

VEREIN  
DEUTSCHER  
INGENIEURE

VERBAND DER  
ELEKTROTECHNIK  
ELEKTRONIK  
INFORMATIONSTECHNIK

Technische Temperaturmessung  
Optischer Temperaturfühler  
basierend auf Faser-Bragg-Gittern

Empfehlungen zur Durchführung von  
Temperaturmessungen und Angabe der  
Messunsicherheit

Technical temperature measurement  
Optical temperature sensor  
based on fibre Bragg gratings

Recommendation on temperature measurement and  
statement of measurement uncertainty

VDI/VDE 2660

Blatt 2 / Part 2

Ausg. deutsch/englisch  
Issue German/English

*Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.*

*The German version of this standard shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.*

Inhalt	Seite
Vorbemerkung.....	3
Einleitung.....	3
<b>1 Anwendungsbereich.....</b>	<b>5</b>
<b>2 Begriffe.....</b>	<b>6</b>
<b>3 Formelzeichen und Abkürzungen.....</b>	<b>13</b>
<b>4 Grundlagen/Kennwerte.....</b>	<b>15</b>
4.1 Faser-Bragg-Gitter (FBG).....	15
4.2 Abhängigkeit der Bragg-Wellenlänge von der Temperatur.....	19
4.3 Messtechnische Kennwerte.....	20
4.4 Kalibriermethoden.....	26
4.5 Sensitiver Bereich/temperaturempfindliche Länge des Fühlers.....	32
4.6 Beschreibung des statischen und dynamischen Verhaltens.....	32
4.7 Allgemeine Forderungen.....	36
<b>5 Bauartspezifische Merkmale und anzugebende Kenngrößen.....</b>	<b>38</b>
5.1 Konfiguration von FBG-Temperaturfühlern.....	38
5.2 Zugelassener Temperaturbereich.....	40
5.3 Zugelassene Klimabedingungen.....	41
5.4 Installationsbedingungen für die Prüflingsbewertung.....	41
5.5 Wiederkehrende Festlegungen für die Kennwerteprüfung.....	42
5.6 Installation conditions for the test sample evaluation.....	43
<b>6 Bauartspezifische Merkmale und zu messende Kennwerte.....</b>	<b>44</b>
6.1 Bragg-Wellenlänge $\lambda_B$ .....	44
6.2 Spektrale Breite des FBG-Peaks.....	45
6.3 FBG-Reflektivität.....	46
6.4 Temperaturkennlinie.....	47
6.5 Temperaturmessbereich.....	48

Contents	Page
Preliminary note.....	3
Introduction.....	3
<b>1 Scope.....</b>	<b>5</b>
<b>2 Terms and definitions.....</b>	<b>6</b>
<b>3 Symbols and abbreviations.....</b>	<b>13</b>
<b>4 Fundamentals/characteristics.....</b>	<b>15</b>
4.1 Fibre Bragg grating (FBG).....	15
4.2 Dependence of the Bragg wavelength on the temperature.....	19
4.3 Characteristic values.....	20
4.4 Calibration methods.....	26
4.5 Sensitive area/temperature-sensitive length of the sensor.....	32
4.6 Description of the static and dynamic behaviour.....	32
4.7 General requirements.....	36
<b>5 Design specific features and parameters to be provided.....</b>	<b>38</b>
5.1 Configurations of FBG temperature sensors.....	38
5.2 Permitted temperature range.....	40
5.3 Permitted climate conditions.....	41
5.4 Recurring directives for characteristics testing.....	41
5.5 Anzuwendende Prüfungsart für einzelne Kennwerte.....	42
5.6 Type of test required for individual characteristics.....	43
<b>6 Design specific features and characteristics to be measured.....</b>	<b>44</b>
6.1 Bragg wavelength $\lambda_B$ .....	44
6.2 Spectral width of the FBG peak.....	45
6.3 FBG reflectivity.....	46
6.4 Temperature characteristic.....	47
6.5 Temperature measurement range.....	48

VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA)

Fachbereich Prozessmesstechnik und Strukturanalyse

VDI/VDE-Handbuch Prozessmesstechnik und Strukturanalyse  
VDI/VDE-Handbuch Optische Technologien

Inhalt	Seite
6.6 Dynamisches Verhalten .....	48
6.7 Hysterese .....	49
<b>7 Störeinflüsse bei der Temperaturmessung .....</b>	<b>50</b>
7.1 Formstabilität des FBG-Peaks .....	50
7.2 Sensorspezifische Einflüsse .....	50
7.3 Polarisierungseffekte .....	51
7.4 Kennliniendrift bei maximaler Betriebstemperatur .....	51
7.5 Einfluss des Wärmeübergangs auf die Fühlercharakteristik .....	52
7.6 Alterungsverhalten der beteiligten Werkstoffe .....	53
7.7 Einfluss von Biegung des FBG auf die Fühlercharakteristik .....	53
7.8 Physikalische/chemische Einflüsse .....	53
7.9 Andere Umgebungseinflüsse .....	55
<b>8 Anforderungen an die optische Auswertung von FBG-Temperatur Sensoren .....</b>	<b>55</b>
8.1 Bestimmung der FBG-Kennwerte unter Laborbedingungen .....	56
8.2 Empfehlungen zum Einsatz von FBG- Messgeräten .....	57
8.3 Anforderung an die Bestimmung der Bragg-Wellenlänge $\lambda_B$ .....	60
8.4 Weitere spektrale Kennwerte .....	61
<b>9 Angabe der Messergebnisse für die Kennwerte .....</b>	<b>63</b>
9.1 Hinweise .....	63
9.2 Musterdatenblatt .....	64
<b>Anhang A Weitere Eigenschaften von FBG- Temperaturfühlern .....</b>	<b>64</b>
A1 Allgemeine mathematische Beschreibung von Faser-Bragg-Gitter-Sensoren .....	64
A2 Installationsvarianten .....	66
A3 Querdruckeinflüsse .....	67
<b>Anhang B Beispiele für Kalibriereinrichtungen .....</b>	<b>68</b>
B1 Einfache Flüssigkeitsbäder .....	68
B2 Flüssigkeits-Rohrthermostate .....	69
B3 Festkörperkalibratoren .....	71
<b>Anhang C Anforderungen an ein Datenblatt .....</b>	<b>73</b>
C1 Allgemeines .....	73
C2 Mechanischer Aufbau .....	73
C3 Funktionskenngrößen .....	73
C4 Grenzparameter .....	74
C5 Temperaturangaben .....	74
C6 Weitere Angaben auf Anfrage .....	74
<b>Anhang D Anwendungsbeispiele .....</b>	<b>75</b>
D1 FBG-Temperaturmesslanze in einem Reaktor .....	75
D2 FBG-Temperaturmessung in einer Getreidemühle .....	75
<b>Anhang E Hinweise zur Richtlinie .....</b>	<b>77</b>
Schrifttum .....	78
Benennungsindex englisch – deutsch .....	80

Contents	Page
6.6 Dynamic behaviour .....	48
6.7 Hysteresis .....	49
<b>7 Influences interfering the temperature measurement .....</b>	<b>50</b>
7.1 Shape stability of the Bragg grating peak .....	50
7.2 Sensor-specific influences .....	50
7.3 Polarization effects .....	51
7.4 Drift of the characteristic curve at maximum operating temperature .....	51
7.5 Influence the heat transfer on the sensor characteristic .....	52
7.6 Aging behaviour of the materials involved .....	53
7.7 Influence of bending of the FBG on the sensor characteristic .....	53
7.8 Physical/chemical influences .....	53
7.9 Other environmental influences .....	55
<b>8 Requirements for the optical evaluation of FBG temperature sensors .....</b>	<b>55</b>
8.1 Determination of the FBG characteristic values under laboratory conditions .....	56
8.2 Recommendations for the use of FBG measurement devices .....	57
8.3 Requirements for the determination of the Bragg wavelength $\lambda_B$ .....	60
8.4 Other spectral characteristics .....	61
<b>9 Statement of the measurement results for the characteristic values .....</b>	<b>63</b>
9.1 Practical information .....	63
9.2 Sample data sheet .....	64
<b>Annex A Further properties of FBG temperature sensors .....</b>	<b>64</b>
A1 General mathematical description of fibre Bragg grating sensors .....	64
A2 Versions of installation .....	66
A3 Transverse stress influences .....	67
<b>Annex B Examples of calibration facility .....</b>	<b>68</b>
B1 Simple liquid baths .....	68
B2 Liquid tube thermostats .....	69
B3 Solid state calibration facilities .....	71
<b>Annex C Requirements for a data sheet .....</b>	<b>73</b>
C1 General .....	73
C2 Mechanical setup .....	73
C3 Operational characteristics .....	73
C4 Limiting parameters .....	74
C5 Temperature data .....	74
C6 Further Information to be given upon request .....	74
<b>Annex D Application examples .....</b>	<b>75</b>
D1 FBG temperature measuring rod (measuring lance) in a reactor .....	75
D2 FBG temperature measurement in a grain mill .....	75
<b>Annex E Notes on the standard .....</b>	<b>77</b>
Bibliography .....	78
Term index English – German .....	80

## Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen ([www.vdi.de/richtlinien](http://www.vdi.de/richtlinien)), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Eine Liste der aktuell verfügbaren Blätter dieser Richtlinienreihe ist im Internet abrufbar unter [www.vdi.de/2660](http://www.vdi.de/2660).

## Einleitung

Motivation für die Erstellung dieser Richtlinie war die zunehmende kommerzielle Nutzung von Faser-Bragg-Gitter(FBG)-Sensoren für Temperaturmessungen.

Allgemeingültige Regelwerke für die Prüfung, Charakterisierung und Anwendung faseroptischer Temperaturfühler auf Basis von FBG sind bisher nicht bekannt. Diese Lücke in der Regelung setzt schließt bislang Unklarheiten bei der Definition von Kenngrößen und deren Angabe in Datenblättern ein. Zuverlässige Messangaben sind aber nur möglich, wenn die Hersteller und Nutzer unter gemachten Angaben und Bezeichnungen dasselbe verstehen.

Diese Richtlinie soll somit dem Hersteller von optischen Temperaturfühlern bei der Fertigung und Beschreibung der Produkte eine Orientierung bieten und dem Anwender ein besseres Verständnis für deren Auswahl, Einsatz und Betrieb ermöglichen.

Ziel dieser Richtlinie ist eine Veröffentlichung mit Empfehlungen zur Durchführung von Temperaturmessungen im Bereich zwischen  $-260\text{ °C}$  und  $600\text{ °C}$  sowie der korrekten Angabe der Messwerte.

Ein Verweis „Technische Angaben gemäß Richtlinie VDI/VDE 2660“ darf in Veröffentlichungen und Datenblättern dann erfolgen, wenn die im Abschnitt 6 aufgeführten Kennwerte gemäß dieser Richtlinie ermittelt und angegeben worden sind.

Diese Richtlinie wurde im VDI/VDE-GMA Fachausschuss 2.17 „Faseroptische Messverfahren“ erarbeitet.

## Preliminary note

The content of this standard has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the standard VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this standard without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions ([www.vdi.de/richtlinien](http://www.vdi.de/richtlinien)) specified in the VDI Notices.

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this standard.

A catalogue of all available parts of this series of standards can be accessed on the Internet at [www.vdi.de/2660](http://www.vdi.de/2660).

## Introduction

Motivation for drafting this standard is the increasing commercial use of fibre Bragg grating (FBG) sensors for temperature measurement.

Generally valid standards for testing, characterization, and operation of fibre optic temperature sensors based on FBG are not yet available. This gap in the technical regulation includes ambiguities in the definition of parameters and their specification in data sheets. However, reliable measuring results can only be achieved, if the manufacturer and user understand the same regarding the terminology used and specifications given.

This standard is intended to provide guidance to the manufacturer of optical temperature sensors in the manufacture and description of the products, and to provide the user with a better understanding of their selection, use, and operation.

The aim of this standard is a publication with recommendations for carrying out temperature measurements in the temperature range between  $-260\text{ °C}$  and  $600\text{ °C}$ , and to correctly specify the measured values.

The statement “Technical data is in accordance with the standard VDI/VDE 2660” may be permitted in publications and data sheets, if the characteristic values stipulated in Section 6 were determined and specified according to this standard.

This standard was elaborated by the VDI/VDE-GMA Technical Committee 2.17 “Fibre optic measurement techniques”.

Diese Richtlinie wurde unter Beachtung der allgemein anerkannten Regeln der Terminologie auf dem Gebiet der Messtechnik erstellt. Es sei auf folgende Regelwerke verwiesen:

- Internationales Wörterbuch der Metrologie; Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM)
- Definition der Leistungsparameter und der Messunsicherheit (siehe DIN 1319 und DIN 55350-13)

Für die Angabe der Messunsicherheit wird auf GUM: „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“, JCGM 100:2008 mit den Ergänzungen JCGM 101:2008 und JCGM 102:2011 verwiesen. Insbesondere für die Kalibrierung und Validierung ist der Bezug zu ISO/IEC 17025 herzustellen.

Diese Richtlinie steht in thematischem Bezug zum internationalen Standard IEC 61757 des IEC Technical Committee 86C.

Bei der Anwendung dieser Richtlinie wird die Beachtung der für die Nutzung von Lichtwellenleitern nachfolgend genannten verbindlichen Richtlinien empfohlen:

- IEC 60793-1-30:2001
- IEC 60793-1-31:2001
- IEC 60793-1-32:2001
- IEC 60793-1-33:2001
- IEC 60793-1-34:2001

Weitere zur Beachtung empfohlene Normen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Für die Durchführung von Temperaturmessungen und die Angabe der Messunsicherheit werden Empfehlungen in dieser Richtlinie gegeben. In Anhang D werden typische Applikationsbeispiele vorgestellt.

Tabelle 1. Empfohlene technische Regeln

Anwendungsbereich	Nationale und harmonisierte Normen	Industrienorm
Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme	DIN EN ISO 9001	
Messmanagementsysteme; Anforderungen an Messprozesse und Messmittel	DIN EN ISO 10012	
Anforderungen an das Qualitätsmanagementsystem von Laboratorien	DIN EN ISO/IEC 17025	
Qualitätsmanagementsysteme; Grundlagen und Begriffe	DIN EN ISO 9000	

This standard has been developed in accordance with generally accepted rules of terminology in the field of metrology. It is referred to the following rules:

- International Vocabulary of Metrology; Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)
- Definition of performance parameters and measurement uncertainty (see DIN 1319 and DIN 55350-13)

In order to indicate the measurement uncertainty, reference is made to GUM: “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement” JCGM 100:2008 with the supplements JCGM 101:2008 and JCGM 102:2011. Especially for the calibration and validation, reference to ISO/IEC 17025 has to be established.

This standard is thematically related to the international standard IEC 61757 of the IEC Technical Committee 86C.

When applying this standard, it is recommended to consider the binding standards for the use of optical waveguides as follows:

- IEC 60793-1-30:2001
- IEC 60793-1-31:2001
- IEC 60793-1-32:2001
- IEC 60793-1-33:2001
- IEC 60793-1-34:2001

Other recommended standards are listed in Table 1.

For carrying out temperature measurements and the indication of measurement uncertainty, recommendations are given in this standard. Typical application examples are listed in Annex D.

Table 1. Recommended Technical Standards

Scope	National and harmonized standards	Industrial standard
Quality management systems; Requirements	DIN EN ISO 9001	
Measurement management systems; Requirements for measurement processes and measuring equipment	DIN EN ISO 10012	
General requirements for the competence of testing and calibration laboratories	DIN EN ISO/IEC 17025	
Quality management systems; Fundamentals and vocabulary	DIN EN ISO 9000	

Tabelle 1. Empfohlene technische Regeln (Fortsetzung)

Anwendungsbereich	Nationale und harmonisierte Normen	Industrienorm
Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen  • Teil 1: Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konformität oder Nichtkonformität mit Spezifikationen  • Teil 2: Anleitung zur Schätzung der Unsicherheit bei GPS-Messungen, bei der Kalibrierung von Messgeräten und bei der Produktprüfung	DIN EN ISO 14253-1  DIN EN ISO 14253-2	
Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration		EA-4/02 M: 2013
Grundlagen der Messtechnik	DIN 1319-1	

Table 1. Recommended technical standards (continued)

Scope	National and harmonized standards	Industrial standard
Geometrical product specifications (GPS); Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment  • Part 1: Decision rules for verifying conformity or nonconformity with specifications  • Part 2: Guidance for the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification	DIN EN ISO 14253-1  DIN EN ISO 14253-2	
Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration		EA-4/02 M: 2013
Fundamentals of metrology	DIN 1319-1	

### 1 Anwendungsbereich

Die vorliegende Richtlinie bezieht sich auf optische Temperaturfühler, deren Temperatursensor ein Faser-Bragg-Gitter (FBG) oder ein Faser-Bragg-Gitter-Array ist. Die FBG werden durch übliche Einschreibeverfahren, z.B. mittels holografischer Gitter, Excimer-Laser oder Femtosekunden-Laser eingeschrieben (siehe auch Abschnitt 4.1).

Zweck der Richtlinie ist es, die wichtigsten Merkmale und Kenngrößen von optischen Temperaturfühlern auf FBG-Basis zu definieren, die Verfahren zu deren Ermittlung zu benennen sowie Anschluss- und Prüfbedingungen zum Nachweis der Merkmale und Kenngrößen festzulegen.

Damit soll Folgendes erreicht werden:

- eindeutige und vollständige Erfassung der relevanten Leistungsparameter von optischen Temperaturfühlern unter Nutzung einer einheitlichen Terminologie
- leichtere Verständigung zwischen Herstellern und Anwendern
- Vergleichbarkeit, spezifische Abgrenzung und einheitliche und fundierte Beurteilung von Produkten unterschiedlicher Hersteller
- Förderung einer sachgerechten Auswahl von optischen Temperaturfühlern zur optimalen Lösung der jeweiligen Messprobleme

### 1 Scope

This standard relates to optical temperature sensors whose temperature sensor is a fibre Bragg grating (FBG) or a fibre Bragg grating array. The FBG are usually inscribed by methods, such as by holographic grating, excimer laser or femtosecond laser (see also Section 4.1).

The purpose of the standard is to define the key features and characteristics of FBG-based optical temperature sensors, to identify the methods for their determination and to establish coupling and testing conditions for the verification of features and characteristics.

This is to achieve the following:

- clear and complete description of the relevant performance parameters of optical temperature sensors using consistent terminology
- easier communication between manufacturers and users
- comparability, specific distinction and uniform and well-founded assessment of products from different manufacturers
- promotion of a proper selection of optical temperature sensors for the optimal solution of the respective measurement objectives

Die Angaben in der Richtlinie beziehen sich auf das Messen von vorrangig statischen Temperaturwerten mit optischen Temperaturfühlern auf Basis von FBG. Zeitliche Temperaturänderungen unterschiedlicher Geschwindigkeit können erfasst werden, wobei die Reaktion des Temperaturfühlers auf Temperaturänderungen anzugeben ist.

Der optische Temperaturfühler kann in unterschiedlicher konstruktiver Ausbildung auf verschiedene Weise eingesetzt werden und zwar als

- mechanisch entkoppelte Sensorfasern,
- oberflächenapplizierte Sensorfaser,
- Temperaturfühler, eingebettet in einen Feststoff oder in feststoffähnliche Materialien, sowie als
- Temperaturfühler in Fluiden.

Die zu verwendenden Messgeräte zur Bestimmung und zum Nachweis der Kenngrößen von optischen Temperaturfühlern werden hinsichtlich ihrer Leistungsparameter und Kenngrößen gesondert charakterisiert. Beim Einsatz für Aufgaben gemäß dieser Richtlinie müssen die ausgewählten Messgeräte anfänglich und in regelmäßigen Intervallen einer Kalibrierung gemäß der Norm ISO/IEC 17025 unterzogen werden. Diese Kalibrierung ist die notwendige Voraussetzung für die Angabe: „geprüft nach VDI/VDE 2660 Blatt 2“.

The details in the standard refer to the measurement of primarily static temperature values with optical temperature sensors based on FBG. Temporal temperature changes of different speed can be detected; the response of the temperature sensor to changes in temperature shall be specified.

The optical temperature sensor can be used in different engineering design and in various ways, as

- mechanically separated sensor fibres,
- surface-applied sensor fibres,
- temperature sensor, embedded in a solid or in solid-like materials, and
- temperature sensors in fluids.

The measuring devices to be used for determining and for verifying the characteristics of optical temperature sensors are characterized separately with regard to their performance parameters and characteristics. When applied to tasks in accordance with this standard, the selected measuring equipment shall be initially and at regular intervals subjected to calibration in accordance with the standard ISO/IEC 17025. This calibration is the necessary requirement for the statement: “tested in accordance with VDI/VDE 2660 Part 2”.