shall be installed in the temperature calibration device according to the manufacturer's instructions. Installation of the sensor in the temperature calibration device shall provide homogeneous spatial temperature distribution in the sensor vicinity and high temperature stability over the measurement time. The temperature homogeneity and stability shall be significantly better than the specifications for the sensor under test.

If a temperature sensor that is normally applied to a surface is tested by using the immersion method, then it should be noted that this test determines only the sensor accuracy and not the accuracy of the temperature surface sensor in its specific application. Depending on the requirements for the required uncertainty of the temperature measurement, it shall be decided whether a calibration bath temperature regulated by a suitable temperature control device is sufficient or an additional calibrated reference thermometer of smaller measurement uncertainty is to be used (see also 7.7.1).

Figure 1 shows a schematic diagram of the test set-up that shall be used for all tests.



IEC

Key

- 1 optical spectrum analyzer (OSA)
- 2 computer (optional)
- 3 data interface (optional)
- 4 ASE source with Y coupler
- 5 temperature controlled calibration equipment (see Annex B)
- 6 optical fibre
- 7 FBG temperature sensor under test
- 8 calibrated reference thermometer

Figure 1 – Principal test set-up for FBG**7.2 Bragg wavelength λ_{Bref}** **7.2.1 Measuring procedure**

The FBG spectrum of the FBG temperature sensor shall be measured with sufficient spectral resolution and under reference conditions. The reference condition shall be the temperature at the middle of the operating temperature range that the sensor is designed for. The reference condition shall be established with a temperature calibration device, as described in 6.1. The temperature of the FBG sensor shall be stable (steady state) for the duration of this measurement, unless stated otherwise. Steady-state conditions are considered to be reached when no significant systematic variations in temperature occur.

For FBGs with relatively low reflectivity ($R_{\text{FBG}} < 50\%$), the Bragg wavelength shall be measured in reflection, whereas for FBGs with relatively high reflectivity ($R_{\text{FBG}} > 90\%$), the Bragg wavelength shall be measured in transmission (Figure 1). For highly reflecting FBGs ($R_{\text{FBG}} > 90\%$), it is increasingly more difficult to determine the peak of the Bragg wavelength with sufficient accuracy in the reflected spectrum. In these cases, therefore, the Bragg wavelength shall be determined from the minimum in the transmission spectrum. For intermediate reflectivity values, either configuration can be used.

In cases where the Bragg wavelength is polarization-dependent, special measurements have to be carried out (see IEC 61757-1-1:2020, Annex C).

Alternatively, in case of a symmetrical spectral response, the Bragg wavelength shall be calculated as the arithmetic mean of the two Bragg wavelength peaks, for example as the mean of the two wavelengths corresponding to the 3 dB drop-off points.

7.2.2 Evaluation

The Bragg wavelength shall be determined either by manual evaluation of the measured spectral response or by automatic evaluation using a suitable algorithm for spectral analysis.

7.2.3 Reporting

The following measurement conditions shall be reported:

- reference conditions;
- measurement procedure;
- light source and OSA settings;
- measured or calculated Bragg wavelength.

7.3 FBG peak spectral width

7.3.1 Measuring procedure

The reflection or transmission spectrum of the FBG temperature sensor shall be measured as described in 7.2.1 but at three different reference conditions: at the lower and upper limits and at the middle of the operating temperature range specified for the sensor under test.

7.3.2 Evaluation

The spectral width of the Bragg wavelength peak shall be determined from the measured spectrum according to its definition (see 3.1.6). It shall be determined from a reflection spectrum, whereby the difference of the two wavelength values at the 3 dB drop-off is taken from both sides of the reflection maximum. Alternatively, the transmission spectrum can be used with appropriate spectrum evaluation.

7.3.3 Reporting

The reference conditions, measurement procedure, light source and OSA settings, as well as the three measured spectral widths shall be reported. The spectra used for evaluation should be reported on request.

7.4 FBG reflectivity

7.4.1 Measuring procedure

The reflection spectrum of the FBG temperature sensor shall be measured as described in 7.2.1 but at three different reference conditions: at the lower and upper limits and at the middle of the operating temperature range specified for the sensor under test.

7.4.2 Evaluation

The reflectivity of the FBG at the Bragg wavelength peak shall be determined from the measured spectrum according to its definition (see IEC 61757-1-1:2020, 3.5). It shall be determined from a reflection spectrum (see Figure 2 left) using Formula (9).

$$R_{\text{FBG}} = \frac{P_{\text{FBG}}}{P_0} \cdot 100 \quad \% \quad (9)$$

where

P_0 is the incident optical power at the FBG;

P_{FBG} is the optical power reflected by the FBG at the Bragg wavelength λ_B ;

R_{FBG} is the FBG reflectivity.

Alternatively, the reflectivity of the FBG can be determined from the transmission spectrum (see Figure 2 right) using Formula (10).

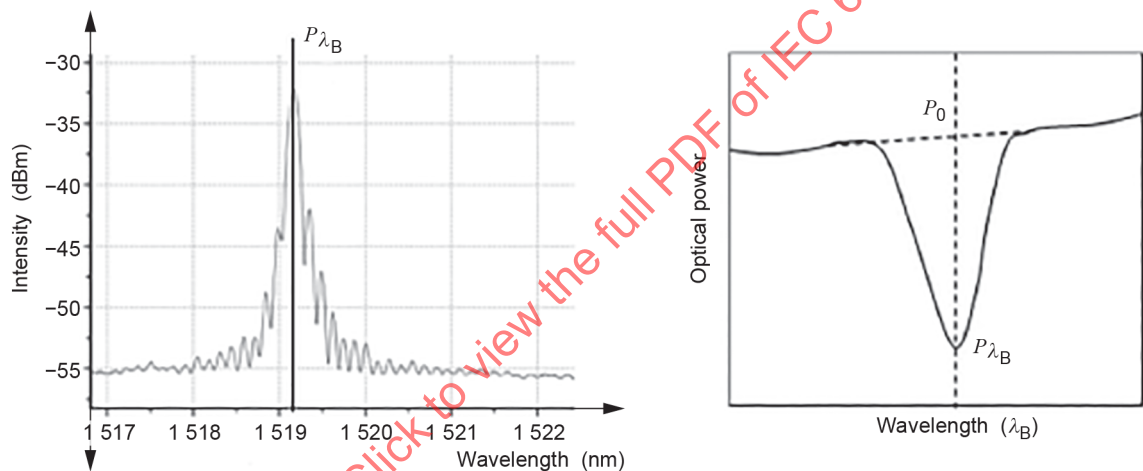
$$R_{\text{FBG}} = \frac{P_0 - P_{\lambda_B}}{P_0} \cdot 100 \% \quad (10)$$

where

P_0 is the incident optical power at the FBG;

P_{λ_B} is the transmitted optical power of the FBG at the Bragg wavelength λ_B ;

R_{FBG} is the FBG reflectivity.



IEC

Figure 2 – Determination of the FBG reflectivity from the reflection spectrum (left) and transmission spectrum (right)

7.4.3 Reporting

The reference conditions, measurement procedure, light source and OSA settings, Bragg wavelengths, as well as the calculated reflectivity values shall be reported. The spectra used for evaluation should be reported on request.

7.5 Side-lobe suppression ratio

7.5.1 Measuring procedure

The reflection spectrum of the FBG temperature sensor shall be measured according to 7.2.1.

7.5.2 Evaluation

The side-lobe suppression ratio shall be determined from the measured reflection spectrum according to its definition (see 3.1.19). Figure 3 shows an example of side-lobes in an FBG reflection spectrum. Side lobes are defined as any feature in the FBG reflection spectrum that

- 1) resides outside of the spectral domain comprised by the fundamental FBG peak,
- 2) exhibits downward concavity, and
- 3) exhibits a two-sided threshold crossing at a certain width level below the local spectral maximum of the side-lobe.

The side-lobe suppression ratio shall be calculated using Formula (11).

$$R_{\text{SLS}} = 10 \log \left(\frac{P_{\lambda_B}}{P_{\text{SL}}} \right) \quad (11)$$

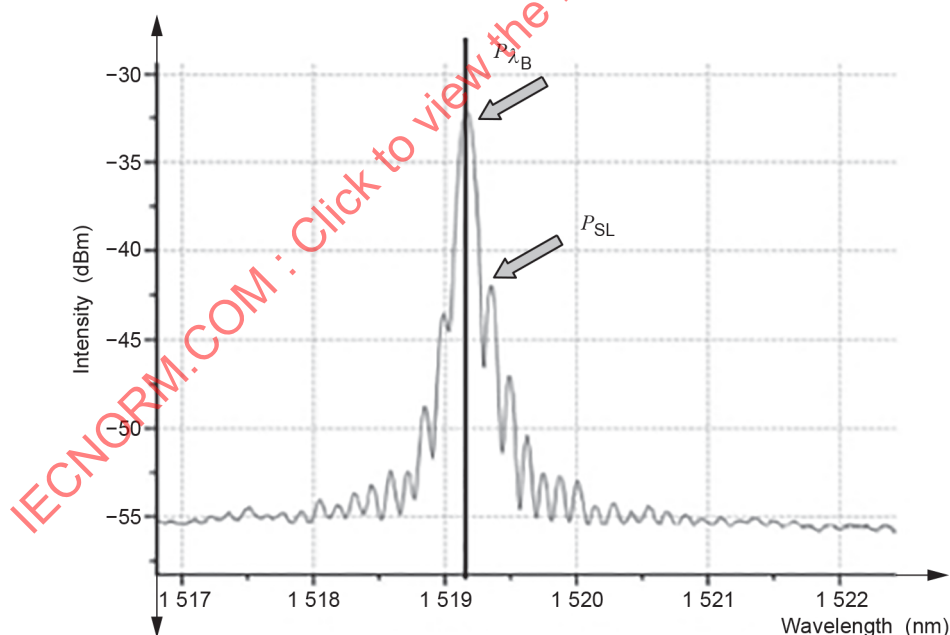
where

P_{SL} is the optical power of the nearest side-lobe;

P_{λ_B} is optical power of the FBG at λ_B ;

R_{SLS} is the side-lobe suppression ratio expressed in dB.

Extended explanations of FBG side-lobes for different use conditions can be found in IEC 61757-1-1:2020, Annex A.



IEC

Figure 3 – Side-lobes in the case of a single FBG temperature sensor

7.5.3 Reporting

The reference conditions, measurement procedure, light source and OSA settings, and the calculated side-lobe suppression ratio shall be reported. The spectrum used for evaluation should be reported on request.

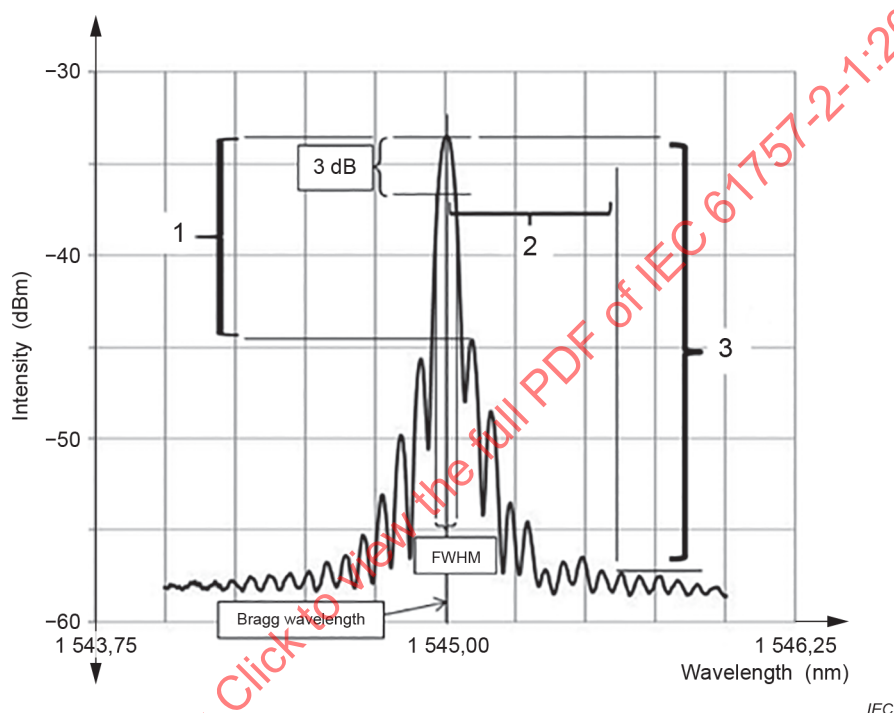
7.6 Signal-to-noise ratio

7.6.1 Measuring procedure

The reflection spectrum of the FBG temperature sensor shall be measured according to 7.2.1.

7.6.2 Evaluation

The signal-to-noise ratio shall be determined from the measured reflection spectrum according to its definition (see IEC 61757-1-1:2020, 3.12). It is determined from the maximum reflected power at the Bragg wavelength peak and the power level of a side-lobe at a wavelength shifted by 1 nm from the Bragg wavelength (see Figure 4). The signal-to-noise ratio is calculated from the ratio of these two power levels.



Key

- (1) side-lobe suppression ratio (see 7.5)
- (2) spectral distance of 1 nm from the maximum value of one or both sides of the Bragg wavelength
- (3) FBG signal-to-noise ratio SNR_{FBG} for (2)

Figure 4 – Signal-to-noise ratio determination

7.6.3 Reporting

The reference conditions, measurement procedure, light source and OSA settings, and the calculated SNR_{FBG} values at $\lambda_B \pm 1$ nm shall be reported. The spectrum used for evaluation should be reported on request.

7.7 Characteristic curve

7.7.1 Measuring procedure

Temperature measurement with an FBG is basically a differential measurement. This means that from a wavelength shift of the Bragg wavelength

$$\Delta\lambda = \lambda_B - \lambda_{\text{ref}} \quad (12)$$

a temperature change

$$\Delta T = T - T_{\text{ref}} \quad (13)$$

is to be derived, where

$$\lambda_B(T_{\text{ref}}) = \lambda_{\text{ref}} \quad (14)$$

is the Bragg wavelength at a given reference temperature T_{ref} . The basic quantities λ_{ref} and the corresponding T_{ref} shall be specified by the manufacturer and confirmed by measurement.

For simpler data interpretation and handling, a normalization of the wavelength shift should be performed using Formula (15).

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_B(T) - \lambda_{\text{ref}}}{\lambda_{\text{ref}}} \quad (15)$$

The characteristic curve shall be determined by comparison calibration. A test set-up according to 7.1 shall be used. Instead of the ASE light source and the OSA, the interrogator belonging to the sensor can also be used. A standard thermometer (e.g. reference thermometer traceable to ITS-90 [2]) and the FBG temperature sensor shall be exposed to a constant temperature T_M , which is generated, for example, in a stirred temperature calibration bath or a block calibrator (see 6.1 and Annex B). The actual temperature T_M provided by the calibration device is measured against the standard T_N and compared to the corresponding FBG peak wavelength $\lambda_B(T_N)$ or the temperature T_S displayed by the interrogator after thermal equilibrium between the thermometer, the sensor, and the contact material is established.

Comparison calibration shall result either in the determination of individual values $\lambda_{B,i}(T_{N,i})$ or a characteristic formula $\lambda_B(T_N)$ by approximation (see 7.7.2). The individual calibration temperatures shall be set one after the other in ascending order and then in descending order within the temperature range the sensor is designed for. The measurements with ascending and descending temperatures serve to determine hysteresis effects.

In order to achieve low measurement uncertainty (see Annex C) in this comparison calibration, a temperature calibration device shall be used in addition to a suitable standard thermometer, which guarantees homogeneous spatial temperature distribution as well as high temporal temperature constancy in the measuring volume (see 6.1 and Annex B). If these conditions are fulfilled, it can be assumed that $T_M = T_N$ is sufficiently approximated.

NOTE In principle, it is possible to calibrate a surface applied temperature sensor in a stirred temperature calibration bath. However, this determines only the accuracy of the sensing element but not the accuracy of the entire temperature sensor in its specific design form and application.

The smallest measurement uncertainties can be achieved by a fixed point calibration. For fixed point calibrations the temperature sensor is exposed to a well-known temperature. This is produced in high purity materials (e. g. metals) which are heated until they are completely molten and then cooled slowly. A constant temperature exists during the transition stage beginning at the moment of solidification. Under ideal process conditions, this equilibrium status, and thereby a constant temperature, can be maintained for several hours. In the specifications of ITS-90 [2], values are assigned to these fixed points, which are practically identical to the thermodynamic temperatures. However, a fixed point calibration is very expensive to conduct and offered mainly by national metrology institutes.

7.7.2 Evaluation

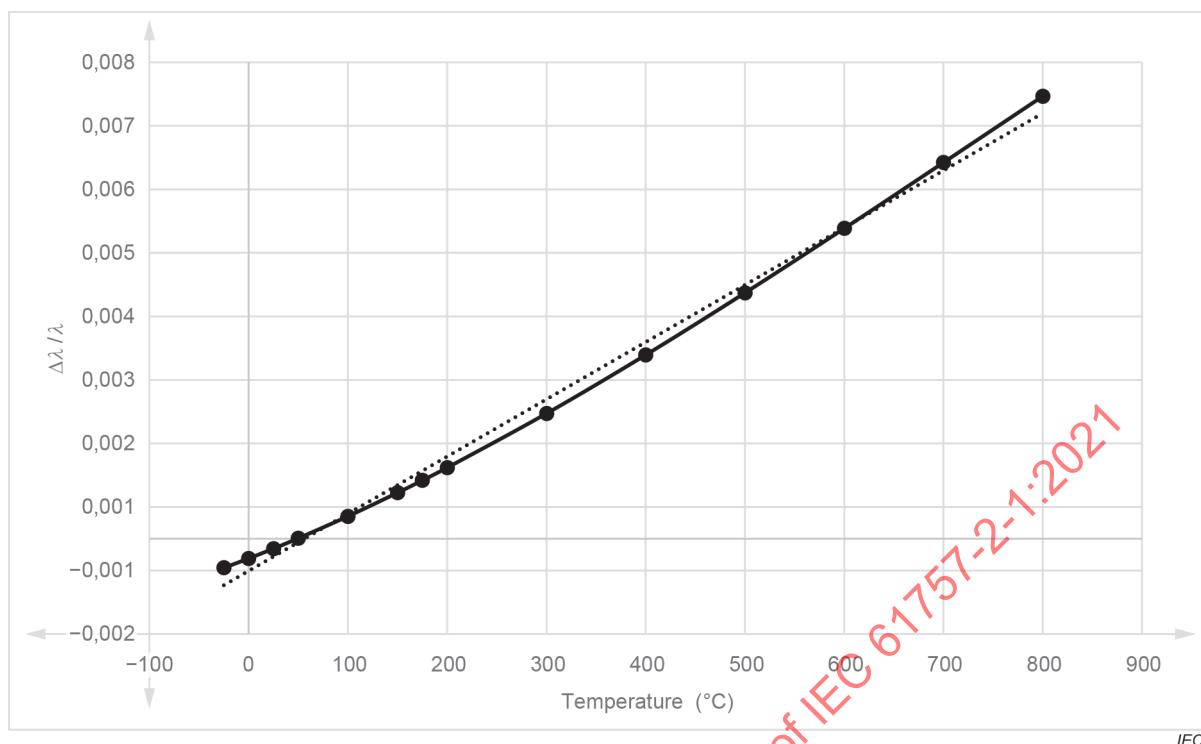
7.7.2.1 Determination of individual values $\lambda_{B,i}(T_{N,i})$

If the FBG temperature sensor is used to measure temperatures that coincide exactly with the calibration points $\lambda_{B,i}(T_{N,i})$, no additional evaluation is needed. Estimation of measurement uncertainty shall be carried out according to ISO/IEC GUIDE 98-3.

7.7.2.2 Determination of a characteristic equation $\lambda_B(T_N)$ by approximation

Usually, the FBG temperature sensor is not used exactly at the calibration points $\lambda_{B,i}(T_{N,i})$, but also at intermediate temperatures. For this reason, the user requires a continuous description of the relationship between temperature and Bragg wavelength over the entire temperature range used. This can be achieved by specifying a mathematical formula which is determined by approximating the measured temperature points.

The temperature characteristic of an FBG is not linear and depends on the fibre type. Since there is no sufficiently accurate analytical model for the temperature characteristic, the characteristic curve shall be approximated by a mathematical formula, for example by an n -th order polynomial fit (see Figure 5). Especially in the cryo- and in the high-temperature range, polynomials of higher than second order are recommended.



Key

- measured values
- linear approximation
- third-order polynomial approximation

Figure 5 – Example of a polynomial fit of calibration points $\lambda_{B,i}(T_{N,i})$

The order of the polynomial fit should be in appropriate relation to the uncertainty of the measured values. A comparison of the accuracy classes for conventional temperature sensors shows that usually a third-order polynomial is sufficient. For very large measuring ranges, a fourth-order polynomial is recommended (see Figure 7). Other analytic approximations (e.g. rational functions) can also be used. However, according to the current state of knowledge they do not provide any advantages.

A polynomial approximation of the third degree can be expressed as in Formula (16):

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_B(T) - \lambda_{\text{ref}}}{\lambda_{\text{ref}}} = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3 \quad (16)$$

where

- A, B, C, D are polynomial parameters;
- λ_{ref} is the reference wavelength in m;
- λ_B is the Bragg wavelength in m;
- T is the temperature in °C.

With the additional condition

$$T = T_{\text{ref}} \Rightarrow \frac{\lambda_B(T) - \lambda_{\text{ref}}}{\lambda_{\text{ref}}} = 0 \quad (17)$$

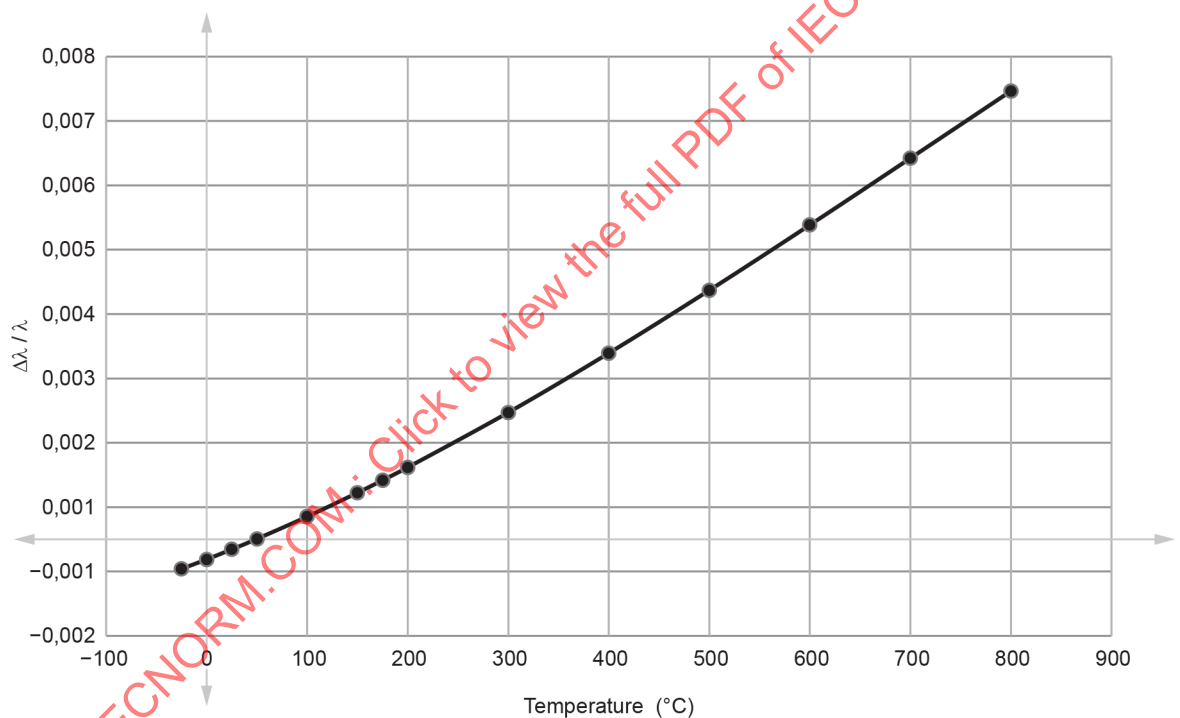
whereby the linear polynomial parameter A is given by Formula (18)

$$A = -B \cdot T_{\text{ref}} - C \cdot T_{\text{ref}}^2 - D \cdot T_{\text{ref}}^3 \quad (18)$$

the Bragg wavelength of the temperature sensor can be calculated from the temperature change as follows (see Figure 6):

$$\lambda_B(T) = \lambda_{\text{ref}} \cdot \left[1 + A + B \cdot (T - T_{\text{ref}}) + C \cdot (T^2 - T_{\text{ref}}^2) + D \cdot (T^3 - T_{\text{ref}}^3) \right] \quad (19)$$

A practical advantage of this representation is, for each FBG of arbitrary wavelength, that any reference temperature or comparison temperature for the zero-measurement (i.e. referencing) can be selected without changing the coefficients B , C , and D . Such a representation is particularly advantageous for measurements with wavelength-division multiplexed FBG sensors (where many FBGs of different wavelengths are evaluated simultaneously with a single device).



IEC

NOTE For the curve shown above, the parameters for the polynomial approximation in Formula (16) are:

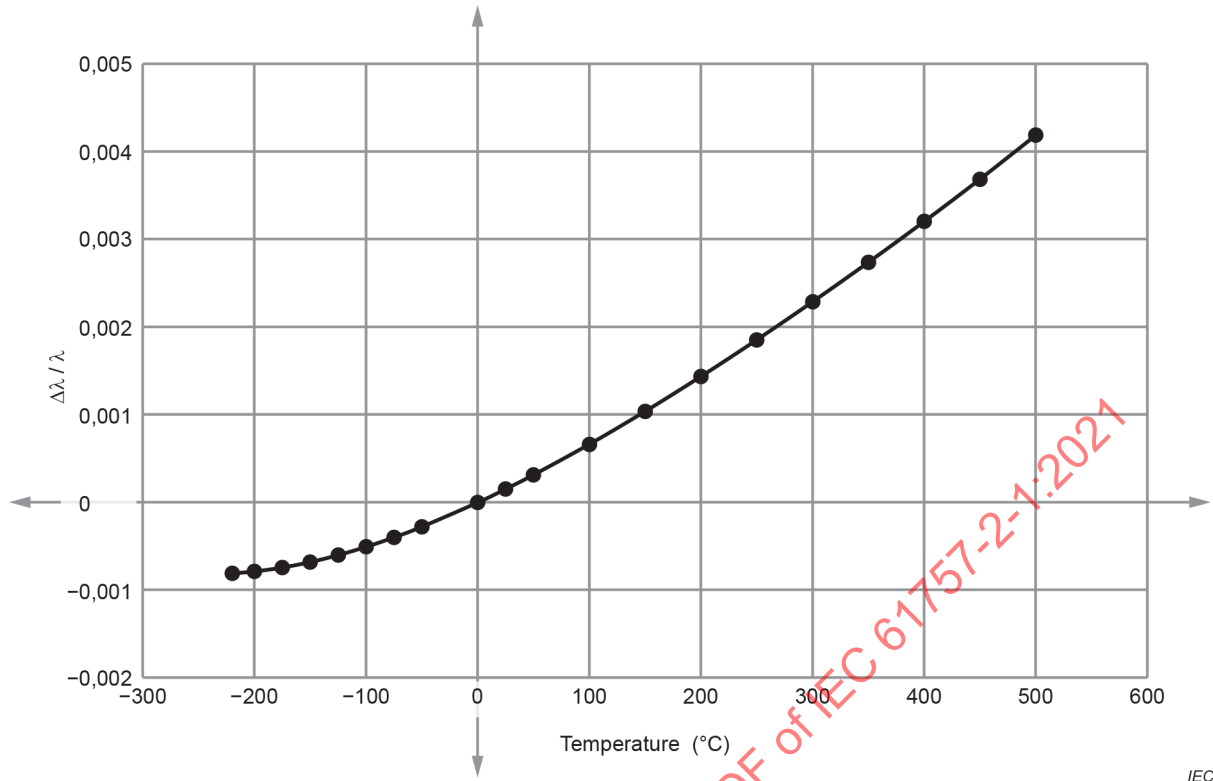
$$A = -3,112\,206 \cdot 10^{-4}$$

$$B = 6,073\,41 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$C = 5,908\,343 \cdot 10^{-9} / ^\circ\text{C}^2$$

$$D = -2,662\,29 \cdot 10^{-12} / ^\circ\text{C}^3$$

Figure 6 – Example of a third-order polynomial fit



NOTE For the above curve, the parameters for the extended polynomial approximation of Formula (16) are:

$$A = -4,507\,87 \cdot 10^{-6}$$

$$B = 5,945\,65 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$C = 7,858\,44 \cdot 10^{-9} / ^\circ\text{C}^2$$

$$D = -9,676\,29 \cdot 10^{-12} / ^\circ\text{C}^3$$

$$E = 7,384\,53 \cdot 10^{-15} / ^\circ\text{C}^4$$

Figure 7 – Example of a fourth-order polynomial fit

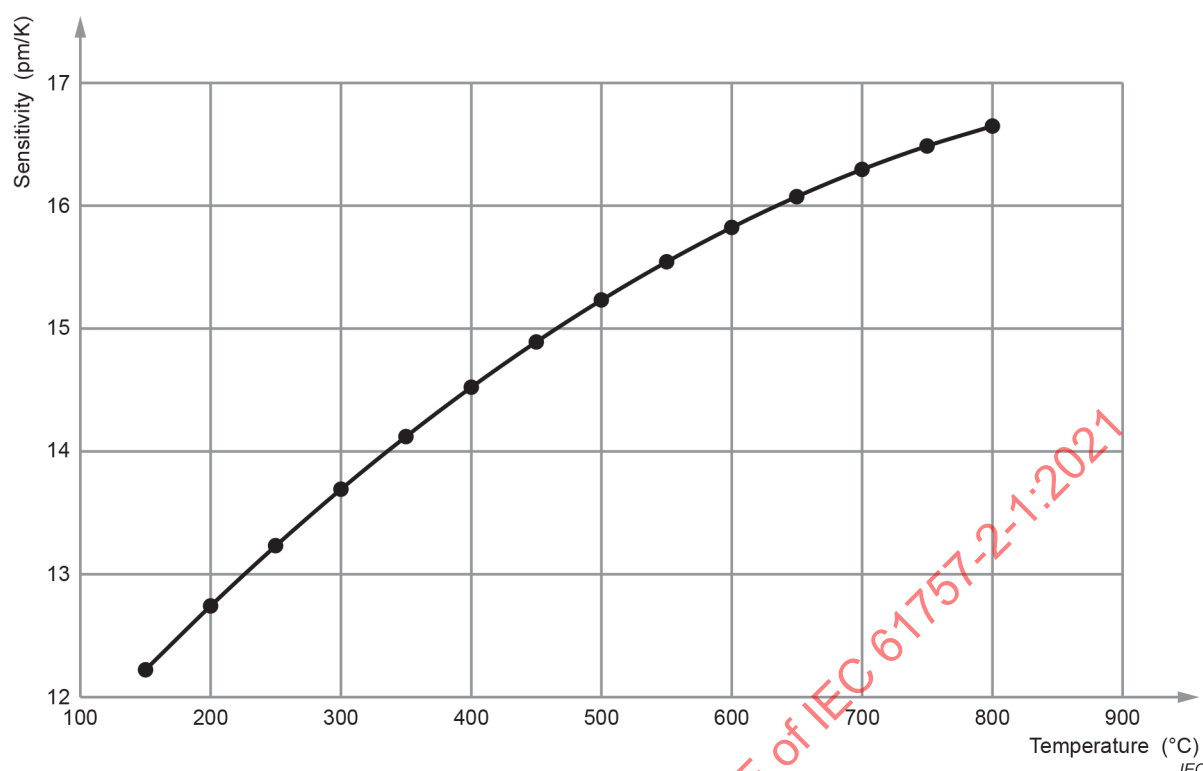
NOTE For practical applications it is more useful to determine the temperature T from the measured Bragg wavelength λ_B of the FBG. The inverse characteristic curve can also be generated by a polynomial fit of appropriate order, thus allowing the sensor temperature T_S to be determined from the measured output value $\lambda_B(T)$.

Estimation of measurement uncertainty shall be carried out according to ISO/IEC GUIDE 98-3.

7.7.2.3 Determination of sensitivity $S(T)$

The sensitivity $S(T)$ of the temperature sensor is the slope of the characteristic curve $\lambda_B(T)$ at a given temperature T . According to the formulae describing the characteristic curve, the temperature dependence of the sensitivity shall also be specified by a polynomial fit of suitable order (see Figure 8).

$$S(T) = \frac{\delta \lambda_B(T)}{\delta T} = \lambda_{\text{ref}} \cdot [B + 2C \cdot T + 3D \cdot T^2] \dots \quad (20)$$



NOTE For the above curve, the parameters for the polynomial approximation in Formula (20) are:

$$\lambda_{\text{ref}} = 1\,550 \text{ nm}$$

$$B = 6,764\,516 \cdot 10^3 \text{ nm} / ^\circ\text{C}$$

$$C = 4,025\,806 \text{ nm} / ^\circ\text{C}^2$$

$$D = -1,283\,871 \cdot 10^{-3} \text{ nm} / ^\circ\text{C}^3$$

Figure 8 – Example of a polynomial fit of the sensitivity

7.7.2.4 Hysteresis

The Bragg wavelength or displayed temperature can be different when the temperature to be measured is approached from an ascending direction versus a descending direction. To determine such effects of hysteresis, the characteristic curves measured in ascending order and descending order shall be compared. Maximum deviation between both curves shall be reported as a value for hysteresis. Estimated measurement uncertainties shall be taken into account.

7.7.3 Reporting

The measurement procedure, light source and OSA settings (or used interrogator and its settings), temperature calibration equipment, standard thermometer, measured values $\lambda_{B,i}(T_{N,i})$, calculated polynomial fit formula of the characteristic curve and sensitivity curve, characteristic and sensitivity curves, and hysteresis shall be reported. The estimation of measurement uncertainty shall also be reported.

7.8 Thermal time constant

7.8.1 Measuring procedure

The thermal time constant τ of the FBG temperature sensor shall be measured according to 7.2.1 with a controlled sudden temperature jump between two reference conditions. The temperature jump shall cover at least two thirds of the measuring range for which the sensor is designed. At the beginning of this measurement, the sensor shall be at a starting temperature T_{S0} . At time $t = 0$ the sensor is instantaneously brought into thermal contact with a measured object or medium at a constant temperature T_M , for example by contact or immersion. The sensor temperature $T_S(t)$ or the corresponding FBG peak wavelength λ_B shall be recorded as a function of the time (see example in Figure 9).

7.8.2 Evaluation

The thermal time constant τ is the time it takes the FBG temperature sensor to detect 63,2 % of the total difference between the initial T_{S0} and the final medium or body temperature T_M .

On request, the response times should also be evaluated for the detection of 50 %, 95 %, and 99 % of the total difference between T_{S0} and T_M (see Figure 9).

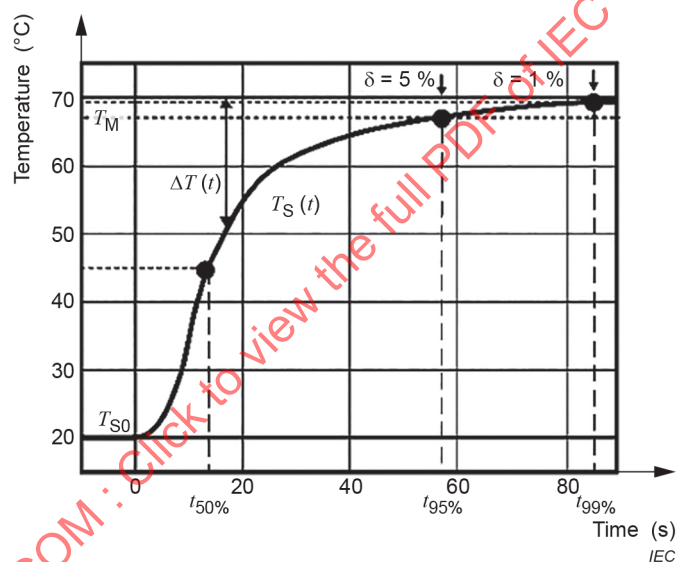


Figure 9 – Typical response time curve

7.8.3 Reporting

The reference conditions, measurement procedure, light source and OSA settings (or used interrogator and its settings), temperature calibration equipment, calculated thermal time constant τ , and if applicable response times at other detection levels shall be reported. The response time curve used for evaluation should be reported on request.

7.9 Sensor stability

7.9.1 Measuring procedure

The Bragg wavelength of the FBG temperature sensor (or the corresponding temperature determined by the interrogator) shall be measured according to 7.2.1. Two different reference conditions, corresponding to the lower and upper limit of the temperature range specified for the sensor, shall be used. The sensor shall be exposed to a constant temperature, corresponding to the lower and upper temperature limit, for a duration of 120 h. The Bragg wavelength or interrogator indication shall be measured during this time or at distinct time intervals.

7.9.2 Evaluation

The standard deviation of all measured values shall be used as a measure for the stability of the sensor. The minimum stability of the sensor to be achieved shall be specified by the manufacturer and confirmed by measurement. Estimation of measurement uncertainty shall be carried out according to ISO/IEC GUIDE 98-3.

7.9.3 Reporting

The reference conditions, measurement procedure, light source and OSA settings (or used interrogator and its settings), temperature calibration equipment, and the calculated sensor stability values shall be reported. The raw data used for evaluation should be reported on request.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61757-2-1:2021

Annex A (informative)

Blank detail specification

A.1 General

The blank detail specification aims to assist the manufacturer in the choice of necessary and practical statements, and to assist the user in comparing FBG temperature sensors from different manufacturers. If pertinent to the sensor model concerned and the application, further statements can be made. With reference to this document, an FBG temperature sensor and, if appropriate, the related measuring equipment (interrogator), should be described by the following parameters.

A.2 Mechanical and optical set-up

- construction details and geometrical dimensions (4.3)
- type of sensor fibre
- type of connecting fibre
- type of FBG temperature sensor
- position of the fibre Bragg grating in the assembled temperature sensor
- sensitive area or length (3.1.18)
- materials in the area of heat transfer (4.3)
- recommended method for thermal coupling
- fibre optic connecting requirements
- additional required components (e.g. depolarizer)
- sensor mass

A.3 Operational characteristics

- Bragg reference wavelength λ_{ref} at a given reference temperature T_{ref} (7.2)
- FBG peak spectral width (7.3)
- FBG reflectivity (7.4)
- side-lobe suppression ratio (7.5)
- signal-to-noise ratio (7.6)
- characteristic curve (7.7)
- sensitivity (7.7.2)
- hysteresis (7.7.2)
- thermal time constant (7.8)
- response times (on request) (7.8.2)
- stability (7.9)

A.4 Limiting parameters

- operating temperature range (minimum and maximum operating temperature)
- storage temperature range
- installation temperature range
- minimum bending radius (3.1.12)
- permitted relative humidity at ambient temperature

A.5 Further information given upon request

- date of manufacture
- production lot and serial number
- practical hints for applications (reference to handling instructions)

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61757-2-1:2021

Annex B (informative)

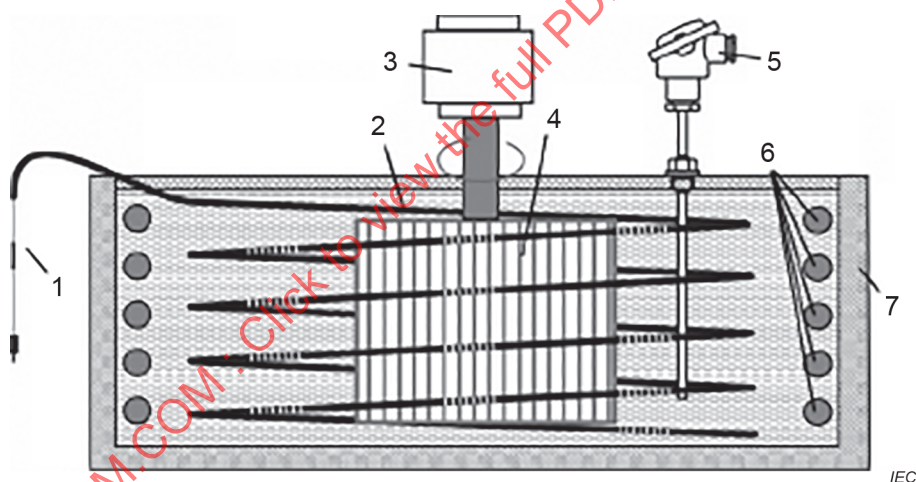
Examples of specific temperature calibration equipment

B.1 Simple liquid bath

In the temperature range from 5 °C to 90 °C, a suitably circular liquid bath can be used for calibration, the diameter and height of which permit the introduction of even longer capillaries with drawn-in FBG temperature sensors. It should be ensured that the permissible minimum radius of the bend of the FBG sensor is not undershot and that there is good thermal contact with the tempering liquid over its entire length used for the temperature measurement (see Figure B.1). This arrangement can be used for the calibration of individual temperature sensors as well as chains of FBG sensors, for example for temperature profile measurements.

The bath liquid (e.g. 150 l to 200 l) is brought into a circular motion with a rotating roll in the interest of a good heat transfer to the sensor and the reference thermometer, and thus also well-mixed to achieve a sufficiently homogeneous temperature field in the calibration area of the bath.

The tempering of the bath can be done directly via a controlled heating or indirectly via circulation thermostats and heat exchangers.



Reproduced from [4], with the permission of AOS GmbH, Dresden DE.

Key

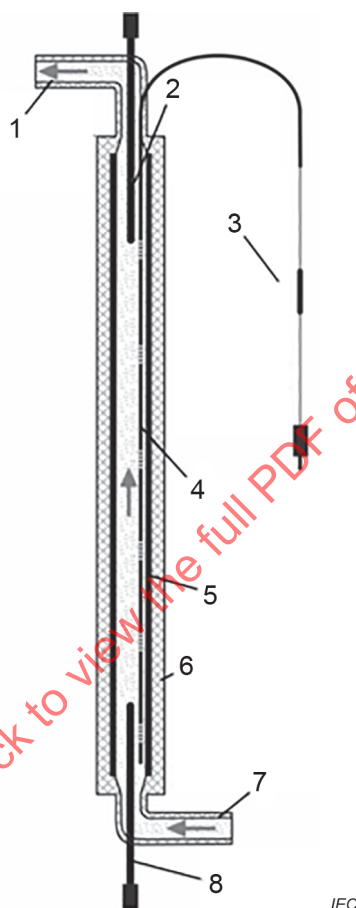
- 1 joint adapter to the cable with connector
- 2 capillary with FBG temperature sensor
- 3 drive
- 4 rotating roll
- 5 reference thermometer
- 6 heating/cooling via circulation bath thermostat
- 7 insulated fluid container

Figure B.1 – Schematic representation of a simple liquid bath [3]

B.2 Liquid tube-thermostat

An alternative to the liquid bath is a tube-thermostat. Figure B.2 shows an example of a tubular calibrator through which flows a thermostatically controlled liquid. Its arrangement allows the vertical insertion of capillary tubes over a length of up to 2 m with a freely movable sensor fibre inside.

Two reference thermometers measure the fluid temperatures T_M at the lower fluid intake and at the upper fluid outlet.



Reproduced from [1], with the permission of Siemens AG, Karlsruhe DE.

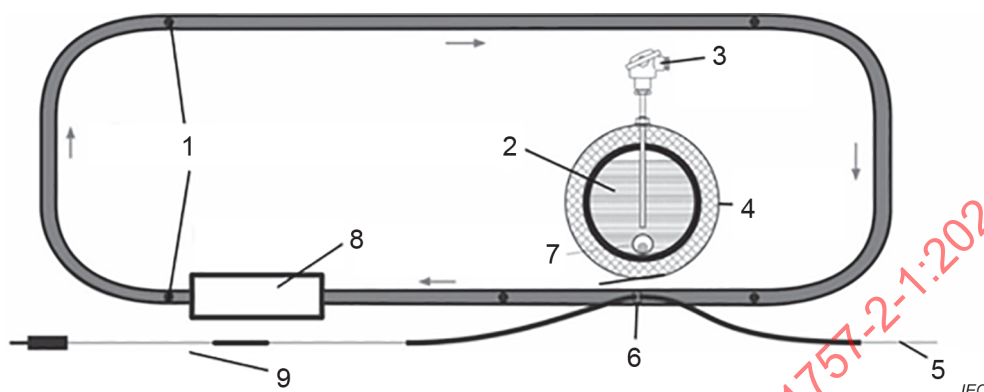
Key

- 1 insulated hose to the circulation bath thermostat
- 2 reference thermometer at the outlet
- 3 joint adapter to the cable with connector
- 4 capillary tube with FBG temperature sensors
- 5 copper tube
- 6 insulation
- 7 insulated hose from the circulation bath thermostat
- 8 reference thermometer at intake

Figure B.2 – Schematic representation of liquid calibration device for connection to laboratory liquid thermostats [4]

Assuming a linear temperature profile along the calibration tube, and knowing the location of the FBG sensors in the calibration zone, the reference temperature to be considered can be determined for each sensor by interpolation.

For calibration of long sensor fibres, a horizontally arranged long-tube liquid calibration facility can be used (see Figure B.3, filled with water for temperatures above room temperature up to +95 °C). This long-tube calibration device allows the calibration of correspondingly long (e.g. 18 m) sensor fibres, installed in capillary tubes. Longer sensor fibres can be installed and calibrated as a double or triple loop. A suitable pump or propeller drive allows liquid speeds of 1 m/s up to 2 m/s.



Reproduced from [1], with the permission of AOS GmbH, Dresden DE.

Key

- 1 orifices for five reference thermometers
- 2 oil / water
- 3 reference thermometer
- 4 outer tube with insulation
- 5 FBG temperature sensor
- 6 intake and outlet port at the top for capillary tube with sensor
- 7 air-filled capillary tube with sensor
- 8 pump / propeller with heating-up element
- 9 adapter to cable with connector

Figure B.3 – Schematic representation of a long-tube fluid calibration device [3]

B.3 Solid-state calibration equipment

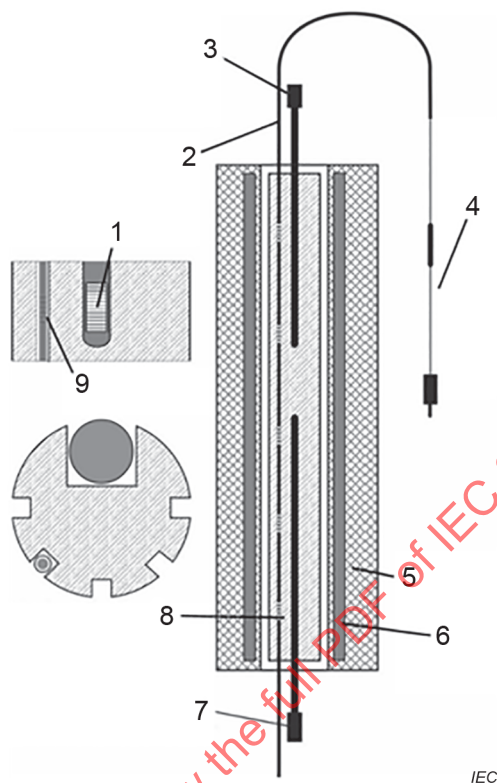
For higher temperatures of up to about 700 °C, a solid-state calibrator can be used (see an example of construction in Figure B.4).

In a vertically positioned tube furnace of 1 m to 2 m in length, a solid copper cylinder is positioned into which two movable reference thermometers and up to five capillary tubes with the FBG sensors to be calibrated can be inserted.

To minimize the effects of axial temperature gradients in the copper cylinder on the calibration uncertainty, two reference resistance thermometers should be positioned in such a way that their sensing resistors are at the same axial position as the FBG temperature sensors to be calibrated.

For calibration of FBG single sensors, which are positioned close to a fibre end, commercially available solid-state thermostats (so-called block calibrators), can also be used [5].

Figure B.5 outlines such a schematic representation, which can be used for calibration temperatures between 150 °C and 800 °C. To specify the measurement uncertainty of the calibration, the temporal and spatial stability of the solid-state thermostats should be demonstrated by measurement.

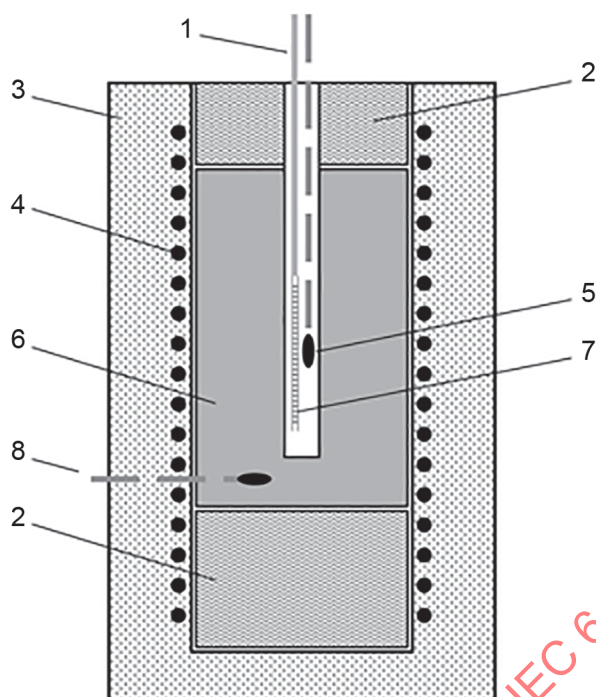


Reproduced from [1], with the permission of Siemens AG, Karlsruhe DE.

Key

- 1 measuring resistor
- 2 free-hanging capillary tube with FBG temperature sensors
- 3 movable reference resistance thermometer
- 4 adapter to cable with connector
- 5 insulation
- 6 heating with temperature control
- 7 movable reference resistance thermometer
- 8 copper rod with longitudinal grooves for reference thermometers and sensor capillaries
- 9 FBG temperature sensor

Figure B.4 – Schematic representation of a solid-state calibration device for higher temperatures [4]



IEC

Key

- 1 capillary tube with FBG temperature sensor
- 2 ceramic insulation
- 3 outer heat insulation
- 4 temperature-controlled heating elements
- 5 calibrated reference thermometer
- 6 solid metal block
- 7 FBG temperature sensor under test
- 8 reference thermometer for temperature control of heating elements

Figure B.5 – Schematic representation of a dry-block calibrator for calibrating an FBG temperature sensor at higher temperatures

Annex C (informative)

Contributions to measurement uncertainty

As with the measurements of all variables, temperature measurements cannot be made at any arbitrary accuracy. The result of the measurement is not only dependent on the variable being measured, but also on the measuring process being used, which is affected by very many other factors, which in turn also influence the measurement results.

Effects impacting measurement uncertainty include:

- errors due to the incompleteness of the measuring instrument used;
- errors due to the influence on the (undisturbed) measured value by the measurement instrument (sensor);
- errors due to effects caused by deficiencies in the test model (especially during the evaluation);
- errors of a random type due to unforeseen factors resulting from predictable interference effects of an "experimental environment";
- local and temporal variations in the temperature T_M of the temperature calibration device, deviations from the homogeneity of the temperature field in the calibration zone;
- thermally induced deviations of the sensor temperature T_S from T_M ;
- dynamic behaviour of the FBG temperature sensor $T_S(t)$ for temporal changes of $T_M(t)$;
- temperature gradients in the calibration device and temperature differences between the locations of several FBG temperature sensors to be calibrated;
- effects of mechanical stresses in the fibre sensor, for example by bending and reduced free mobility in the capillary tube;
- parasitic strain effects;
- measurement of the Bragg wavelength: influence of methodology, equipment technology, environmental conditions, measurement uncertainty;
- thermally induced deviations of the temperature of the reference thermometer T_N from T_B , for example due to self-heating and the influencing ambient temperature;
- dynamic behaviour of the reference thermometer $T_N(t)$ for temporal changes of $T_M(t)$;
- uncertainty of the resistance measurement of the reference thermometer, influence of the ambient temperature;
- deviations in the characteristic curve, drift, stability and resolution of the reference thermometer, differences in the characteristic curves when using several reference thermometers;
- birefringence in a fibre Bragg grating when polarized light is used for the measurement.

Bibliography

- [1] VDI/VDE 2660 Blatt 2:2020-04, *Technical temperature measurement – Optical temperature sensor based on fibre Bragg gratings – Recommendation on temperature measurement and statement of measurement uncertainty*
- [2] Guide to the Realization of the ITS-90. <https://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/guide-its90.html>
- [3] According to documents of AOS GmbH, Dresden DE
- [4] According to documents of Siemens AG, DI PA TI DPO
- [5] POLZ, L.; DUTZ, F.J.; KUTTLER, R.; ROTH, J.: *Temperature Calibration of regenerated fibre Bragg gratings in the range from 150 °C to 800 °C*. Tagungsbericht Faseroptische Sensoren, Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida, 4 (2014)

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61757-2-1:2021

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61757-2-1:2021

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	42
INTRODUCTION.....	44
1 Domaine d'application	45
2 Références normatives	45
3 Termes, définitions, abréviations et symboles de grandeurs	45
3.1 Termes et définitions	46
3.2 Termes abrégés	50
3.3 Symboles de grandeurs	50
4 Conception et caractéristiques d'un capteur de température à FBG	51
4.1 Réseau de Bragg à fibres (FBG)	51
4.2 Dépendance de la longueur d'onde de Bragg à la température	51
4.3 Caractéristiques de conception	52
5 Paramètres de performance	53
6 Appareillage d'essai pour la détermination des paramètres de performance	53
6.1 Equipement d'étalonnage de la température	53
6.2 Analyseur de spectre optique et interrogateur	54
6.3 Source de lumière à large bande	54
7 Procédures d'essai des paramètres de performance	54
7.1 Préparation des échantillons et montage d'essai	54
7.2 Longueur d'onde de Bragg λ_{Bref}	55
7.2.1 Procédure de mesure	55
7.2.2 Evaluation	56
7.2.3 Rapport	56
7.3 Largeur spectrale à la valeur de crête du FBG	56
7.3.1 Procédure de mesure	56
7.3.2 Evaluation	56
7.3.3 Rapport	56
7.4 Réflectivité du FBG	57
7.4.1 Procédure de mesure	57
7.4.2 Evaluation	57
7.4.3 Rapport	58
7.5 Rapport de suppression des lobes latéraux	58
7.5.1 Procédure de mesure	58
7.5.2 Evaluation	58
7.5.3 Rapport	59
7.6 Rapport signal/bruit	59
7.6.1 Procédure de mesure	59
7.6.2 Evaluation	59
7.6.3 Rapport	60
7.7 Courbe caractéristique	60
7.7.1 Procédure de mesure	60
7.7.2 Evaluation	62
7.7.3 Rapport	66
7.8 Constante de temps thermique	67
7.8.1 Procédure de mesure	67
7.8.2 Evaluation	67

7.8.3	Rapport	67
7.9	Stabilité du capteur	68
7.9.1	Procédure de mesure	68
7.9.2	Evaluation	68
7.9.3	Rapport	68
Annexe A (informative)	Spécification particulière-cadre	69
A.1	Généralités	69
A.2	Montage mécanique et optique	69
A.3	Caractéristiques de fonctionnement	69
A.4	Paramètres limites	70
A.5	Informations supplémentaires fournies sur demande	70
Annexe B (informative)	Exemples d'équipement spécifique pour l'étalonnage de la température	71
B.1	Bain de liquide simple	71
B.2	Thermostat à tube de liquide	72
B.3	Equipement d'étalonnage à semiconducteur	73
Annexe C (informative)	Contributions à l'incertitude de mesure	76
Bibliographie		77
Figure 1	– Montage d'essai principal pour FBG	55
Figure 2	– Détermination de la réflectivité du FBG à partir des spectres de réflexion (à gauche) et de transmission (à droite)	57
Figure 3	– Lobes latéraux dans le cas d'un seul capteur de température à FBG	59
Figure 4	– Détermination du rapport signal/bruit	60
Figure 5	– Exemple d'ajustement polynomial de points d'étalonnage $\lambda_{B,i}(T_{N,i})$	62
Figure 6	– Exemple d'ajustement polynomial de troisième ordre	64
Figure 7	– Exemple d'ajustement polynomial de quatrième ordre	65
Figure 8	– Exemple d'ajustement polynomial de la sensibilité	66
Figure 9	– Courbe type du temps de réponse	67
Figure B.1	– Représentation schématique d'un bain de liquide simple [3]	71
Figure B.2	– Représentation schématique du dispositif d'étalonnage en milieu liquide destiné à être raccordé aux thermostats de liquide d'un laboratoire [4]	72
Figure B.3	– Représentation schématique d'un dispositif d'étalonnage à tube long en milieu liquide [3]	73
Figure B.4	– Représentation schématique d'un dispositif d'étalonnage à semiconducteur pour les températures plus élevées [4]	74
Figure B.5	– Représentation schématique d'un bloc étalon utilisé pour étalonner un capteur de température à FBG à des températures plus élevées	75
Tableau 1	– Fluides des bains d'étalonnage	54

COMMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CAPTEURS FIBRONIQUES –

**Partie 2-1: Mesure de la température –
Capteurs de température basés sur des réseaux de Bragg à fibres**

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent document de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence.

L'IEC 61757-2-1 a été établie par le sous-comité 86C: Systèmes et dispositifs actifs à fibres optiques, du comité d'études 86 de l'IEC: Fibres optiques. Il s'agit d'une Norme internationale.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
86C/1725/FDIS	86C/1737/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à son approbation.

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2, il a été développé selon les Directives ISO/IEC, Partie 1 et les Directives ISO/IEC, Supplément IEC, disponibles sous www.iec.ch/members_experts/refdocs. Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous www.iec.ch/standardsdev/publications.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 61757, publiées sous le titre général *Capteurs fibroniques*, se trouve sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous webstore.iec.ch dans les données relatives au document recherché. A cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61757-2-1:2021

INTRODUCTION

Le présent document est basé sur les lignes directrices VDI/VDE 2660 Blatt 2:2020-04, *Technical temperature measurement – Optical temperature sensor based on fibre Bragg gratings – Recommendation on temperature measurement and statement of measurement uncertainty* [1]¹. Il a été élaboré en coopération avec le Comité technique VDI/VDE-GMA 2.17 "Fibre optic measurement techniques".

La numérotation de la série IEC 61757 a été changée selon la logique suivante: les parties sont numérotées sous la forme IEC 61757-M-T, où M représente la grandeur à mesurer et T la technologie.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61757-2-1:2021

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

CAPTEURS FIBRONIQUES –

Partie 2-1: Mesure de la température – Capteurs de température basés sur des réseaux de Bragg à fibres

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61757 spécifie la terminologie, les paramètres de performance caractéristiques et les méthodes d'essai associées des capteurs de température optiques basés sur des réseaux de Bragg à fibres (FBG) qui réalisent des mesures de température dans la plage de températures comprise entre -260°C et 600°C .

Les spécifications génériques applicables aux capteurs fibroniques sont définies dans l'IEC 61757.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60050 (toutes les parties), *Vocabulaire Electrotechnique International* (disponible à l'adresse: www.electropedia.org)

IEC 61757, *Capteurs à fibres optiques – Spécification générique*

IEC 61757-1-1:2020, *Capteurs fibroniques – Partie 1-1: Mesure de déformation – Capteurs de déformation basés sur des réseaux de Bragg à fibres*

Guide ISO/IEC 98-3, *Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995)*

3 Termes, définitions, abréviations et symboles de grandeurs

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'IEC 60050 (toutes les parties), l'IEC 61757, l'IEC 61757-1-1, ainsi que les suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

3.1 Termes et définitions

3.1.1

longueur d'onde de Bragg dans les conditions de référence

λ_{Bref}

longueur d'onde de facteur de réflexion maximal ou de facteur de transmission minimal d'un réseau de Bragg à fibres exempt de contraintes mécaniques dans des conditions de température de référence ou normalisées, sans l'effet d'une variation de température

Note 1 à l'article: Le terme "longueur d'onde de Bragg" λ_{B} spécifié dans la fiche technique d'un fabricant de réseau de Bragg à fibres décrit normalement la longueur d'onde de Bragg sans autres détails sur les conditions de température de référence ou normalisées.

[SOURCE: IEC 61757-1-1:2020, 3.3, modifiée - Définition transformée pour la détection de température]

3.1.2

biréfringence

propriété optique de la dépendance directionnelle de l'indice de réfraction d'un matériau optiquement anisotrope dont les indices de réfraction dépendent de l'orientation, ce qui entraîne différentes vitesses de propagation du rayonnement lumineux dans différentes directions de propagation et de polarisation

Note 1 à l'article: Dans la terminologie des capteurs fibroniques, le terme "biréfringence" s'applique principalement lorsque des guides d'ondes optiques ayant des propriétés de biréfringence sont utilisés, par exemple les fibres PANDA et nœud papillon. La biréfringence dans les réseaux de Bragg à fibres ne devient importante que lorsque la lumière polarisée est utilisée pour la mesure. Etant donné les propriétés des réseaux de Bragg à fibres, cela peut conduire à une augmentation systématique supplémentaire de l'incertitude de mesure.

[SOURCE: IEC 61757-1-1:2020, 3.22, modifiée – clarifiée et Note modifiée]

3.1.3

dérive

variation de la courbe caractéristique (ou, plus rarement, de ses paramètres) dans les mêmes conditions de mesure et de fonctionnement ou conditions de référence, due au vieillissement du matériau et/ou aux contraintes mécaniques et/ou aux contraintes thermiques continues ou alternées

3.1.4

écart de mesure dynamique

$\Delta T(t)$

écart de mesure thermique dépendant du temps, résultant de différences variables dans le temps entre la température du capteur $T_{\text{S}}(t)$ et celle du milieu $T_{\text{M}}(t)$ avec

$$\Delta T(t) = T_{\text{S}}(t) - T_{\text{M}}(t) \quad (1)$$

3.1.5

valeur de crête d'un FBG

valeur maximale de réflexion ou valeur minimale de transmission dans le spectre de réflexion ou de transmission du réseau de Bragg

Note 1 à l'article: La valeur de crête maximale apparaît généralement à la longueur d'onde de Bragg λ_{B} .

3.1.6

largeur spectrale à la valeur de crête d'un FBG

largeur à mi-hauteur (LMH) de la valeur de crête d'un FBG

Note 1 à l'article: La largeur à mi-hauteur de la valeur de crête d'un FBG est la plage de longueurs d'onde du spectre sur laquelle l'amplitude est supérieure à 50 % (3 dB).

[SOURCE: IEC 61757-1-1:2020, 3.7, modifiée - Définition transformée pour un capteur de température]

3.1.7

période d'un FBG

Λ

distance entre les zones d'indice de réfraction variant périodiquement (plans des réseaux) dans un guide d'ondes optique ayant un indice de réfraction efficace n_{eff}

Note 1 à l'article: La période d'un FBG définit la longueur d'onde de Bragg λ_B par la formule:

$$\Lambda = \frac{k \cdot \lambda_B}{2 n_{\text{eff}}} \text{ pour } k = \text{entier positif} \quad (2)$$

[SOURCE: IEC 61757-1-1:2020, 3.18, modifiée – Définition élargie]

3.1.8

capteur de température à FBG

capteur fibronique utilisant un réseau de Bragg à fibres en tant qu'élément sensible pour les mesures de température

Note 1 à l'article: Les capteurs de température à FBG peuvent être utilisés en configuration série avec de multiples réseaux permettant de réaliser des mesures réparties.

3.1.9

système de détection de la température à FBG

montage de mesure constitué d'un ou plusieurs capteurs de température à FBG montés en série et reliés à une unité d'interrogation constituée d'une source de lumière, d'un module de détection, d'un processeur, d'une bibliothèque de données et d'une interface utilisateur

Note 1 à l'article: Un système de détection de la température à FBG fonctionne en principe de la façon suivante: après l'émission de lumière à partir de la source lumineuse dans la fibre et sa réflexion ou transmission partielle par le capteur de température à FBG, elle est guidée jusqu'au module de détection de l'interrogateur, qui détermine la longueur d'onde de crête du FBG. À partir d'une dérive de la longueur d'onde de crête du FBG due à une variation de température, cette dernière peut être déterminée quantitativement en unités de mesure.

3.1.10

température de fonctionnement maximale

plus haute valeur de température à laquelle le capteur de température à FBG atteint la performance spécifiée

3.1.11

température de fonctionnement minimale

plus basse valeur de température à laquelle le capteur de température à FBG atteint la performance spécifiée

3.1.12

rayon de courbure minimal

rayon de courbure minimal qu'un capteur de température à FBG peut supporter sans variation des paramètres de performance spécifiés

Note 1 à l'article: Cette valeur peut différer du rayon de courbure minimal indiqué pour le transport et le stockage.

[SOURCE: IEC 61757-1-1:2020, 3.16, modifiée – Définition transformée pour un capteur de température]

3.1.13

effet parasite d'une déformation

déformation d'origine non thermique du réseau de Bragg à fibres pendant une mesure de température, entraînant une variation de la réponse de longueur d'onde du FBG

Note 1 à l'article: Une déformation non proportionnelle du FBG pendant la mesure de température se produit sous la forme d'une variation apparente de la température dans le signal de réponse et doit donc être exclue ou être évaluable.

3.1.14

longueur d'onde de référence

λ_{ref}

réponse de longueur d'un réseau de Bragg à fibres à laquelle une valeur de température spécifique T_{ref} se rapporte

Note 1 à l'article: Selon la méthode d'évaluation, les dispositifs d'interrogation du capteur émettent souvent différentes longueurs d'onde afin de déterminer la fonction de filtre du réseau de Bragg. La longueur d'onde de référence n'est pas nécessairement égale à la longueur d'onde de Bragg λ_B . Cependant, du fait de la faible différence entre la longueur d'onde de référence et la longueur d'onde de Bragg, ces deux longueurs d'onde peuvent être utilisées dans les Formules (6) à (8) et dans les Formules (16) à (20) sans erreurs significatives.

[SOURCE: IEC 61757-1-1:2020, 3.4, modifiée - Définition transformée pour la détection de température]

3.1.15

longueur d'onde de référence à la température de référence

λ_{Tref}

longueur d'onde de Bragg du réseau de Bragg à fibres pour une température de référence spécifiée T_{ref} non égale à 0 °C

3.1.16

longueur d'onde de référence à 0 °C

$\lambda_{\text{Tref},0}$

longueur d'onde de Bragg du réseau de Bragg à fibres à la température de référence $T_0 = 0$ °C

3.1.17

temps de réponse

t_R

laps de temps après lequel la différence entre la température du capteur $T_S(t)$ et celle du milieu T_M est inférieure à une fraction définie significative δ de la différence de température initiale $T_S(0) - T_M$, tel que décrit par la Formule (3)

$$T_S(t_R) - T_M = \delta [T_S(0) - T_M] \quad (3)$$

3.1.18

zone sensible

<d'un capteur de température à FBG> longueur du réseau de Bragg à fibres qui est sensible à la température à mesurer et donc aux variations de la réponse de longueur d'onde du réseau de Bragg à fibres

3.1.19

rapport de suppression des lobes latéraux

R_{SLs}

rapport de l'intensité de la valeur de crête d'un FBG sur le plus grand lobe latéral le plus proche

Note 1 à l'article: Il est exprimé en dB.

3.1.20

stabilité du capteur

capacité du capteur de température à FBG à conserver ses caractéristiques de performance dans des limites spécifiées sur un intervalle de temps défini, toutes les autres conditions étant identiques

3.1.21

écart de mesure thermique statique

ΔT_{th}

différence de température invariante dans le temps en régime établi entre la température du capteur $T_S(t)$ et celle du milieu T_M

$$\Delta T_{th} = T_S(t) - T_M \text{ pour } t \rightarrow \infty \quad (4)$$

3.1.22

sensibilité à la température

$S(T)$

variation de la longueur d'onde $\Delta \lambda_T$ d'un capteur de température à FBG due à une variation de température ΔT en régime établi, qui correspond à la pente dépendante de la température de la courbe caractéristique $\lambda_T(T)$ exprimée en nm/K

$$S(T) = \frac{\Delta \lambda_T}{\Delta T} \quad (5)$$

Note 1 à l'article: L'unité peut également être pm/K.

3.1.23

gamme des températures de fonctionnement

intervalle sur lequel le capteur de température à FBG peut, dans les conditions spécifiées, réaliser des mesures de température conformément aux performances spécifiées

3.1.24

constante de temps thermique

τ

t_{63}

temps nécessaire à un capteur de température à FBG pour atteindre 63,2 % de la différence totale entre la température initiale et finale du milieu ou du corps lorsqu'il est soumis à une variation de température échelonnée dans des conditions définies

Note 1 à l'article: Dans de nombreuses applications industrielles, la constante de temps thermique est également fournie pour 50 % et 90 % de la différence de température totale, de manière à caractériser le comportement dynamique du capteur de température. La réponse dynamique de certains capteurs de température de surface, tels que les thermocouples sous gaine avec un point de mesure au bas du capteur de température et des approches similaires, ne suit pas une fonction exponentielle mais est plutôt caractérisée par une augmentation initiale rapide de la température suivie d'un glissement lent jusqu'à la valeur finale. Pour ces capteurs de température, la constante de temps thermique est également spécifiée pour 95 % et 99 % de la différence de température totale.

3.1.25

écart de mesure thermique

différence dépendante du temps entre la température du capteur $T_S(t)$ et la température d'origine à mesurer, du milieu ou corps de mesure $T_M(t)$

Note 1 à l'article: Pour $t \rightarrow \infty$, l'écart de mesure thermique est égal à l'écart de mesure thermique statique.

3.2 Termes abrégés

ASE	Amplified Spontaneous Emission (émission spontanée amplifiée)
FBG	Fibre Bragg Grating (réseau de Bragg à fibres)
ITS-90	International Temperature Scale of 1990 (échelle de température internationale de 1990)
OSA	Optical Spectrum Analyzer (analyseur de spectre optique)

3.3 Symboles de grandeurs

k	numéro d'ordre (description mathématique)
ΔL	variation de longueur du réseau de Bragg due à la charge externe appliquée dans la direction de la fibre
n	indice de réfraction
n_{eff}	indice de réfraction efficace (du réseau de Bragg)
P_0	puissance optique incidente
P_{SL}	puissance optique du lobe latéral le plus proche
P_{λ_B}	puissance optique du FBG à λ_B
R_{FBG}	réflectivité d'un FBG
R_{SLS}	rapport de suppression des lobes latéraux, exprimé en dB
SNR_{FBG}	rapport signal/bruit du FBG
$S(T)$	sensibilité à la température en m/K
T	température en °C
T_0	température de référence pour $T = 0$ °C, à laquelle le FBG a la longueur d'onde de référence λ_0 en °C
T_B	température de référence (librement sélectionnable) en °C
T_M	température réelle du milieu/de l'objet à mesurer en °C
T_N	température réelle relevée par le thermomètre étalon
T_{ref}	température de référence définie à laquelle le FBG a la longueur d'onde de référence λ_{ref} en °C
T_s	signal de sortie du capteur de température (température mesurée) en °C
$T_s(0)$	signal de sortie du capteur de température en cas de variation soudaine de la température du corps de mesure ou du milieu, en °C
ΔT_{th}	écart de mesure thermique statique en K
x_i	i -ème valeur mesurée
α	coefficient de dilatation thermique en 1/K
δ	partie de la différence de température initiale, qui est à déterminer de manière appropriée en fonction de l'incertitude de mesure, en K
σ	contrainte mécanique
ε	déformation appliquée au capteur de température (toujours considérée dans la direction de l'axe de la fibre)
p_ε	constante photo-élastique efficace (contrainte-optique)
λ_0	longueur d'onde de référence pour $T = 0$ °C, en m
λ_B	longueur d'onde de Bragg, en m
λ_{FBG0}	longueur d'onde de référence du FBG d'un capteur de température à $T = 0$ °C, en m
λ_{Bref}	longueur d'onde de Bragg dans les conditions de référence, sans contrainte mécanique et à une température de référence spécifiée, en m

λ_{ref}	longueur d'onde de référence en m
$\lambda_{\text{Tref},0}$	longueur d'onde de Bragg du FBG à la température de référence $T_0 = 0\text{ °C}$
λ_{Tref}	longueur d'onde de Bragg du FBG à la température de référence spécifiée $T_{\text{ref}} \neq 0\text{ °C}$
Λ	période d'un FBG
τ, t_{63}	constante de temps thermique
ξ	coefficient thermo-optique

4 Conception et caractéristiques d'un capteur de température à FBG

4.1 Réseau de Bragg à fibres (FBG)

Une description détaillée de la structure, de la fonction, des caractéristiques principales et du processus de fabrication d'un FBG est fournie dans l'IEC 61757-1-1.

4.2 Dépendance de la longueur d'onde de Bragg à la température

Comme l'explique l'IEC 61757-1-1, la variation de la longueur d'onde de Bragg due à une variation de la température du réseau peut être décrite par la Formule (6):

$$\Delta\lambda_B = 2 \cdot \left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial L} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial L} \right) \cdot \Delta L + 2 \cdot \left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \cdot \Delta T \quad (6)$$

où

$\Delta\lambda_B$ est la dérive de longueur d'onde de Bragg;

T est la température;

ΔT est la différence de température;

n_{eff} est l'indice de réfraction efficace (du réseau de Bragg);

ΔL est la variation de longueur du réseau de Bragg due à la charge externe appliquée dans la direction de la fibre;

Λ est la période du FBG.

Les deux premiers termes du côté droit de la Formule (6) décrivent les effets résultant de la déformation mécanique ($\partial\Lambda/\partial L$) et de la réponse élasto-optique ($\partial n_{\text{eff}}/\partial L$) de la fibre optique; ces effets sont à considérer comme des effets parasites dans les mesures de température. Les deux derniers termes de la Formule (6) décrivent les effets de la température sur les grandeurs n_{eff} et Λ .

Le terme ($\partial\Lambda/\partial T$) décrit l'effet de la dilatation thermique du réseau de Bragg par rapport à la période du réseau Λ . L'effet thermique sur l'indice de réfraction de la fibre optique est, d'autre part, exprimé par le terme ($\partial n_{\text{eff}}/\partial T$).

Dans la pratique, les effets de la déformation et de la température sont approximativement décrits par la relation linéaire indiquée dans la Formule (7):

$$\frac{\Delta\lambda_B(\varepsilon, T)}{\lambda_B} = (1 - p_\varepsilon) \cdot \varepsilon + (\alpha + \xi) \cdot \Delta T \quad (7)$$

où

- ε est la déformation de la fibre dans la direction axiale;
- p_ε est la constante photo-élastique efficace (contrainte-optique);
- α est le coefficient de dilatation thermique;
- ξ est le coefficient thermo-optique.

Lorsqu'une variation de température est appliquée à un FBG exempt de contraintes mécaniques, une dérive correspondante de la longueur d'onde de Bragg est observée dans le spectre optique. Dans la pratique, l'effet d'une variation de température ΔT sur la longueur d'onde de Bragg peut approximativement être décrit par la relation linéaire de la Formule (8):

$$\frac{\Delta \lambda_B(T)}{\lambda_B} = (\alpha + \xi) \cdot \Delta T \quad (8)$$

où

- $\lambda_B, \Delta \lambda$ sont respectivement la longueur d'onde de Bragg et la dérive de longueur d'onde;
- $T, \Delta T$ sont respectivement la température et la différence de température;
- α est le coefficient de dilatation thermique;
- ξ est le coefficient thermo-optique.

4.3 Caractéristiques de conception

Les réseaux de Bragg à fibres sont généralement pourvus d'un revêtement dit primaire, qui protège le capteur contre tout dommage ou toute rupture de la fibre. Si le réseau de Bragg à fibres est appliqué sans contrainte mécanique sur l'objet mesuré, le capteur à fibres inclut généralement ce revêtement primaire. Comme l'épaisseur du revêtement est de l'ordre de plusieurs dizaines de micromètres, le transfert de chaleur de l'objet mesuré au capteur n'est pas gêné de manière significative. En revanche, l'impact des déformations thermiquement induites du capteur de température, dues à l'objet mesuré, doit être pris en compte. Le revêtement peut également rester sur la fibre du capteur dans d'autres installations du capteur à FBG. Dans certains cas, le revêtement peut être retiré au cours du processus de fabrication des capteurs de température encapsulés, afin d'obtenir un découplage mécanique. Dans ces cas, il convient de prendre des précautions pour ne pas exposer la fibre à la corrosion dite "corrosion sous contrainte".

Selon l'application de mesure, un FBG est préassemblé dans des tubes d'acier ou des tubes de céramique, ou dans d'autres boîtiers, afin de former le capteur de température à FBG complet. Le préassemblage inclut généralement un collage, un vissage ou une fixation des composants. Il est essentiel d'obtenir un transfert de chaleur optimal (transition ou conduction thermique) vers l'élément sensible à la température, lequel transfert dépend du couplage à la fois mécanique et thermique.

Selon la tâche de mesure, le capteur de température peut contenir un seul FBG ou une chaîne de FBG concaténés (mosaïque de capteurs). Un dispositif à un seul capteur permet une mesure locale (ponctuelle) de la température, alors qu'une chaîne de réseaux de Bragg à fibres concaténés (appelés "capteurs de température quasi répartis") permet une mesure de profils de température à différents emplacements sur l'objet de mesure avec un seul capteur fibronique.

Lorsque plusieurs capteurs à FBG sont concaténés avec des câbles à fibres de connexion relativement longs, les pertes en transmission de la totalité du capteur de température à FBG doivent être prises en compte. Lors de la spécification des pertes en transmission dans le capteur de température à FBG, il convient de déterminer tous les facteurs contribuant à ces pertes, y compris l'affaiblissement dans la fibre optique et dans le FBG en dehors du spectre

du FBG, ainsi que les pertes dans les connecteurs et les épissures. Les amplitudes des signaux dans le spectre de transmission du FBG peuvent être réduites par des effets spécifiques à l'application ayant un impact sur la qualité du capteur. Par exemple, il convient d'examiner séparément les pertes en transmission des capteurs de température à FBG multiplexés en longueur d'onde et montés en série.

5 Paramètres de performance

Un capteur de température à FBG individuel doit être caractérisé par les paramètres de performance technique suivants. L'Article 7 décrit les procédures d'essai associées pour déterminer les paramètres:

- longueur d'onde de Bragg λ_{Bref} (7.2),
- largeur spectrale à la valeur de crête du FBG (7.3),
- réflectivité du FBG (7.4),
- rapport de suppression des lobes latéraux (7.5),
- rapport signal/bruit (7.6),
- courbe caractéristique (7.7),
- sensibilité (7.7.2),
- hystérésis (7.7.2),
- constante de temps thermique (7.8),
- temps de réponse (sur demande uniquement) (7.8.2),
- stabilité du capteur (7.9).

Ces paramètres de performance et des informations techniques supplémentaires sont nécessaires pour les applications pratiques et doivent être fournis par le fabricant en se référant au présent document. Un modèle de spécification détaillée est fourni à l'Annexe A.

6 Appareillage d'essai pour la détermination des paramètres de performance

6.1 Equipement d'étalonnage de la température

Un équipement adapté à l'étalonnage de la température doit être utilisé pour déterminer les paramètres de performance et étalonner le capteur de température à FBG. Les principales options sont les bains de liquide sous agitation disponibles dans le commerce (jusqu'à 550 °C environ) ainsi que les blocs étalons ou l'équipement d'étalonnage de température spécifique présenté à l'Annexe B. Pour les températures plus élevées, des fours à tubes sont généralement employés, leurs propriétés thermiques limitées pouvant être améliorées de façon notable en utilisant des corps dits de compensation (inserts métalliques) ou des caloducs.

Un bain d'étalonnage de température est une enceinte uniforme contenant un fluide soumis à agitation, qui peut être réglée à différents points d'essai en température. En utilisant un fluide sous agitation (par exemple de l'eau, de l'huile de silicone, du méthanol ou de l'éthanol), les bains assurent une uniformité, une stabilité et un contact thermique excellents pour l'étalonnage des capteurs de température. Ils offrent un grand volume de travail et une certaine souplesse pour l'étalonnage des capteurs de température de formes et tailles différentes. Les bains d'étalonnage de température sont généralement équipés d'un thermomètre de référence pour garantir la traçabilité de l'étalonnage. Selon la plage de températures, il convient d'utiliser les fluides énumérés dans le Tableau 1 pour les essais et l'étalonnage des capteurs de température à FBG.

Les blocs étalons sont des inserts métalliques prépercés pour y insérer le capteur de température à étalonner. Ces blocs étalons disposent d'un insert métallique amovible à trous prépercés où les capteurs sont insérés pour la mesure. L'insert assure une source de température stable, qui peut être réglée à différents points d'essai. Afin d'assurer un contact

thermique suffisant entre l'insert métallique et le capteur de température, différentes tailles de trous d'insert sont disponibles. Les blocs étalons sont généralement équipés d'un thermomètre de référence pour garantir la traçabilité de l'étalonnage.

Tableau 1 – Fluides des bains d'étalonnage

Plage de températures	Milieu
–180 °C à –90 °C	Fluide frigorigène R13
–140 °C à 5 °C	Pentane
–110 °C à 5 °C	Alcool
–90 °C à 10 °C	Méthanol
–40 °C à 60 °C	Mélange eau/glycol
+5 °C à 95 °C	Eau
–30 °C à 300 °C	Huile de silicone ou huile minérale

6.2 Analyseur de spectre optique et interrogateur

Un analyseur de spectre optique à haute résolution du commerce ou un système d'analyseur de spectre optique conçu pour l'analyse spectrale des FBG doit être utilisé pour réaliser une analyse spectrale approfondie. Les exigences minimales d'un tel dispositif sont:

- résolution spectrale ≤ 2 pm pour un seul FBG soumis à essai (≤ 1 pm pour une chaîne de FBG concaténés soumis à essai);
- écart de longueur d'onde $\leq \pm 5$ pm;
- plage dynamique ≥ 40 dB.

Si l'ensemble du système de mesure de température fibronique (capteur de température à FBG et interrogateur) est à caractériser, il convient de réaliser l'essai, dans la mesure du possible, avec l'interrogateur fourni.

6.3 Source de lumière à large bande

Une source de lumière du commerce, à émission spontanée amplifiée (ASE) de haute qualité, conçue pour l'analyse spectrale des FBG doit être utilisée pour effectuer une analyse spectrale approfondie. Les exigences minimales d'un tel dispositif sont:

- puissance de sortie totale:
 - > +3 dBm (> 2 mW) à 840 nm à 853 nm
 - > +10 dBm (> 10 mW) à 975 nm à 1 050 nm
- densité de puissance spectrale:
 - > -20 dBm/nm à 840 nm à 853 nm
 - > -30 dBm/nm à 975 nm à 1 050 nm
- stabilité de la puissance de sortie: < $\pm 0,01$ dB

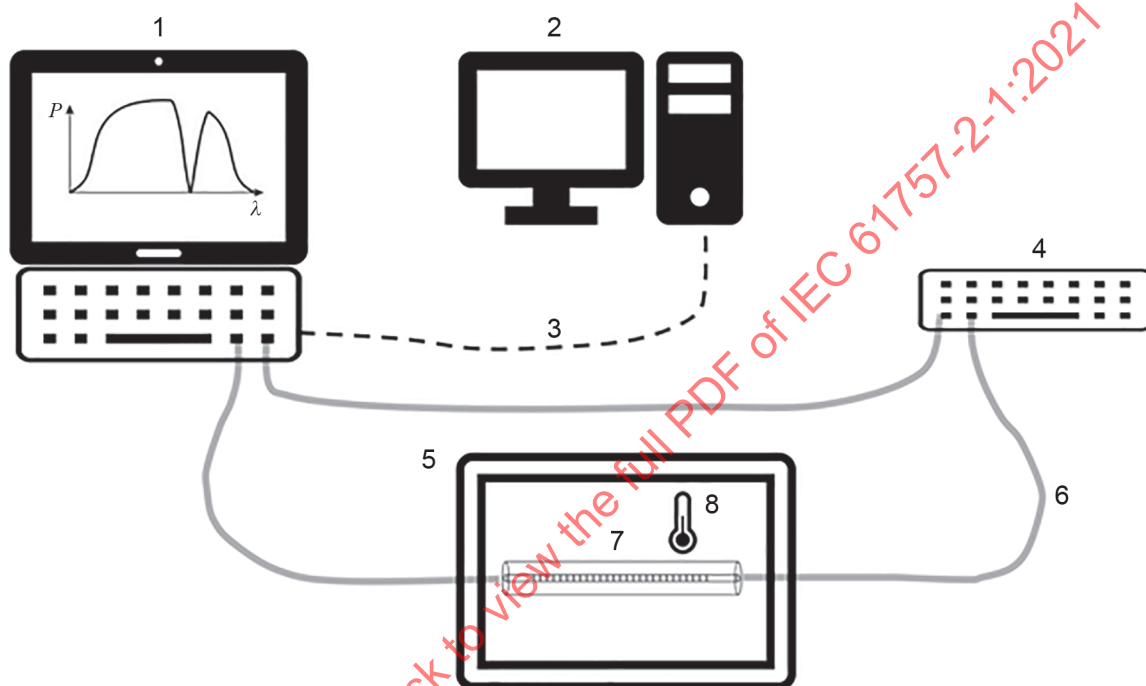
7 Procédures d'essai des paramètres de performance

7.1 Préparation des échantillons et montage d'essai

Avant le début de l'essai, le capteur de température à FBG à soumettre à essai doit être stocké pendant au moins une durée prédéterminée dans un environnement atmosphérique normalisé à (23 ± 5) °C et (50 ± 10) % HR. Il convient de décider de la durée prédéterminée en fonction de la capacité thermique des capteurs fibroniques à soumettre à essai. Le capteur doit être installé dans le dispositif d'étalonnage de la température selon les instructions du fabricant. L'installation du capteur dans ce dispositif doit assurer une répartition spatiale homogène de la température au voisinage du capteur et une haute stabilité en température pendant la durée de la mesure. L'homogénéité et la stabilité en température doivent être nettement meilleures que les spécifications du capteur soumis à essai.

Si un capteur de température qui est normalement appliqué sur une surface est soumis à essai en utilisant la méthode par immersion, il convient alors de noter que cet essai détermine uniquement l'exactitude du capteur, et non celle du capteur de température en surface dans son application spécifique. Selon les exigences relatives à l'incertitude exigée pour la mesure de température, il faut décider si une température de bain d'étalonnage régulée par un dispositif de contrôle de température adapté est suffisante ou si un thermomètre de référence étalonné supplémentaire présentant une incertitude de mesure moins élevée doit être utilisé (voir aussi 7.7.1).

La Figure 1 est une représentation schématique du montage d'essai qui doit être utilisé pour tous les essais.



IEC

Légende

- 1 analyseur de spectre optique (OSA)
- 2 ordinateur (facultatif)
- 3 interface de données (facultative)
- 4 source ASE avec coupleur en Y
- 5 équipement d'étalonnage régulé en température (voir Annexe B)
- 6 fibre optique
- 7 capteur de température à FBG soumis à essai
- 8 thermomètre de référence étalonné

Figure 1 – Montage d'essai principal pour FBG

7.2 Longueur d'onde de Bragg λ_{Bref}

7.2.1 Procédure de mesure

Le spectre du FBG du capteur de température à FBG doit être mesuré avec une résolution spectrale suffisante et dans les conditions de référence. La condition de référence doit être la température située au centre de la gamme des températures de fonctionnement pour laquelle le capteur a été conçu. La condition de référence doit être établie avec un dispositif d'étalonnage de température, selon la description de 6.1. Sauf indication contraire, la température du capteur à FBG doit être stable (régime établi) pendant la durée de cette mesure.

Les conditions en régime établi sont considérées remplies lorsqu'aucune variation systématique significative de la température ne se produit.

Pour les FBG à réflectivité relativement basse ($R_{\text{FBG}} < 50 \%$), la longueur d'onde de Bragg doit être mesurée en réflexion, alors que pour les FBG à réflectivité relativement élevée ($R_{\text{FBG}} > 90 \%$), la longueur d'onde de Bragg doit être mesurée en transmission (Figure 1). Pour les FBG à réflexion élevée ($R_{\text{FBG}} > 90 \%$), il devient de plus en plus difficile de déterminer la valeur de crête de la longueur d'onde de Bragg avec une exactitude suffisante dans le spectre réfléchi. Dans ces cas, la longueur d'onde de Bragg doit donc être déterminée à partir de la valeur minimale dans le spectre de transmission. Pour des valeurs de réflectivité intermédiaires, l'une ou l'autre des configurations peut être utilisée.

Dans les cas où la longueur d'onde de Bragg dépend de la polarisation, des mesures spéciales sont à réaliser (voir l'IEC 61757-1-1:2020, Annexe C).

En variante, en cas de réponse spectrale symétrique, la longueur d'onde de Bragg doit être calculée comme la moyenne arithmétique des deux valeurs de crête de la longueur d'onde de Bragg, par exemple comme la moyenne des deux longueurs d'onde correspondant aux points de chute de 3 dB.

7.2.2 Evaluation

La longueur d'onde de Bragg doit être déterminée soit par évaluation manuelle de la réponse spectrale mesurée, soit par évaluation automatique au moyen d'un algorithme adapté à l'analyse spectrale.

7.2.3 Rapport

Les conditions de mesure suivantes doivent être consignées dans le rapport:

- conditions de référence;
- procédure de mesure;
- source de lumière et réglages de l'OSA;
- longueur d'onde de Bragg mesurée ou calculée.

7.3 Largeur spectrale à la valeur de crête du FBG

7.3.1 Procédure de mesure

Le spectre de réflexion ou de transmission du capteur de température à FBG doit être mesuré suivant la description de 7.2.1 mais dans trois conditions de référence différentes: aux limites haute et basse et au centre de la gamme des températures de fonctionnement spécifiée pour le capteur en essai.

7.3.2 Evaluation

La largeur spectrale de la valeur de crête de la longueur d'onde de Bragg doit être déterminée à partir du spectre mesuré, conformément à sa définition (voir 3.1.6). Elle doit être déterminée à partir d'un spectre de réflexion, sur lequel la différence des deux valeurs de longueur d'onde au niveau de la chute de 3 dB est prise des deux côtés de la valeur de réflexion maximale. Le spectre de transmission peut également être utilisé avec une évaluation spectrale appropriée.

7.3.3 Rapport

Les conditions de référence, la procédure de mesure, la source de lumière, les réglages de l'OSA ainsi que les trois largeurs spectrales mesurées doivent être consignés dans le rapport. Sur demande, il convient de préciser également les spectres utilisés pour l'évaluation.

7.4 Réflectivité du FBG

7.4.1 Procédure de mesure

Le spectre de réflexion du capteur de température à FBG doit être mesuré suivant la description de 7.2.1 mais dans trois conditions de référence différentes: aux limites haute et basse et au centre de la gamme des températures de fonctionnement spécifiée pour le capteur en essai.

7.4.2 Evaluation

La réflectivité du FBG à la valeur de crête de la longueur d'onde de Bragg doit être déterminée à partir du spectre mesuré, conformément à sa définition (voir l'IEC 61757-1-1:2020, 3.5). Elle doit être déterminée à partir d'un spectre de réflexion (voir Figure 2 à gauche) en utilisant la Formule (9):

$$R_{\text{FBG}} = \frac{P_{\text{FBG}}}{P_0} \cdot 100 \% \quad (9)$$

où

P_0 est la puissance optique incidente au niveau du FBG;

P_{FBG} est la puissance optique réfléchie par le FBG à la longueur d'onde de Bragg λ_B ;

R_{FBG} est la réflectivité du FBG.

La réflectivité du FBG peut également être déterminée à partir du spectre de transmission (voir Figure 2 à droite) en utilisant la Formule (10):

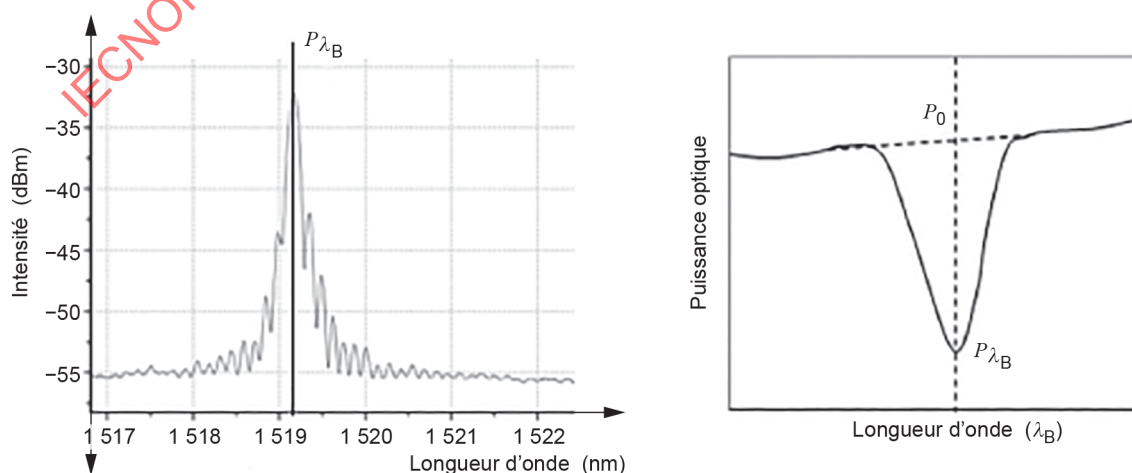
$$R_{\text{FBG}} = \frac{P_0 - P_{\lambda_B}}{P_0} \cdot 100 \% \quad (10)$$

où

P_0 est la puissance optique incidente au niveau du FBG;

P_{λ_B} est la puissance optique transmise du FBG à la longueur d'onde de Bragg λ_B ;

R_{FBG} est la réflectivité du FBG.



IEC

Figure 2 – Détermination de la réflectivité du FBG à partir des spectres de réflexion (à gauche) et de transmission (à droite)

7.4.3 Rapport

Les conditions de référence, la procédure de mesure, la source de lumière, les réglages de l'OSA, les longueurs d'onde de Bragg ainsi que les valeurs de réflectivité calculées doivent être consignés dans le rapport. Sur demande, il convient de préciser également les spectres utilisés pour l'évaluation.

7.5 Rapport de suppression des lobes latéraux

7.5.1 Procédure de mesure

Le spectre de réflexion du capteur de température à FBG doit être mesuré selon 7.2.1.

7.5.2 Evaluation

Le rapport de suppression des lobes latéraux doit être déterminé à partir du spectre de réflexion mesuré, conformément à sa définition (voir 3.1.19). La Figure 3 présente un exemple de lobes latéraux dans un spectre de réflexion d'un FBG. Les lobes latéraux sont définis comme toute caractéristique du spectre de réflexion du FBG qui

- 1) réside en dehors du domaine spectral incluant la valeur de crête fondamentale du FBG,
- 2) présente une concavité vers le bas, et
- 3) présente un franchissement de seuil des deux côtés à un certain niveau de largeur sous la valeur spectrale maximale locale du lobe latéral.

Le rapport de suppression des lobes latéraux doit être calculé d'après la Formule (11):

$$R_{SLS} = 10 \log \left(\frac{P_{\lambda B}}{P_{SL}} \right) \quad (11)$$

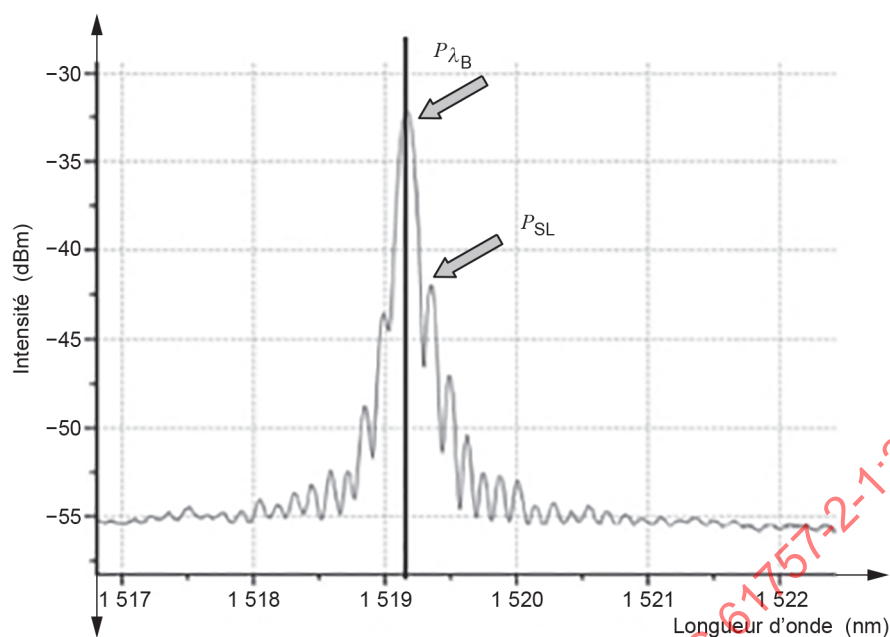
où

P_{SL} est la puissance optique du lobe latéral le plus proche;

$P_{\lambda B}$ est la puissance optique du FBG à λ_B ;

R_{SLS} est le rapport de suppression des lobes latéraux, exprimé en dB.

L'IEC 61757-1-1:2020, Annexe A fournit des explications complémentaires sur les lobes latéraux des FBG pour différentes conditions d'utilisation.



IEC

Figure 3 – Lobes latéraux dans le cas d'un seul capteur de température à FBG

7.5.3 Rapport

Les conditions de référence, la procédure de mesure, la source de lumière, les réglages de l'OSA et le rapport calculé de suppression des lobes latéraux doivent être consignés dans le rapport. Sur demande, il convient de préciser également le spectre utilisé pour l'évaluation.

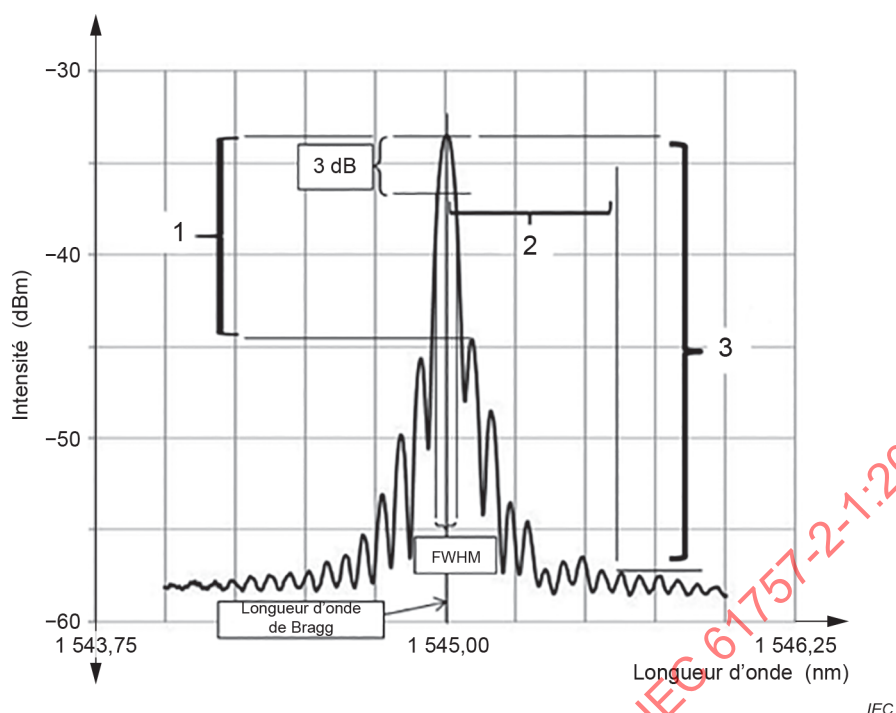
7.6 Rapport signal/bruit

7.6.1 Procédure de mesure

Le spectre de réflexion du capteur de température à FBG doit être mesuré selon 7.2.1.

7.6.2 Evaluation

Le rapport signal/bruit doit être déterminé à partir du spectre de réflexion mesuré, conformément à sa définition (voir l'IEC 61757-1-1:2020, 3.12). Il est déterminé à partir de la puissance réfléchie maximale à la valeur de crête de la longueur d'onde de Bragg, et du niveau de puissance d'un lobe latéral à une longueur d'onde décalée de 1 nm par rapport à la longueur d'onde de Bragg (voir Figure 4). Le rapport signal/bruit est calculé à partir du rapport de ces deux niveaux de puissance.



Légende

- (1) rapport de suppression des lobes latéraux (voir 7.5)
- (2) distance spectrale de 1 nm par rapport à la valeur maximale d'un ou deux côtés de la longueur d'onde de Bragg
- (3) rapport signal/bruit du FBG SNR_{FBG} pour (2)

Figure 4 – Détermination du rapport signal/bruit

7.6.3 Rapport

Les conditions de référence, la procédure de mesure, la source de lumière, les réglages de l'OSA et les valeurs SNR_{FBG} calculées à $\lambda_B \pm 1$ nm doivent être consignés dans le rapport. Sur demande, il convient de préciser également le spectre utilisé pour l'évaluation.

7.7 Courbe caractéristique

7.7.1 Procédure de mesure

La mesure de température avec un FBG est essentiellement une mesure différentielle. Cela signifie qu'à partir d'un décalage de la longueur d'onde de Bragg:

$$\Delta\lambda = \lambda_B - \lambda_{ref} \quad (12)$$

une variation de température

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (13)$$

est à déterminer, où:

$$\lambda_B(T_{ref}) = \lambda_{ref} \quad (14)$$

est la longueur d'onde de Bragg à une température de référence donnée T_{ref} . Les grandeurs fondamentales λ_{ref} et la valeur T_{ref} correspondante doivent être spécifiées par le fabricant et confirmées par la mesure.

Pour faciliter la manipulation et la gestion des données, il convient de normer le décalage de longueur d'onde à l'aide de la Formule (15):

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_B(T) - \lambda_{\text{ref}}}{\lambda_{\text{ref}}} \quad (15)$$

La courbe caractéristique doit être déterminée par un étalonnage de comparaison. Un montage d'essai selon 7.1 doit être utilisé. Il est également possible d'utiliser l'interrogateur appartenant au capteur, en lieu et place de la source de lumière ASE et de l'OSA. Un thermomètre étalon (par exemple un thermomètre de référence traçable par rapport à l'ITS-90 [2]) et le capteur de température à FBG doivent être exposés à une température constante T_M qui est obtenue, par exemple, dans un bain d'étalonnage de température soumis à agitation ou dans un bloc étalon (voir 6.1 et Annexe B). La température réelle T_M obtenue par le dispositif d'étalonnage est mesurée par rapport à l'étalon T_N et comparée à la longueur d'onde de crête correspondante du FBG $\lambda_B(T_N)$ ou à la température T_S affichée par l'interrogateur après que l'équilibrage thermique entre le thermomètre, le capteur et le matériau de contact.

L'étalonnage de comparaison doit entraîner soit la détermination de valeurs individuelles $\lambda_{B,i}(T_{N,i})$, soit l'obtention d'une formule caractéristique $\lambda_B(T_N)$ par approximation (voir 7.7.2). Les températures d'étalonnage individuelles doivent être réglées les unes à la suite des autres, dans l'ordre croissant puis décroissant, sur la plage de températures pour laquelle le capteur a été conçu. Les mesures avec les températures croissantes et décroissantes servent à déterminer les effets d'hystérésis.

Afin d'obtenir une faible incertitude de mesure (voir Annexe C) dans cet étalonnage de comparaison, un dispositif d'étalonnage de température doit être utilisé en plus d'un thermomètre étalon adapté, qui garantit une répartition spatiale homogène de la température ainsi qu'une constance de température temporelle élevée dans le volume de mesure (voir 6.1 et Annexe B). Si ces conditions sont remplies, il peut être supposé que l'approximation $T_M = T_N$ est suffisante.

NOTE En principe, il est possible d'étalonner un capteur de température appliqué en surface dans un bain d'étalonnage de température sous agitation. En revanche, cette opération ne détermine que l'exactitude de l'élément sensible, et non celle de l'ensemble du capteur de température dans sa forme de conception et son application spécifiques.

Les plus petites incertitudes de mesure peuvent être obtenues par un étalonnage à point fixe. Pour les étalonnages à point fixe, le capteur de température est exposé à une température bien connue, obtenue avec des matériaux très purs (des métaux, par exemple) qui sont chauffés jusqu'à fusion complète, puis refroidis. Il existe une température constante au cours de la phase de transition qui débute au moment de la solidification. Dans des conditions de processus idéales, cet état d'équilibre, et donc une température constante, peut être maintenu pendant plusieurs heures. Dans les spécifications de l'ITS-90 [2], des valeurs sont attribuées à ces points fixes, qui sont pratiquement identiques aux températures thermodynamiques. Cependant, un étalonnage à point fixe s'avère très coûteux et seuls les laboratoires de métrologie nationaux le proposent.

7.7.2 Evaluation

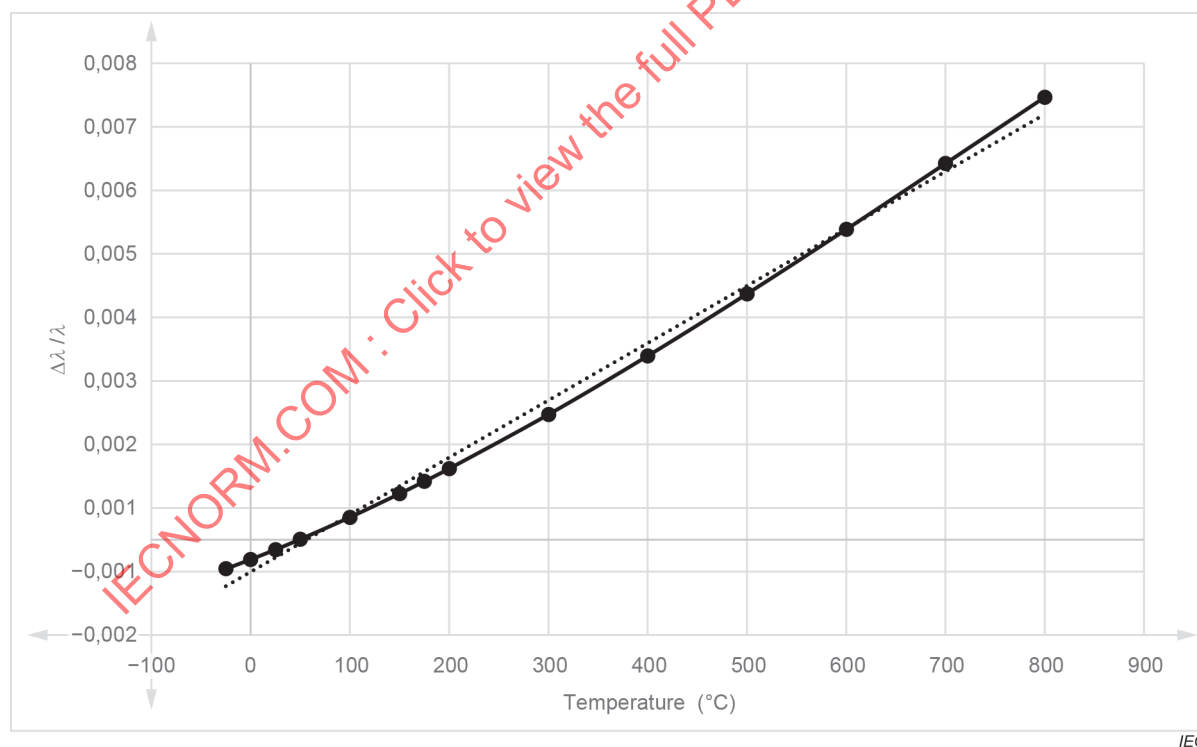
7.7.2.1 Détermination des valeurs individuelles $\lambda_{B,i}(T_{N,i})$

Si le capteur de température à FBG est utilisé pour mesurer des températures qui coïncident exactement avec les points d'étalonnage $\lambda_{B,i}(T_{N,i})$, aucune évaluation supplémentaire n'est nécessaire. L'estimation de l'incertitude de mesure doit être établie conformément au Guide ISO/IEC 98-3.

7.7.2.2 Détermination d'une équation caractéristique $\lambda_B(T_N)$ par approximation

En général, le capteur de température à FBG n'est pas utilisé exactement aux points d'étalonnage $\lambda_{B,i}(T_{N,i})$, mais aussi à des températures intermédiaires. Pour cette raison, l'utilisateur exige une description continue de la relation entre la température et la longueur d'onde de Bragg sur toute la plage de températures utilisée. Cette exigence peut être satisfaite en spécifiant une formule mathématique déterminée en approximant les points de température mesurés.

La caractéristique de température d'un FBG n'est pas linéaire et dépend du type de fibre. Comme il n'existe pas de modèle analytique suffisamment exact pour la caractéristique de température, la courbe caractéristique doit être approximée par une formule mathématique, par exemple par un ajustement polynomial du n -ème ordre (voir Figure 5). En particulier dans la plage des températures cryogéniques et des hautes températures, les polynômes d'ordre supérieur à 2 sont recommandés.



Légende

- valeurs mesurées
- approximation linéaire
- approximation polynomiale d'ordre 3

Figure 5 – Exemple d'ajustement polynomial de points d'étalonnage $\lambda_{B,i}(T_{N,i})$

Il convient que l'ordre de l'ajustement polynomial soit en relation appropriée avec l'incertitude des valeurs mesurées. Une comparaison des classes d'exactitude pour les capteurs de température conventionnels montre qu'un polynôme de troisième ordre est généralement suffisant. Pour les plages de mesure très étendues, un polynôme de quatrième ordre est recommandé (voir Figure 7). D'autres approximations analytiques (fonctions rationnelles, par exemple) peuvent également être utilisées. Cependant, d'après l'état actuel des connaissances, elles ne fournissent pas d'autres avantages.

Une approximation polynomiale du troisième degré peut être exprimée comme dans la Formule (16):

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_B(T) - \lambda_{\text{ref}}}{\lambda_{\text{ref}}} = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3 \quad (16)$$

où

A, B, C, D sont des paramètres polynomiaux;

λ_{ref} est la longueur d'onde de référence en m;

λ_B est la longueur d'onde de Bragg en m;

T est la température en °C.

Avec la condition supplémentaire:

$$T = T_{\text{ref}} \Rightarrow \frac{\lambda_B(T) - \lambda_{\text{ref}}}{\lambda_{\text{ref}}} = 0 \quad (17)$$

Le paramètre polynomial linéaire A est donné par la Formule (18):

$$A = -B \cdot T_{\text{ref}} - C \cdot T_{\text{ref}}^2 - D \cdot T_{\text{ref}}^3 \quad (18)$$

La longueur d'onde de Bragg du capteur de température peut être calculée à partir de la variation de température comme suit (voir Figure 6):

$$\lambda_B(T) = \lambda_{\text{ref}} \left[1 + A + B \cdot (T - T_{\text{ref}}) + C \cdot (T^2 - T_{\text{ref}}^2) + D \cdot (T^3 - T_{\text{ref}}^3) \right] \quad (19)$$

Un avantage pratique de cette représentation - pour chaque FBG de longueur d'onde arbitraire - est que toute température de référence ou de comparaison pour la mesure du zéro (c'est-à-dire le référencement) peut être sélectionnée sans changer les coefficients B , C et D . Une telle représentation est particulièrement avantageuse pour les mesures avec des capteurs à FBG multiplexés en longueur d'onde (où de nombreux FBG de différentes longueurs d'onde sont évalués simultanément avec un seul dispositif).