

DIN ISO 14999-4

ICS 37.020

Ersatz für
DIN ISO 14999-4:2008-12**Optik und Photonik –
Interferometrische Messung von optischen Elementen und Systemen –
Teil 4: Interpretation und Beurteilung der Toleranzen nach ISO 10110
(ISO 14999-4:2015)**

Optics and photonics –
Interferometric measurement of optical elements and optical systems –
Part 4: Interpretation and evaluation of tolerances specified in ISO 10110 (ISO 14999-4:2015)

Optique et photonique –
Mesurage interférométrique de composants et de systèmes optiques –
Partie 4: Directives pour l'évaluation des tolérances spécifiées dans l'ISO 10110
(ISO 14999-4:2015)

Gesamtumfang 35 Seiten

DIN-Normenausschuss Feinmechanik und Optik (NAFuO)

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort.....	3
Nationaler Anhang NA (informativ) Literaturhinweise	4
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich.....	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
3.1 Mathematische Definitionen	6
3.2 Definitionen von optischen Funktionen.....	7
3.3 Definitionen von Werten basierend auf den in 3.2 definierten optischen Funktionen.....	10
3.4 Definition von Zernike-Polynomen	12
3.5 Definitionen der Funktionen und Terme für Anstiegsabweichungstoleranzen	12
3.6 Definitionen der Toleranzwerte für die Anstiegsabweichung.....	14
4 Bestimmung von Oberflächenformabweichungen oder Wellenfrontdeformationen aus den interferometrischen Messungen	17
4.1 Prüfbereiche.....	17
4.2 Größen.....	17
4.3 Wellenfrontdeformationen für einfachen Durchgang (en: single-pass).....	17
4.4 Wellenfrontdeformationen für doppelten Durchgang (en: double-pass).....	17
4.5 Oberflächenformabweichung	17
4.6 Umrechnung in andere Wellenlängen	18
5 Darstellung der gemessenen Wellenfrontabweichungen mittels Zernike-Koeffizienten	18
6 Tolerierung der Anstiegsabweichung.....	18
6.1 Eindimensionale Messung der Anstiegsabweichung	19
6.2 Zweidimensionale Messung der Anstiegsabweichung	21
Anhang A (normativ) Visuelle Interferogrammauswertung	23
A.1 Allgemeines	23
A.1.1 Vorbemerkungen.....	23
A.1.2 Interferometrische Kippung (Keilinterferenzen)	23
A.1.3 Bestimmung des Vorzeichens der Deformation.....	23
A.2 Ermittlung der Power-Abweichung und der Unregelmäßigkeit.....	24
A.2.1 Allgemeines	24
A.2.2 Auswertung von Interferogrammen ohne Kippung	24
A.2.3 Auswertung von Interferogrammen mit Kippung.....	26
A.2.4 Ungewöhnliche Formen der Unregelmäßigkeit.....	27
A.3 Bestimmung der rotationsinvarianten Unregelmäßigkeit.....	28
A.4 Nicht kreisförmige Prüfbereiche	29
A.5 Zielaberrationen	31
Anhang B (normativ) Zernike-Polynome	32
Literaturhinweise.....	35

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (ISO 14999-4:2015) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 172/SC 1 „Fundamental standards“ (Sekretariat: DIN, Deutschland) unter Beteiligung deutscher Experten ausgearbeitet. Für die deutsche Mitarbeit ist der DIN-Normenausschuss Feinmechanik und Optik (NAFuO), Arbeitsausschuss NA 027-01-02 AA „Grundnormen für die Optik“, Arbeitskreis „Messverfahren für die Optik“, zuständig.

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

ISO 14999 besteht mit dem Haupttitel *Optics and photonics — Interferometric measurement of optical elements and optical systems* aus folgenden Teilen

- *Part 1: Terms, definitions and fundamental relationships*
- *Part 2: Measurement and evaluation techniques*
- *Part 3: Calibration and validation of interferometric test equipment and measurements*
- *Part 4: Interpretation and evaluation of tolerances specified in ISO 10110*

Die Teile 1, 2 und 3 sind als ISO/Technische Reports veröffentlicht.

Für die in Abschnitt 2 zitierten Internationalen Normen wird im Folgenden auf die entsprechenden Deutschen Normen hingewiesen:

ISO 10110-5	siehe DIN ISO 10110-5
ISO 10110-14	siehe DIN ISO 10110-14

Änderungen

Gegenüber DIN ISO 14999-4:2008-12 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Toleranzen von zylindrischen und torischen Wellenfronten ergänzt;
- b) Darstellung der gemessenen Wellenfrontdeformation mittels Zernike-Koeffizienten ergänzt;
- c) Tolerierung der Anstiegsabweichung ergänzt;
- d) Name der Größe A wurde geändert in Power-Abweichung, weitere Informationen siehe 3.3.1, Anmerkung 2 zum Begriff.

Frühere Ausgaben

DIN 3140: 1958-10
 DIN 3140-5: 1969-06, 1978-10
 DIN ISO 10110-5: 2000-02
 DIN ISO 10110-14: 2004-02
 DIN ISO 14999-4: 2008-12

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN ISO 4287, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren — Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4287:1997 + Cor 1:1998 + Cor 2:2005 + Amd 1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 4287:1998 + AC:2008 + A1:2009*

DIN EN ISO 25178 (alle Teile), *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft*

DIN ISO 10110-5, *Optik und Photonik — Erstellung von Zeichnungen für optische Elemente und Systeme — Teil 5: Oberflächenformtoleranzen*

DIN ISO 10110-14, *Optik und Photonik — Erstellung von Zeichnungen für optische Elemente und Systeme — Teil 14: Toleranzen für Wellenfrontdeformationen*

Einleitung

Dieser Teil von ISO 14999 liefert den theoretischen Hintergrund zur Bestimmung der Angaben für ISO 10110-5 und/oder ISO 10110-14.

Eine Tabelle mit einem Vergleich von ISO 10110-5 und ISO 14999-4 hinsichtlich sich entsprechender Nomenklatur, Funktionen und Werte ist in ISO 10110-5, Anhang B, gegeben.

ISO 10110-5 bezieht sich auf Formabweichungen einer optischen Oberfläche^{N1)} und ermöglicht die Festlegung von Toleranzen für bestimmte Arten von Oberflächenformabweichungen ausgedrückt in Nanometer.

ISO 10110-14 bezieht sich auf die Deformationen einer Wellenfront durch ein optisches System im einfachen Durchgang und liefert eine Methode zum Spezifizieren von gleichartigen Typen von Deformationen hinsichtlich optischer „Wellenlängen“.

Es ist allgemein üblich, die Oberflächenformabweichung interferometrisch als die Wellenfrontdeformation zu messen, die bei einfacher Reflexion an der optischen Oberfläche bei senkrechtem Einfall (90° zur Oberfläche) entsteht. Daher ist es möglich, die interferometrische Auswertung einheitlich darzustellen, so dass sie für beide Anwendungen genutzt werden kann. Ein „Interferenzstreifen“ (wie in ISO 10110-5 definiert) entspricht einer Oberflächenformabweichung, die eine Deformation der reflektierten Wellenfront von einer Wellenlänge erzeugt.

Bestimmte Skalierungsfaktoren sind entsprechend dem interferometrischen Aufbau anzuwenden – z. B. wenn der Prüfling im einfachen oder doppelten Durchgang gemessen wird.

Wegen der möglichen Verwechslungsgefahr und der Gefahr von Fehlinterpretationen ist möglichst die Einheit Nanometer anstelle von „Interferenzstreifen“ oder „Wellenlängen“ für die Angabe der Oberflächenformabweichung oder der Wellenfrontdeformation zu verwenden. Wenn die Einheit „Interferenzstreifen“ oder „Wellenlänge“ verwendet wird, muss auch die zugehörige Wellenlänge festgelegt werden.

^{N1)}Nationale Fußnote: Im deutschen Sprachgebrauch bisher überlicherweise „Passfehler“ genannt.

Optik und Photonik — Interferometrische Messung von optischen Elementen und Systemen — Teil 4: Interpretation und Beurteilung der Toleranzen nach ISO 10110

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von ISO 14999 gilt für die Interpretation von Daten aus der interferometrischen Messung optischer Bauteile.

Dieser Teil von ISO 14999 gibt Definitionen für die Funktionen und Werte, die zur Spezifikation der Zeichnungsangaben optischer Bauteile und Systeme nach ISO 10110-5 und/oder ISO 10110-14 benötigt werden an. Ein Vergleich von ISO 10110-5 und 14999-4 hinsichtlich sich entsprechender Nomenklatur, Funktionen und Werte ist in ISO 10110-5, Anhang B, gegeben. Er liefert auch eine Anleitung für die interferometrische Auswertung durch visuelle Analyse.

2 Normative Verweisungen

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

ISO 10110-5, *Optics and photonics — Preparation of drawings for optical elements and systems — Part 5: Surface form tolerances*

ISO 10110-14, *Optics and photonics — Preparation of drawings for optical elements and systems — Part 14: Wavefront deformation tolerance*

ISO/TR 14999-2, *Optics and photonics — Interferometric measurement of optical elements and optical systems — Part 2: Measurement and evaluation techniques*

3 Begriffe

3.1 Mathematische Definitionen

3.1.1

Funktion

mathematische Darstellung der gemessenen Wellenfrontdeformation und der Komponenten ihrer Zerlegung

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Funktionen in diesem Teil von ISO 14999 sind skalare Funktionen.

3.1.2

peak-to-valley-Wert

$PV(f)$

<einer Funktion f > Höchstwert der Funktion innerhalb des relevanten Bereichs minus Mindestwert der Funktion innerhalb des relevanten Bereichs

3.1.3

quadratischer Mittelwert

$\text{rms}(f)$

<einer Funktion f in einem gegebenen Bereich A > ein nach einem der beiden folgenden Integralausdrücke bestimmter Wert:

a) Mit den kartesischen Koordinaten x und y als Variablen

$$\text{rms}(f) = \left[\frac{\int_x \int_y [f(x, y)]^2 dx dy}{\int_x \int_y dx dy} \right]^{1/2} \quad \text{mit } (x, y) \in A$$

b) Mit den Polarkoordinaten r und θ als Variablen

$$\text{rms}(f) = \left[\frac{\int_\theta \int_r [f(r, \theta)]^2 r dr d\theta}{\int_\theta \int_r r dr d\theta} \right]^{1/2} \quad \text{mit } (r, \theta) \in A$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Dieses Integral darf durch die Standardabweichung angenähert werden, vorausgesetzt, der Mittelwert der Wellenfront (en: piston) wird subtrahiert und die Auflösung der Messung ist angegeben und hinreichend genau.

3.2 Definitionen von optischen Funktionen

ANMERKUNG 1 Betreffend den Zusammenhang zwischen interferometrischen Messungen und Oberflächenformabweichungen und Wellenfrontdeformation siehe Abschnitt 4.

ANMERKUNG 2 Die in diesem Unterabschnitt angegebenen optischen Funktionen werden entweder für rotationsinvariante (sphärische oder asphärische) Wellenfronten (abgebildet in Bild 1) oder zylindrische Wellenfronten (abgebildet in Bild 2) verwendet. Die zueinander korrespondierenden Funktionen sind zusammengefasst, als erstes die Funktionen für rotationsinvariante Wellenfronten und dann die Funktionen für zylindrische Wellenfronten. Die Funktionen für rotationsinvariante Wellenfronten sind in Bezug auf die ISO 14999-4:2007 unverändert.

ANMERKUNG 3 Der Begriff zylindrische Wellenfront wird in diesem Fall als ein Synonym für kreiszylindrische, nicht-kreiszylindrische und torische Wellenfronten verwendet. Die Funktionen können auch für allgemeine Wellenfronten verwendet werden, die den zylindrischen oder torischen Wellenfronten ähneln.

3.2.1

gemessene Wellenfrontdeformation

f_{MWD}

Funktion, die den Abstand zwischen einer gemessenen Wellenfront und der nominellen theoretischen Wellenfront beschreibt; der Abstand ist senkrecht zur nominellen theoretischen Wellenfront gemessen

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe Bild 1a) und Bild 2a).

Anmerkung 2 zum Begriff: Im Fall der taktilen Messung, wo die Messwerte üblicherweise entlang der z -Richtung bestimmt werden, müssen die Messwerte in Wellenfrontdeformation f_{MWD} umgerechnet werden (Abstand senkrecht zur theoretischen Oberfläche).

3.2.2

Kippung

f_{TLT}

Ebenenfunktion mit der besten (im Sinne eines rms-Ausgleichs) linearen Näherung der gemessenen Wellenfrontdeformation f_{MWD}

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe Bild 1b) und Bild 2b).

3.2.3**Verdrehfunktion beschreibt die Dreh-Fehlausrichtung für zylindrische Wellenfronten** f_{TWST}

Funktion der Sattelform, welche zur Korrektur der Dreh-Fehlausrichtung genutzt wird

$$f_{\text{TWST}}(x, y) = \text{const.} * x * y$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe Bild 2c).

Anmerkung 2 zum Begriff: Eine Dreh-Fehlausrichtung (en: twist) zwischen der zylindrischen Achse der Testwelle und der Fläche (beziehungsweise zwischen dem Testobjekt und der Optik, welche die zylindrische oder torische Phasenfront generiert oder kompensiert) führt zu einem additiven Term in Form einer Sattelfläche. Dieser Anteil könnte durch sorgfältiges Justieren beseitigt oder minimiert werden. In den meisten Fällen, ist es jedoch einfacher diesen Term mathematisch zu entfernen.

3.2.4**Wellenfrontdeformation** f_{WD} Funktion nach Subtraktion der Kippung f_{TLT} von der gemessenen Wellenfrontdeformation f_{MWD}

$$f_{\text{WD}} = f_{\text{MWD}} - f_{\text{TLT}}$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe Bild 1c).

3.2.5**Wellenfrontdeformation für zylindrische Wellenfronten** $f_{\text{WD,CY}}$ Funktion nach Subtraktion der Kippung f_{TLT} und f_{TWST} von der gemessenen Wellenfrontdeformation f_{MWD}

$$f_{\text{WD,CY}}(x, y) = f_{\text{MWD}}(x, y) - f_{\text{TLT}}(x, y) - f_{\text{TWST}}(x, y)$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe Bild 2d).

3.2.6**bestangepasste Kugelfläche** f_{WS} Funktion einer Kugelfläche, die die Wellenfrontdeformation f_{WD} bestmöglich annähert (im Sinne eines rms-Ausgleichs)

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe Bild 1d).

3.2.7**bestangepasste Kreiszylinderfläche** $f_{\text{WC,x}}, f_{\text{WC,y}}$ Funktionen einer Kreiszylinderfläche, die die Wellenfrontdeformation $f_{\text{WD,CY}}$ bestmöglich annähert (im Sinne eines rms-Ausgleichs)

$$f_{\text{WC,x}}(x, y) = R_{\text{x,fit}} - \sqrt{R_{\text{x,fit}}^2 - x^2} + \text{const.}$$

$$f_{\text{WC,y}}(x, y) = R_{\text{y,fit}} - \sqrt{R_{\text{y,fit}}^2 - y^2} + \text{const.}$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe Bild 2e) und Bild 2f).

3.2.8**Unregelmäßigkeit der Wellenfront** f_{WI} Funktion nach Subtraktion der bestangepassten Kugelfläche f_{WS} von der Wellenfrontdeformation f_{WD}

$$f_{WI} = f_{WD} - f_{WS}$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe Bild 1e).

3.2.9**Unregelmäßigkeit der Wellenfront für zylindrische Wellenfronten** $f_{WI,CY}$ Funktion nach Subtraktion der bestangepassten Kreiszylinderflächen $f_{WC,x}$ und $f_{WC,y}$

$$f_{WI,CY}(x,y) = f_{WD,CY}(x,y) - f_{WC,x}(x,y) - f_{WC,y}(x,y)$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe Bild 2g).

3.2.10**bestangepasste Asphäre an die Wellenfront** f_{WRI} rotationsinvariante asphärische Funktion, die die Unregelmäßigkeit der Wellenfront f_{WI} bestmöglich annähert (im Sinne eines rms-Ausgleichs)

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe Bild 1f).

3.2.11**bestangepasste Nicht-Kreiszylinderfläche an die Wellenfront** $f_{WTI,x}, f_{WTI,y}$ translationsinvariante nicht-kreiszylindrische Funktion, die die Unregelmäßigkeit der Wellenfront für zylindrische Wellenfronten $f_{WI,CY}$ in x- bzw. y-Richtung bestmöglich annähert (im Sinne eines rms-Ausgleichs)

$$f_{WTI,x}(x,y) = f_{WTI,x}(x)$$

$$f_{WTI,y}(x,y) = f_{WTI,y}(y)$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe Bild 2h) und Bild 2i).

3.2.12**rotationsvariante Wellenfrontabweichung** f_{WRV} Funktion nach Subtraktion der bestangepassten Asphäre an die Wellenfront f_{WRI} von der Unregelmäßigkeit der Wellenfront f_{WI}

$$f_{WRV} = f_{WI} - f_{WRI}$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe Bild 1g).

3.2.13**translationsvariante Wellenfrontabweichung** f_{WTV} Funktion nach Subtraktion der bestangepassten Nicht-Kreiszylinderflächen an die Wellenfront $f_{WTI,x}$ und $f_{WTI,y}$

$$f_{WTV} = f_{WI,CY} - f_{WTI,x} - f_{WTI,y}$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe Bild 2j).

3.3 Definitionen von Werten basierend auf den in 3.2 definierten optischen Funktionen

3.3.1

Power-Abweichung

$PV(f_{WS})$

Funktionenpeak-to-valley-Wert der bestangepassten Kugelfläche

Anmerkung 1 zum Begriff: $PV(f_{WS})$ entspricht der Größe A nach ISO 10110-5 und ISO 10110-14.

Anmerkung 2 zum Begriff: In früheren Ausgaben dieses Teils von ISO 14999 wurde der Begriff Pfeilhöhenabweichung benutzt, um diesen Wert zu benennen. Zur besseren Verständlichkeit, wurde der Begriff Pfeilhöhenabweichung durch Power-Abweichung ersetzt, um deutlicher darzustellen, dass dieser Wert senkrecht zur Referenzfläche gemessen ist, wogegen die Pfeilhöhenabweichung parallel zur z-Achse gemessen ist.

3.3.2

Power-Abweichung für zylindrische Wellenfronten

$PV(f_{WC,x}), PV(f_{WC,y})$

peak-to-valley-Wert der bestangepassten Kreiszylinderflächen in x- bzw. y-Richtung

Anmerkung 1 zum Begriff: $PV(f_{WI,x})$ entspricht der Größe AX und $PV(f_{WI,y})$ entspricht der Größe AY nach ISO 10110-5 und ISO 10110-14.

3.3.3

Unregelmäßigkeit

$PV(f_{WI})$

peak-to-valley-Wert der Unregelmäßigkeit der Wellenfront

Anmerkung 1 zum Begriff: $PV(f_{WI})$ entspricht der Größe B nach ISO 10110-5 und ISO 10110-14.

3.3.4

Unregelmäßigkeit für zylindrische Wellenfronten

$PV(f_{WI,CY})$

peak-to-valley-Wert der Unregelmäßigkeit der Wellenfront für zylindrische Wellenfronten

Anmerkung 1 zum Begriff: $PV(f_{WI,CY})$ entspricht der Größe B nach ISO 10110-5 und ISO 10110-14.

3.3.5

rotationsinvariante Unregelmäßigkeit

$PV(f_{WRI})$

peak-to-valley-Wert der bestangepassten Asphäre an die Wellenfront

Anmerkung 1 zum Begriff: $PV(f_{WRI})$ entspricht der Größe C nach ISO 10110-5 und ISO 10110-14.

3.3.6

translationsinvariante Unregelmäßigkeit für zylindrische Wellenfronten

$PV(f_{WTI,x}), PV(f_{WTI,y})$

peak-to-valley-Wert der bestangepassten Nicht-Kreiszylinderfläche an die Wellenfront

Anmerkung 1 zum Begriff: $PV(f_{WTI,x})$ entspricht der Größe CX und $PV(f_{WTI,y})$ entspricht der Größe CY nach ISO 10110-5 und ISO 10110-14.

3.3.7

rotationsvariante Unregelmäßigkeit

$PV(f_{WRV})$

peak-to-valley-Wert der verbleibenden rotationsvarianten Wellenfrontabweichung

3.3.8**translationsvariante Unregelmäßigkeit** $PV(f_{WTV})$

peak-to-valley-Wert der verbleibenden translationsvarianten Wellenfrontabweichung

3.3.9**rms-Wert der Gesamtabweichung** $rms(f_{WD})$

quadratischer Mittelwert der Wellenfrontdeformation

Anmerkung 1 zum Begriff: $rms(f_{WD})$ entspricht der Größe RMSt nach ISO 10110-5 und ISO 10110-14.**3.3.10****rms-Wert der Gesamtabweichung für zylindrische Wellenfronten** $rms(f_{WD,CY})$

quadratischer Mittelwert der Wellenfrontdeformation für zylindrische Wellenfronten

Anmerkung 1 zum Begriff: $rms(f_{WD,CY})$ entspricht der Größe RMSt nach ISO 10110-5 und ISO 10110-14.**3.3.11****rms- Wert der Unregelmäßigkeit** $rms(f_{WI})$

quadratischer Mittelwert der Unregelmäßigkeit der Wellenfront

Anmerkung 1 zum Begriff: $rms(f_{WI})$ entspricht der Größe RMSi nach ISO 10110-5 und ISO 10110-14.**3.3.12****rms- Wert der Unregelmäßigkeit für zylindrische Wellenfronten** $rms(f_{WI,CY})$

quadratischer Mittelwert der Unregelmäßigkeit der Wellenfront für zylindrische Wellenfronten

Anmerkung 1 zum Begriff: $rms(f_{WI,CY})$ entspricht der Größe RMSi nach ISO 10110-5 und ISO 10110-14.**3.3.13****rms- Wert der rotationsinvarianten Unregelmäßigkeit** $rms(f_{WRI})$

quadratischer Mittelwert der bestangepassten Asphäre an die Wellenfront

3.3.14**rms- Wert der translationsinvarianten Unregelmäßigkeit** $rms(f_{WTI,x}), rms(f_{WTI,y})$

quadratischer Mittelwert der bestangepassten Nicht-Kreiszyylinderfläche an die Wellenfront

3.3.15**rms-Wert der rotationsvarianten Unregelmäßigkeit** $rms(f_{WRV})$

quadratischer Mittelwert der verbleibenden rotationsvarianten Wellenfrontabweichung

Anmerkung 1 zum Begriff: $rms(f_{WRV})$ entspricht der Größe RMSa nach ISO 10110-5 und ISO 10110-14.**3.3.16****rms- Wert der translationsvarianten Unregelmäßigkeit** $rms(f_{WTV})$

quadratischer Mittelwert der verbleibenden translationsvarianten Wellenfrontabweichung

Anmerkung 1 zum Begriff: $rms(f_{WTV})$ entspricht der Größe RMSa nach ISO 10110-5 und ISO 10110-14.