

VEREIN  
DEUTSCHER  
INGENIEURE

VERBAND DER  
ELEKTROTECHNIK  
ELEKTRONIK  
INFORMATIONSTECHNIK

Optische Messtechnik an Mikrotopografien

Kalibrieren von flächenhaft messenden  
Interferometern und Interferenzmikroskopen  
für die Formmessung

Optical metrology of microtopographies

Calibration of interferometers and interference micro-  
scopes for form measurement

VDI/VDE 2655

Blatt 1.3 / Part 1.3

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	Contents	Page
Vorbemerkung .....	2	Preliminary note.....	2
Einleitung.....	3	Introduction.....	3
<b>1 Anwendungsbereich.....</b>	<b>3</b>	<b>1 Scope.....</b>	<b>3</b>
1.1 Gerätebeschreibung.....	4	1.1 Description of instruments.....	4
1.2 Wellenlängenrelationen der interferometrischen Verfahren .....	4	1.2 Wavelength relations of interferometric methods.....	4
1.3 Kurzbeschreibung der Methoden .....	6	1.3 Brief description of the methods.....	6
<b>2 Normative Verweise .....</b>	<b>6</b>	<b>2 Normative references .....</b>	<b>6</b>
<b>3 Begriffe .....</b>	<b>7</b>	<b>3 Terms and definitions .....</b>	<b>7</b>
<b>4 Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>8</b>	<b>4 Symbols and abbreviations .....</b>	<b>8</b>
<b>5 Einflussgrößen bei der Gerätekalisierung für die Formmessung.....</b>	<b>11</b>	<b>5 Parameters which affect the calibration of instruments for form measurements.....</b>	<b>11</b>
5.1 Strukturübertragung durch Interferometer .....	11	5.1 Pattern transfer using interferometers .....	11
5.2 Geneigte Flächen .....	18	5.2 Inclined surfaces .....	18
5.3 Verfahrensbedingte Messabweichungen .....	19	5.3 Method-related measurement errors .....	19
<b>6 Mess- und Auswertebedingungen .....</b>	<b>23</b>	<b>6 Measurement and evaluation requirements .....</b>	<b>23</b>
6.1 Einstellparameter .....	23	6.1 Parameter settings.....	23
6.2 Hinweise zu zusammengesetzten Messungen (Stitching) .....	24	6.2 Information regarding composite measurements (stitching) .....	24
6.3 Filter.....	25	6.3 Filters.....	25
6.4 Zuordnungsverfahren (Assoziierung) .....	27	6.4 Mapping procedure (association).....	27
6.5 Ausgewertete Bereiche (Segmentierung).....	27	6.5 Evaluated areas (segmentation) .....	27
6.6 Auswerteverfahren für Höhendifferenzen.....	28	6.6 Methods for evaluating height differences .....	28
<b>7 Kalibrierung.....</b>	<b>29</b>	<b>7 Calibration.....</b>	<b>29</b>
7.1 Skalierung der horizontalen Achsen (x, y) .....	29	7.1 Scaling of the horizontal axes (x, y).....	29
7.2 Vergleich von Profilmessung und flächiger Messung.....	29	7.2 Comparison of profile measurement and area-related measurement .....	29
7.3 Skalierung der vertikalen Achse (z) .....	30	7.3 Scaling of the vertical axis (z).....	30

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

Fachbereich Fertigungsmesstechnik

VDI/VDE-Handbuch Fertigungsmesstechnik  
VDI/VDE-Handbuch Optische Technologien  
VDI-Handbuch Produktionstechnik und Fertigungsverfahren, Band 3: Betriebsmittel

Inhalt	Seite
<b>8 Messunsicherheit</b> .....	31
8.1 Modellbeschreibung.....	31
8.2 Beiträge zur Punktunsicherheit horizontal .....	32
8.3 Beiträge zur Punktunsicherheit vertikal .....	35
<b>9 Ergebnisbericht</b> .....	38
<b>Anhang A Normale</b> .....	39
A1 Tiefeneinstell- und Stufenhöhennormale .....	39
A2 Ebenheitsnormal .....	42
A3 Auflösungsnormal.....	42
A4 Profilhaftes Chirp-Normal (2d).....	43
A5 Nomenklatur der Normale .....	44
<b>Anhang B Instrumentenübertragungsfunktion   in der Praxis</b> .....	47
Schrifttum .....	49

Contents	Page
<b>8 Measurement uncertainty</b> .....	31
8.1 Description of the model .....	31
8.2 Factors contributing to the horizontal uncertainty of points .....	32
8.3 Factors contributing to the vertical uncertainty of points .....	35
<b>9 Results report</b> .....	38
<b>Annex A Standards</b> .....	39
A1 Depth setting and step height standards .....	39
A2 Flatness standard.....	42
A3 Resolution standard .....	42
A4 Profiled chirp standard (2d).....	43
A5 Standards nomenclature.....	44
<b>Annex B Instrument transfer function   in practice</b> .....	47
Bibliography .....	49

### 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.

Eine Liste der aktuell verfügbaren Blätter dieser Richtlinienreihe ist im Internet abrufbar unter [www.vdi.de/2655](http://www.vdi.de/2655).

### 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.

A catalogue of all available parts of this series of standards can be accessed on the Internet at [www.vdi.de/2655](http://www.vdi.de/2655).

## Einleitung

Interferenzmikroskopische Verfahren sind ein wichtiger Bestandteil der Messtechnik zur Bestimmung der Mikrotopografie von Oberflächen geworden. Sie werden zunehmend neben der Messung einfacher Stufenhöhen auch zum Messen von Formelementen eingesetzt. Dabei sind Formelemente wie in VDI/VDE 2617 Blatt 2.2 und DIN EN ISO 17450-1 gemeint, aber mit Abmessungen, die bei der mikroskopischen Abbildung in einem einzigen Bild aufgenommen werden. Daher werden Begriffe, Definitionen und Kenngrößen aus dem makroskopischen Bereich übernommen, aber die Mess- und Auswertbedingungen der interferometrischen Messtechnik beachtet.

Diese Richtlinie ist entsprechend Tabelle 1 in die Richtlinienreihe VDI/VDE 2655 zur optischen Messtechnik an Mikrotopografien eingegliedert.

Tabelle 1. Gliederung der Reihe VDI/VDE 2655

Blatt	Titel
1.1	Optische Messtechnik an Mikrotopografien; Kalibrieren von Interferenzmikroskopen und Tiefeneinstellnormalen für die Rauheitsmessung
1.2	Optische Messtechnik an Mikrotopografien; Kalibrieren von konfokalen Mikroskopen und Tiefeneinstellnormalen für die Rauheitsmessung
1.3	<b>Optische Messtechnik an Mikrotopografien; Kalibrieren von flächenhaft messenden Interferometern und Interferenzmikroskopen für die Formmessung</b>
1.4	Optische Messtechnik an Mikrotopografien; Kalibrieren von konfokalen Mikroskopen für die Formmessung (in Arbeit)
2.1	Optische Messtechnik an Mikrotopografien; Anwendung der Verfahren zur Rauheitsmessung (geplant)
2.2	Optische Messtechnik an Mikrotopografien; Anwendung der Verfahren zur Formmessung (geplant)

## 1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie dient dazu, Interferenzmikroskope in ihren messtechnischen Eigenschaften zum Messen der Oberflächen von Formelementen zu charakterisieren. Darin eingeschlossen sind die Rückführung und die Berechnung der Messunsicherheit beim Messen von Form-Kenngrößen.

Die hier beschriebenen Verfahren sind zusätzlich zu den in der VDI/VDE 2655 Blatt 1.1 genannten Interferenzmikroskopen auch auf Interferometer anwendbar, deren Messfelder Abmessungen bis zu

## Introduction

Interference microscopy methods have become an important element of the measuring technology used to determine the microtopography of surfaces. Apart from being used for measuring simple surface step heights, these methods are also being increasingly used to measure form elements. The form elements referred to in this standard are form elements as defined in VDI/VDE 2617 Part 2.2 and DIN EN ISO 17450-1, and with dimensions small enough to be captured in a single microscope image. Therefore, terms, definitions and parameters are adopted from macroscopic measuring technology, while at the same time observing the measurement and evaluation requirements of interferometric metrology.

This standard has been incorporated into the VDI/VDE 2655 series of standards dealing with the optical measurement of micro-topographies, as shown in Table 1.

Table 1. Structure of the series VDI/VDE 2655

Part	Title
1.1	Optical measurement and microtopographies; Calibration of interference microscopes and depth measurement standards for roughness measurement
1.2	Optical measurement of microtopographies; Calibration of confocal microscopes and depth setting standards for roughness measurement
1.3	<b>Optical metrology of microtopographies; Calibration of interferometers and interference microscopes for form measurement</b>
1.4	Optical measurement of microtopographies; Calibration of confocal microscopes for form measurement (drafting in progress)
2.1	Optical measurement of microtopographies; Application of roughness measurement methods (planned)
2.2	Optical measurement of microtopographies; Application of form measurement methods (planned)

## 1 Scope

This standard describes the characteristics of the metrological properties of interference microscopes required for measuring surfaces of form elements. These include the traceability and calculation of measurement uncertainty when measuring characteristic form parameters.

The methods described in this standard are applicable to the interference microscopes mentioned in VDI/VDE 2655 Part 1.1 as well as to interferometers with measuring field diameters of up to approx.

einem Durchmesser von ca. 20 mm haben können. In diesem Zusammenhang ist auch die zurzeit noch in Arbeit befindliche Norm ISO 25178-700 zu beachten.

Als Oberfläche gilt hier die letzte Grenzfläche zwischen dem Festkörper und der umgebenden Luft; das heißt, Einflüsse von Schichtsystemen und von Materialinhomogenitäten werden nicht berücksichtigt. Bei beschichteten Oberflächen werden hier nur nicht transparente oder nur nanometerdicke transparente Schichten, z.B. Oxide im einstelligen Nanometerbereich, betrachtet.

Das Zusammensetzen (Stitching) von Messdaten und das Messen der Eigenschaften von Formelementen zwischen auseinanderliegenden Bildern werden hier nicht behandelt. An den erforderlichen Stellen werden gegebenenfalls Hinweise gegeben.

### 1.1 Gerätebeschreibung

Typische Strahlengänge für Interferometer sind in Bild 1 gezeigt. Strahlengänge für Interferenzmikroskope sind in Abschnitt 4.2 der VDI/VDE 2655 Blatt 1.1 aufgeführt.

Im Gegensatz zu den Strahlengängen in Abschnitt 4.2 der VDI/VDE 2655 Blatt 1.1 erzeugt die Abbildungsoptik hier meistens ein verkleinertes Bild der Oberfläche auf dem Kamera-Chip.

Die Geräte können auch gekrümmte Flächen messen, wenn vor der Probe und/oder der Referenzfläche eine Strahlformungsoptik eingefügt wird.

### 1.2 Wellenlängenrelationen der interferometrischen Verfahren

Bei Interferenzmikroskopen ist üblicherweise das Abtastintervall  $D_x$  kleiner als die Rayleigh-Auflösung  $\delta$ . Das Abtastintervall  $D_x$  ist der Pixelabstand der Kamera geteilt durch den Abbildungsmaßstab.

Bei flächenhaft messenden Interferometern ist dagegen aufgrund der Abmessungen der Gesichtsfelder und der realisierbaren Pixelzahlen auf dem Empfängerchip das Abtastintervall  $D_x$  in der Größenordnung der Rayleigh-Auflösung  $\delta$ . Auf ein einzelnes Pixel können mehrere Perioden einer feinen Struktur fallen, die zwar optisch noch aufgelöst wird, aber keine Modulation im Abtastsignal mehr hervorruft. In Bild 2 sind diese Relationen in Analogie zur Nomenklatur der DIN EN ISO 25178-2 für zwei typische Gerätekonfigurationen bei der interferometrischen Messung dargestellt.

20 mm. In this context, ISO 25178-700, which is currently still in development, should also be taken into account.

In this context, the term surface is defined as being the boundary layer between the solid object and the air surrounding it; i.e. influences of layered systems and of material inhomogeneities are not taken into consideration. With regard to coated surfaces, only opaque layers or transparent layers with a thickness of only a few nanometres, e.g. oxides with a thickness of less than 10 nanometres, re considered here.

This standard does not deal with the stitching of measurement data and the measurement of form element properties between separate images. Suitable references are made where necessary.

### 1.1 Description of instruments

Figure 1 shows typical optical paths of interferometers. Optical paths of interference microscopes are described in Section 4.2 of VDI/VDE 2655 Part 1.1.

As opposed to the optical paths in Section 4.2 of VDI/VDE 2655 Part 1.1, the imaging optics in the context of this standard create a size-reduced image of the surface on the camera chip in most cases.

The instruments are also able to measure curved surfaces, provided that a beam-shaping lens system is installed over the sample and/or the reference surface.

### 1.2 Wavelength relations of interferometric methods

In interference microscopes, the sampling interval  $D_x$  is usually smaller than the Rayleigh resolution  $\delta$ . The sampling interval  $D_x$  is the pixel pitch of the camera divided by the image scale.

For interferometers which measure surface areas, however, the sampling interval  $D_x$  is of the order of magnitude of the Rayleigh resolution  $\delta$  owing to the dimensions of the fields of view and the feasible pixel counts on the receiver chip. A single pixel can cover several periods of a fine structure which is still resolved optically but no longer leads to a modulation of the sampling signal. Figure 2 shows these relations, by analogy with the nomenclature in DIN EN ISO 25178-2, for two typical instrument configurations used for interferometric measurements.

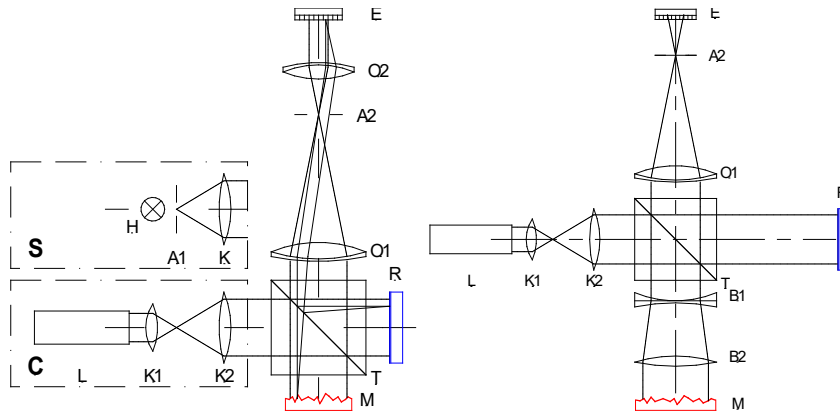


Bild 1. Typische Strahlengänge in Interferometern zur Formmessung

Figure 1. Typical optical paths in interferometers used for form measurement

links: ohne Strahlformungsoptik  
rechts: mit Strahlformungsoptik B1 und B2 zwischen Strahlteiler T und Messobjekt M

left: without beam-shaping lens system  
right: with beam-shaping lens system B1 and B2 between beam splitter T and object M to be measured

- A1, A2 Blenden
- C kohärentes Beleuchtungssystem
- S kurzkohärentes Beleuchtungssystem
- E Bildempfänger
- H kurzkohärente Lichtquelle
- K Kollimatorlinse
- K1, K2 Strahlaufweitungsoptik
- L Laser
- O1, O2 Abbildungsoptik
- R Referenzspiegel

- A1, A2 aperture stops
- C coherent illumination system
- S short coherent illumination system
- E image receiver
- H short-coherent light source
- K collimating lens
- K1, K2 beam expander lenses
- L laser
- O1, O2 imaging lenses
- R reference mirror

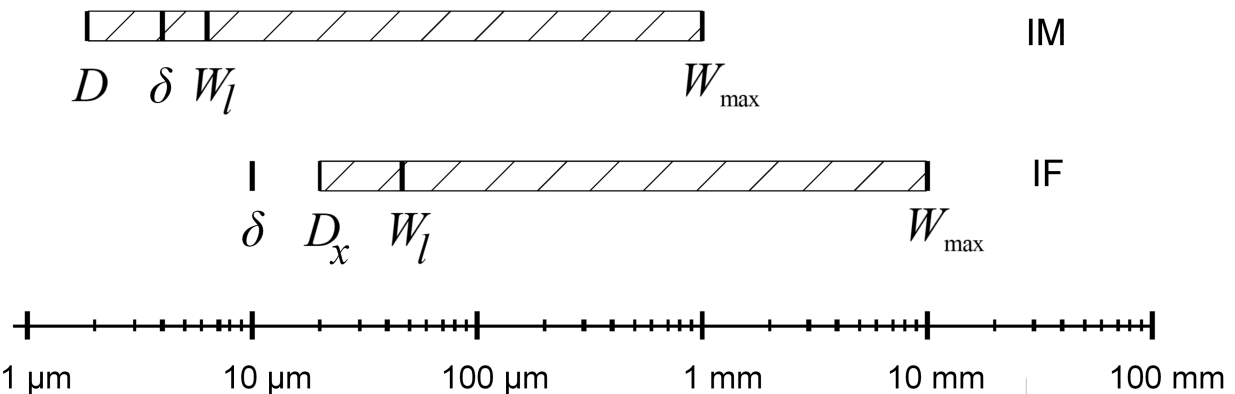


Bild 2. Wellenlängenrelationen der interferometrischen Verfahren / Figure 2. Wavelength relations of interferometric methods

Mit dem schraffierten Bereich wurde eine Pixelzahl von 1000 zugrunde gelegt. Es gilt typischerweise  $W_{max} \approx B_F$ ,  $W_l \geq 2\delta$  beim Interferenzmikroskop (IM) bzw.  $W_l \geq 2D_x$  beim Interferometer (IF). / The shaded area represents a pixel count of 1000.  $W_{max} \approx B_F$ ,  $W_l \geq 2\delta$  typically applies to an interference microscope (IM) and  $W_l \geq 2D_x$  to an interferometer (IF).

- $D_x$  Abtastintervall / sampling interval
- $\delta$  Rayleigh-Auflösung / Rayleigh resolution
- $W_l$  Breitenbegrenzung für die volle Höhenauflösung / width limit for full vertical resolution
- $W_{max}$  maximal erfassbare räumliche Wellenlänge, die durch die Messfeldbreite  $B_F$  bestimmt wird / maximum measurable spatial wavelength, determined by the measurement field width  $B_F$
- $B_F$  Messfeldbreite / measurement field width

### 1.3 Kurzbeschreibung der Methoden

Die Geräte werden mithilfe von Formnormalen charakterisiert, dabei werden Merkmale, wie maximal messbarer Winkel der Oberflächenneigung, minimal messbare Krümmung der Oberfläche, bestimmt. Diese ergänzen die Kalibrierung und die Gerätemerkmale, die nach VDI/VDE 2655 Blatt 1.1 ermittelt werden.

Durch die Bestimmung von Messwerten an Grundformelementen (z.B. Radius und Mittelpunkt von Kreisabschnitten, Höhenunterschiede, Neigung von Ebenen, Abstand von Geradenschnittpunkten) von kalibrierten Formnormalen und den Vergleich mit deren kalibrierten Werten werden die Geräte für diese Anwendungsfälle kalibriert.

Weiterhin werden an Normalen mit dafür spezifizierten Grundformelementen (Zylinder und schiefe Ebene) Einflussgrößen quantifiziert, aus denen sich einzelne Messunsicherheitskomponenten ergeben.

## 2 Normative Verweise

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieser Richtlinie erforderlich:

- DIN EN ISO 25178-2:2012-09 Geometrische Produktspezifikation (GPS); Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft; Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen
- DIN EN ISO 25178-3:2012-11 Geometrische Produktspezifikation (GPS); Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft; Teil 3: Spezifikationsoperatoren
- DIN EN ISO 25178-70:2014-06 Geometrische Produktspezifikation (GPS); Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft; Teil 70: Maßverkörperungen
- DIN EN ISO 25178-600:2019-12 Geometrische Produktspezifikation (GPS); Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft; Teil 600: Messtechnische Merkmale für flächentopographische Messverfahren
- DIN EN ISO 25178-601:2011-01 Geometrische Produktspezifikation (GPS); Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft; Teil 601: Merkmale von berührend messenden Geräten (mit Taster)
- DIN EN ISO 25178-603:2014-02 Geometrische Produktspezifikation (GPS); Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft; Teil 603: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (phasenschiebende interferometrische Mikroskopie)
- DIN EN ISO 25178-604:2013-12 Geometrische Produktspezifikation (GPS); Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft; Teil 604: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (Weißlicht-Interferometrie)

### 1.3 Brief description of the methods

The instruments are characterised with the help of form standards. This procedure involves determination of characteristics such as the maximum measurable surface slope angle and minimum measurable surface curvature. These characteristics complement the calibration and instrument characteristics determined as described in VDI/VDE 2655 Part 1.1.

The instruments are calibrated for these application cases by determining fundamental form element measurement values (e.g. radius and centre of circular segments, differences in height, slope of flat surfaces, distance between points of intersection of straight lines) of calibrated form standards and comparing them with their known values.

Furthermore, influencing factors which lead to individual components of measurement uncertainties are quantified using standards with fundamental form elements (cylinder and inclined plane) specified for this purpose.

## 2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this standard:

- DIN EN ISO 25178-2:2012-09 Geometrical product specifications (GPS); Surface texture: Areal; Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters
- DIN EN ISO 25178-3:2012-11 Geometrical product specifications (GPS); Surface texture: Areal; Part 3: Specification operators
- DIN EN ISO 25178-70:2014-06 Geometrical product specification (GPS); Surface texture: Areal; Part 70: Material measures
- DIN EN ISO 25178-600:2019-12 Geometrical product specifications (GPS); Surface texture: Areal; Part 600: Metrological characteristics for areal-topography measuring methods
- DIN EN ISO 25178-601:2011-01 Geometrical product specifications (GPS), Surface texture: Areal; Part 601: Nominal characteristics of contact (stylus) instruments
- DIN EN ISO 25178-603:2014-02 Geometrical product specifications (GPS), Surface texture: Areal; Part 603: Nominal characteristics of non-contact (phase-shifting interferometric microscopy) instruments
- DIN EN ISO 25178-604:2013-12 Geometrical product specification (GPS), Surface texture: Areal; Part 604: Nominal characteristics of non-contact (coherence scanning interferometry) instruments

VDI/VDE 2655 Blatt 1.1:2008-03 Optische Messtechnik an Mikrotopografien; Kalibrieren von Interferenzmikroskopen und Tiefeneinstellnormalen für die Rauheitsmessung

VDI/VDE 2655 Part 1.1:2008-03 Optical measurement and microtopographies, Calibration of interference microscopes and depth measurement standards for roughness measurement