

DIN EN ISO 25178-602

ICS 17.040.30

**Geometrische Produktspezifikation (GPS) –
Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft –
Teil 602: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (mit
chromatisch konfokaler Sonde) (ISO 25178-602:2010);
Deutsche Fassung EN ISO 25178-602:2010**

Geometrical product specifications (GPS) –
Surface texture: Areal –
Part 602: Nominal characteristics of non-contact (confocal chromatic probe) instruments
(ISO 25178-602:2010);
German version EN ISO 25178-602:2010

Spécification géométrique des produits (GPS) –
État de surface: Surfacique –
Partie 602: Caractéristiques nominales des instruments sans contact (à capteur confocal
chromatique) (ISO 25178-602:2010);
Version allemande EN ISO 25178-602:2010

Gesamtumfang 40 Seiten

Nationales Vorwort

Diese Norm wurde von der ISO/TC 213/WG 16 „Areal and profile surface texture“ ausgearbeitet. Auf nationaler Ebene ist der Arbeitsausschuss NA 152-03-03 AA „Oberflächen“ zuständig.

Für die in diesem Dokument zitierten internationalen Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 3274:1996	siehe DIN EN ISO 3274:1998-04
ISO 4287	siehe DIN EN ISO 4287
ISO 10360-1	siehe DIN EN ISO 10360-1
ISO/IEC Guide 99:2007	siehe Internationales Wörterbuch der Metrologie (VIM)

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN ISO 3274:1998-04, *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) — Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren — Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten (ISO 3274:1996); Deutsche Fassung EN ISO 3274:1997*

DIN EN ISO 4287, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren — Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*

DIN EN ISO 10360-1, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) — Teil 1: Begriffe (ISO 10360-1:2000 + Cor.1:2002) (enthält Berichtigung AC:2002); Deutsche Fassung EN ISO 10360-1:2000 + AC:2002*

Internationales Wörterbuch der Metrologie (VIM), ISBN 978-3-410-20070-3

ICS 17.040.20

Deutsche Fassung

Geometrische Produktspezifikation (GPS) —
Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft —
Teil 602: Merkmale von berührungslos messenden Geräten
(mit chromatisch konfokaler Sonde)
(ISO 25178-602:2010)

Geometrical product specifications (GPS) —
Surface texture: Areal —
Part 602: Nominal characteristics of non-contact
(confocal chromatic probe) instruments
(ISO 25178-602:2010)

Spécification géométrique des produits (GPS) —
État de surface: Surfacique —
Partie 602: Caractéristiques nominales des instruments
sans contact (à capteur confocal chromatique)
(ISO 25178-602:2010)

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 6. Mai 2010 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum des CEN oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
Einleitung.....	4
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen.....	5
3 Begriffe	5
3.1 Allgemeine Begriffe	5
3.2 Begriffe, die sich auf das laterale Scanningsystem beziehen	8
3.3 Begriffe, die sich auf das Tastsystem beziehen.....	9
3.4 Metrologische Merkmale des Gerätes	11
4 Zusammenfassung der metrologischen Merkmale.....	20
Anhang A (normativ) Klassifizierung der verschiedenen Konfigurationen von Rastergeräten für die flächenhafte Oberflächentopographie	22
Anhang B (informativ) Allgemeine Prinzipien	23
B.1 Grundlegende Prinzipien	23
B.1.1 Das Prinzip der konfokalen Mikroskopie	23
B.1.2 Brennpunkt suchender konfokaler Sensor.....	24
B.1.3 Prinzip der axialen chromatischen Dispersion.....	24
B.2 Chromatische konfokale dimensionelle Messtechnik	25
B.3 Merkmale von Messgeräten zur flächenhaften Ermittlung der Oberflächentopographie	27
B.3.1 Allgemeines	27
B.3.2 Messgerät zur flächenhaften Ermittlung der Oberflächentopographie mit einer chromatischen konfokalen Sonde	28
B.3.3 Messverfahren.....	29
B.4 Vergleich der Merkmale von Geräten mit mechanischem Taster und mit chromatischem Sensor.....	29
B.5 Nicht gemessene Punkte (fehlende Daten).....	30
B.6 Ausreißer	31
B.7 Messung von transparentem Material	31
Anhang C (normativ) Begriffsdiagramme.....	32
Anhang D (informativ) Zusammenhänge mit dem GPS-Matrix-Modell	34
D.1 Allgemeines	34
D.2 Informationen über diese Norm und ihre Anwendung	34
D.3 Position im GPS-Matrix-Modell	34
D.4 Betroffene Internationale Normen.....	35
Literaturhinweise	36

Vorwort

Dieses Dokument (EN ISO 25178-602:2010) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 213 „Dimensional and geometrical product specifications and verification“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 290 „Geometrische Produktspezifikationen und -prüfung“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom AFNOR gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Januar 2011, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Januar 2011 zurückgezogen werden.

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

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO 25178-602:2010 wurde vom CEN als EN ISO 25178-602:2010 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Einleitung

Dieser Teil von ISO 25178 ist ein Dokument für die Geometrische Produktspezifikation (GPS) und ist als allgemeines GPS-Dokument (siehe ISO/TR 14638) anzusehen. Es beeinflusst das Kettenglied 5 der Normen über Rauheitsprofile, Welligkeitsprofile, Primärprofile und die flächenhafte Oberflächenbeschaffenheit.

Für weiter ins Einzelne gehende Informationen über den Zusammenhang dieser Norm mit dem GPS-Matrix-Modell siehe den Anhang D.

Das chromatische konfokale optische Prinzip kann durch unterschiedliche Aufbauten in Kraft gesetzt werden. Die in diesem Dokument beschriebene Konfiguration enthält drei grundlegende Elemente: einen optoelektronischen Controller, eine verbindende optische Faserleitung und ein chromatisches Objektiv (manchmal als „optical pen“ bezeichnet).

Es sind mehrere unterschiedliche Verfahren möglich, um die axiale chromatische Dispersion zu erzeugen oder dem reflektierten Licht die Höheninformation zu entnehmen. Zusätzlich zur Implementierung als Punktsensor, kann die chromatische Dispersion in Zeilensensoren und Flächensensoren integriert werden. Der Anhang B beschreibt im Einzelnen die chromatische konfokale Bilderzeugung und ihre Implementierung in Sonden zur Abstandsmessung.

Dieser Typ von Messgerät wurde hauptsächlich für flächenhafte Messungen konstruiert, aber er ermöglicht auch die Durchführung von Profilmessungen.

Dieser Teil von ISO 25178 beschreibt die metrologischen Merkmale eines optischen Profilometers, welches eine chromatische konfokale Sonde verwendet, deren Funktion auf der axialen chromatischen Dispersion von weißem Licht beruht, und welches für die flächenhafte Messung der Oberflächentopographie konstruiert wurde.

Für weiter ins Einzelne gehende Informationen über die Arbeitsweise von Geräten mit einer chromatischen Sonde, siehe den Anhang B. Das Lesen dieses Anhangs vor dem Hauptteil kann möglicherweise zu einem besseren Verständnis dieses Teils von ISO 25178 führen.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von ISO 25178 legt die Konstruktion und die metrologischen Merkmale eines berührungslosen Gerätes zur Messung der Oberflächentopographie fest, welches eine chromatische konfokale Sonde verwendet, deren Funktion auf der axialen chromatischen Dispersion von weißem Licht beruht.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente 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 3274:1996, *Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Nominal characteristics of contact (stylus) instruments*

ISO 4287, *Geometrical product specification (GPS) — Surface texture: Profile method — Terms, definitions and surface texture parameters*

ISO 10360-1, *Geometrical product specification (GPS) — Acceptance test and reverification test for coordinate measuring machines (CMM) — Part 1: Vocabulary*

ISO/IEC Guide 99:2007, *International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe und Definitionen nach ISO 3274, ISO 4287, ISO 10360-1, ISO/IEC Guide 99 und die folgenden Begriffe.

ANMERKUNG Mehrere der unten angegebenen Begriffe gelten auch genauso für andere Arten von Geräten, welche Einzelpunktsensoren und eine laterale Rasterung verwenden.

3.1 Allgemeine Begriffe

3.1.1

Koordinatensystem des Gerätes

rechtshändiges orthonormales System von Achsen (X, Y, Z) definiert als:

- (X,Y) in der Ebene, welche durch Bezugsebene des Gerätes errichtet wird,
- die Z-Achse liegt in der Bewegungsebene des Tasters und steht senkrecht auf der (X, Y)-Ebene (siehe Bild 1).

ANMERKUNG Normalerweise zeigt die X-Achse in Richtung des kontinuierlichen Vorschubs und die Y-Achse in Richtung des schrittweisen Vorschubs.

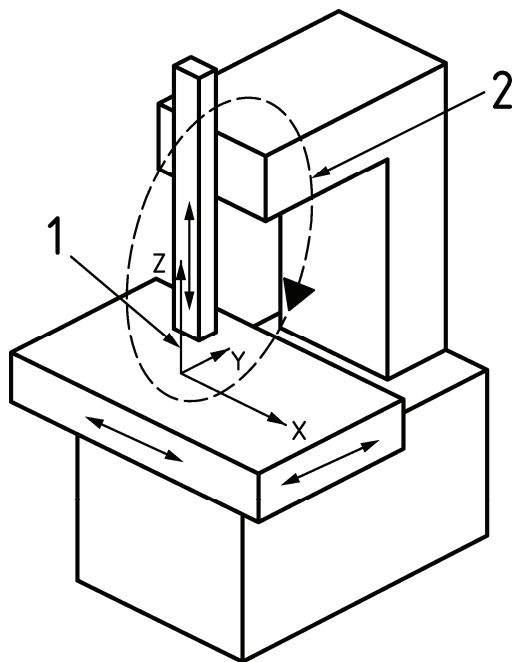
3.1.2

Messkreis

geschlossene Kette, welche alle Komponenten umfasst, die das Werkstück und **die chromatische Sonde** (3.3.2) verbinden, z. B. die Mittel zur Positionierung, die Befestigung des Werkstücks, der Messständer, die **Antriebseinheiten** (3.2.3 und 3.2.4), das **Tastsystem** (3.3.1)

Siehe Bild 1.

ANMERKUNG Der Messkreis ist externen und internen Störungen ausgesetzt, welche die Messunsicherheit beeinflussen.



Legende

- 1 Koordinatensystem des Gerätes
- 2 Messkreis

Bild 1 — Koordinatensystem und Messkreis des Gerätes

3.1.3

wirkliche Oberfläche eines Werkstückes

alle physikalisch existierenden Geometrielemente, die das gesamte Werkstück vom umgebenden Medium trennen

[ISO 14660-1:1999, 2.4]

3.1.4

wirkliche elektromagnetische Oberfläche

Oberfläche, welche durch die elektromagnetische Wechselwirkung mit der wirklichen Oberfläche eines Werkstücks erhalten wird

[ISO 14406:—¹), 3.2.2]

ANMERKUNG Die für das in diesem Teil von ISO 25178 beschriebene Messgerät betrachtete elektromagnetische Oberfläche kann sich von der elektromagnetischen Oberfläche für andere Arten optischer Geräte unterscheiden.

3.1.5

erfasste Primäroberfläche

endliche Menge von Datenpunkten, welche auf der Primäroberfläche erfasst worden sind

[ISO 14406:—¹), 3.7]

1) Noch zu veröffentlichen.

3.1.6

Messabweichung

Abweichung

Messwert minus einem **Referenzwert**

ANMERKUNG 1 Der Begriff Messabweichung kann verwendet werden,

- a) wenn es nur einen einzigen Referenzwert gibt, auf den man sich beziehen kann, was zutrifft, wenn eine **Kalibrierung** mit einem Normal mit einem **Messwert** mit vernachlässigbarer **Messunsicherheit** durchgeführt wird, oder wenn ein **vereinbarter Wert** vorliegt, in welchem Fall die Messabweichung bekannt ist, oder
- b) wenn angenommen wird, dass eine **Messgröße** durch einen einzigen wahren Wert oder eine Menge von **wahren Werten** von vernachlässigbarer Spannweite dargestellt wird, in welchem Fall die Messabweichung nicht bekannt ist.

ANMERKUNG 2 Messabweichung sollte nicht mit Fehler verwechselt werden.

[ISO/IEC Guide 99:2007, 2.16]

3.1.7

systematische Messabweichung

systematische Abweichung

Komponente der **Messabweichung** (3.1.5), die bei wiederholten **Messungen** konstant bleibt oder sich in vorhersagbarer Weise ändert

ANMERKUNG 1 Der **Referenzwert** für eine systematische Messabweichung ist ein **wahrer Wert** oder ein **Messwert** eines **Normals** mit vernachlässigbarer **Messunsicherheit** oder ein **vereinbarter Wert**.

ANMERKUNG 2 Die systematische Messabweichung und ihre Ursachen können bekannt oder unbekannt sein. Um eine bekannte systematische Messabweichung auszugleichen, kann eine **Korrektur** als Ausgleich angewendet werden.

ANMERKUNG 3 Systematische Messabweichung ist gleich der Messabweichung minus der **zufälligen Messabweichung**.

[ISO/IEC Guide 99:2007, 2.17]

3.1.8

zufällige Messabweichung

Komponente der **Messabweichung** (3.1.5), die bei wiederholten Messungen in unvorhersagbarer Weise schwankt

ANMERKUNG 1 Ein Referenzwert für eine zufällige Messabweichung ist der Mittelwert, welcher sich aus einer unendlichen Zahl von wiederholten Messungen derselben Messgröße ergeben würde.

ANMERKUNG 2 Zufällige Messabweichungen von wiederholten Messungen bilden eine Verteilung, die durch ihren Erwartungswert, der im Allgemeinen als null angenommen wird, und ihre Varianz beschrieben werden kann.

ANMERKUNG 3 Die zufällige Messabweichung ist gleich der Messabweichung minus der systematischen Messabweichung.

[ISO/IEC Guide 99:2007, 2.19]

3.1.9

Justierung eines Messgerätes

Justierung

Reihe von Tätigkeiten, die an einem Messsystem ausgeführt werden, sodass dieses festgelegte Anzeigen liefert, die Werten einer zu messenden Größe entsprechen

ANMERKUNG 1 Zu den Justierungsarten eines Messsystems gehören Nullpunktjustierung eines Messsystems, Offset-Justierung und Kennwertjustierung (manchmal auch Verstärkungsjustierung genannt).

ANMERKUNG 2 Justierung eines Messsystems sollte nicht mit Kalibrierung verwechselt werden, die eine Voraussetzung für Justierung ist.

ANMERKUNG 3 Nach der Justierung eines Messsystems muss das Messsystem für gewöhnlich neu kalibriert werden.

[ISO/IEC Guide 99:2007, 3.11]

ANMERKUNG 4 Dies ist keine Operation, welche normalerweise durch den Anwender ausgeführt wird, sondern durch den Hersteller des Gerätes, weil es eine spezielle Ausrüstung und spezielle Kenntnisse notwendig macht, welche der Anwender normalerweise nicht besitzt.

3.1.10

Justierung durch den Anwender

<eines Messgerätes> **Justierung eines Messgerätes** (3.1.8), welcher nur die Mittel einsetzt, die dem Anwender zur Verfügung stehen

ANMERKUNG Dies ist eine Operation, welche normalerweise durch den Anwender ausgeführt wird. Es schließt die Verwendung eines Normals ein, welches üblicherweise zusammen mit dem Gerät ausgeliefert wird. Das Ergebnis dieser Operation gleicht gewisse Parameter automatisch oder von Hand ab, damit das Gerät ordnungsgemäß arbeitet.

3.1.11

Korrektion

Kompensation eines geschätzten systematischen Effekts

ANMERKUNG 1 Bezüglich einer Erklärung des „systematischen Effekts“, siehe DIN V ENV 13005 (ISO/IEC-Leitfaden 98-3:2008), 3.2.3.

ANMERKUNG 2 Die Kompensation kann unterschiedlicher Art sein, wie beispielsweise ein Summand, ein Faktor oder ein Tabellenwert.

[ISO/IEC Guide 99:2007, 2.53]

3.1.12

Rest der Korrektur einer Abweichung

Differenz zwischen dem Wert einer Größe, welcher nach der Korrektur einer **systematischen** Messabweichung (3.1.6) erhalten wird, und dem wirklichen Wert dieser Größe

ANMERKUNG Der Rest der Korrektur einer Abweichung setzt sich aus der **zufälligen Messabweichung** (3.1.7) und der unkorrigierten systematischen Abweichung zusammen.

3.2 Begriffe, die sich auf das laterale Scanningsystem beziehen

3.2.1

laterales Scanningsystem

System, welches die Abtastung der zu messenden Oberfläche in der (X,Y)-Ebene durchführt

ANMERKUNG Typischerweise ist das laterale Scanningsystem aus den **Antriebseinheiten X** (3.2.3) und den **Antriebseinheiten Y** (3.2.4) zusammengesetzt.

3.2.2

Bezugsführungsfläche

Komponente des Gerätes, welche die Bezugsfläche erzeugt, in der das Tastsystem sich bezüglich der zu messenden Oberfläche entsprechend einer theoretisch genauen Bahn bewegt

ANMERKUNG Für den Fall von Messgeräten zur flächenhaften Ermittlung der Oberflächentopographie errichtet die Bezugsführungsfläche eine Bezugsfläche [siehe ISO/DIS 25178-1]. Das kann entweder durch die Verwendung von zwei zueinander senkrecht stehenden Bezugsführungen (siehe ISO 3274:1996, 3.3.2) oder durch eine Bezugsführungsfläche erreicht werden.

3.2.3

Antriebseinheit für X

Komponente eines Gerätes, welche das Tastsystem oder die zu messende Fläche entlang der Bezugsführungsfläche in Richtung der X-Achse bewegt und die horizontale Position des gemessenen Punktes als laterale X-Koordinate des Profils zurückgibt

3.2.4

Antriebseinheit für Y

Komponente eines Gerätes, welche das Tastsystem oder die zu messende Fläche entlang der Bezugsführungsfläche in Richtung der Y-Achse bewegt und die horizontale Position des gemessenen Punktes als laterale Y-Koordinate des Profils zurückgibt

3.2.5

lateraler Positionssensor

Komponente der Antriebseinheit, welche die laterale Position des gemessenen Punktes zur Verfügung stellt

ANMERKUNG Die laterale Position kann z. B. unter Verwendung eines linearen Encoders, eines Laser-Interferometers oder einer Zählrichtung, welche mit einer Antriebsspindel verbunden ist, gemessen werden.

3.3 Begriffe, die sich auf das Tastsystem beziehen

3.3.1

Tastsystem

<Oberflächentopographie, chromatische konfokale Sonde> Komponente des Gerätes, welche *chromatische konfokale Sonde* genannt wird, bestehend aus einem optoelektronischen Controller, einer verbindenden optischen Faserleitung und einem konfokalen chromatischen Objektiv

3.3.2

chromatische Sonde

Vorrichtung, welche während der Messung die Höhe eines Punktes auf der Oberfläche unter Ausnutzung der chromatischen konfokalen Dispersion des weißen Lichts einer Lichtquelle in ein Signal umwandelt

ANMERKUNG Die chromatische Dispersion kann durch unterschiedliche optische Konfigurationen realisiert werden (siehe Anhang B).

3.3.3

Aperturwinkel

Winkel eines Lichtkegels, welcher in ein optisches System eintritt, von einem Punkt der gemessenen Oberfläche ausgehend

3.3.4

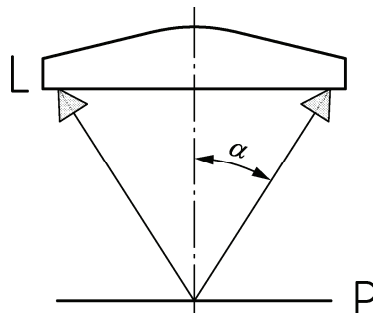
halber Aperturwinkel

α

die Hälfte des Aperturwinkels

Siehe Bild 2.

ANMERKUNG Dieser Winkel wird manchmal auch *halber Kegelwinkel* genannt.



Legende

L Linse oder optisches System

P Brennpunkt

α halber Aperturwinkel

Bild 2 — Halber Aperturwinkel

3.3.5 numerische Apertur

A_N

Sinus des halben Aperturwinkels, multipliziert mit dem Berechnungsindex n des umgebenden Mediums

$$A_N = n \sin \alpha$$

ANMERKUNG 1 In Luft ist n näherungsweise gleich eins und kann deshalb in der Gleichung weggelassen werden.

ANMERKUNG 2 Für eine chromatische Sonde ist die numerische Apertur von der Wellenlänge des Lichts abhängig. Typischerweise wird die numerische Apertur für die Wellenlänge festgelegt, für welche der Brennpunkt in der Mitte des vertikalen Bereichs liegt.

3.3.6 chromatische konfokale Mikroskopie

Methode zur Messung der Oberflächentopographie, bestehend aus einem konfokalen Mikroskop mit einem chromatischen Objektiv und einer integrierten Detektoreinrichtung (z. B. einem Spektrometer), wodurch die Höhe der Oberfläche bei einem einzelnen Punkt durch die Wellenlänge des von der Oberfläche reflektierten Lichts erfasst wird

[ISO/DIS 25178-6:2010, 3.3.7]

3.3.7 achromatisches Objektiv

Objektiv, welches für zwei Wellenlängen des durchgelassenen Lichts einen gemeinsamen Brennpunkt besitzt

3.3.8 Objektiv mit axialer chromatischer Dispersion

Objektiv, welches für jede Wellenlänge des durchgelassenen Lichts einen unterschiedlichen Brennpunkt entlang seiner optischen Achse erzeugt

3.3.9 Lichtquelle

<chromatische Sonde> Lichtquelle, welche ein Kontinuum von Wellenlängen innerhalb eines vorgegebenen Bereichs abstrahlt

ANMERKUNG 1 Der von der Lichtquelle abgestrahlte Spektralbereich sollte mit der spektralen Bandbreite des Detektors kompatibel sein.

ANMERKUNG 2 Typischerweise erstreckt sich dieser Spektralbereich über Wellenlängen von 0,4 μm bis 0,8 μm .

3.3.10 Lochblende der Lichtquelle

kleines vor eine **Lichtquelle** (3.3.9) gesetztes Loch, welches die Lichtquelle in eine Punktlichtquelle überführt

ANMERKUNG Siehe Anmerkungen in 3.3.11.

3.3.11 Diskriminationslochblende

kleines vor einen Detektor gesetztes Loch, welches eine Tiefendiskrimination in dem von der Probenoberfläche reflektierten Strahl ermöglicht, indem die Blende defokussiertes Licht zurückhält

ANMERKUNG 1 Das System enthält zwei Lochblenden, das erste ist die **Lochblende der Lichtquelle** (3.3.10). Sie erzeugt einen kleinen Lichtpunkt, welcher als Punktlichtquelle des Gerätes wirkt. Die zweite ist die Diskriminationslochblende. Sie begrenzt den durchgelassenen Lichtstrahl auf den Teil, welcher auf der Probenoberfläche im Brennpunkt ist und entlang der optischen Achse reflektiert wird (siehe Bild B.1).

ANMERKUNG 2 In der Praxis werden die Lochblenden durch Verwendung einer Faseroptik erhalten, welche eine räumliche Diskrimination ermöglicht und es erlaubt, den optischen Messkopf in einiger Entfernung vom optoelektronischen Controller zu verwenden.

3.3.12

chromatische Schärfentiefe

Abstand zwischen dem Brennpunkt der kürzesten Wellenlänge und dem Brennpunkt der längsten Wellenlänge des durch die Lichtquelle emittierten spektralen Kontinuums

ANMERKUNG Diese Definition unterscheidet sich von der typischen Definition der Schärfentiefe, welche bei anderen optischen Systemen verwendet wird, wie zum Beispiel bei einem konventionellen Mikroskop.

3.3.13

Arbeitsabstand

<chromatische Sonde> Abstand, gemessen entlang der optischen Achse, zwischen dem der Oberfläche am nächsten liegenden Element und dem auf der Oberfläche liegenden Punkt, welcher in der Mitte des **Vertikalbereichs** (3.3.14) liegt

3.3.14

Vertikalbereich

<chromatische Sonde> Abstand, gemessen zwischen dem Brennpunkt der kürzesten Wellenlänge und dem Brennpunkt der längsten Wellenlänge, welche durch das Spektrometer nachgewiesen werden

ANMERKUNG Der Vertikalbereich hängt von der **chromatischen Schärfentiefe** (3.3.12) und vom spektralen Bereich des Spektrometers ab.

3.3.15

chromatisches Objektiv

Teil der **chromatischen Sonde** (3.3.2), welcher die chromatische Linse enthält und während der Messung nahe der Oberfläche liegt

3.3.16

Streulichtsignal

Signal, zusammengesetzt aus dem Streulicht, welches durch die **Diskriminationslochblende** (3.3.11) geht und durch den Detektor nachgewiesen wird, wenn keine Probe vorhanden ist, sowie das interne Signal des Detektors selbst

ANMERKUNG Das Streulichtsignal wird im Allgemeinen während des Kalibrierfahrens aufgenommen, um die Messung zu korrigieren.

3.4 Metrologische Merkmale des Gerätes

3.4.1

messtechnisches Merkmal

MC

<Messeinrichtung> Merkmal einer Messeinrichtung, welches die Messergebnisse beeinflussen könnte

[ISO 14978:2006, 3.12]

ANMERKUNG 1 Eine Kalibrierung der metrologischen Merkmale ist möglicherweise notwendig.

ANMERKUNG 2 Die metrologischen Merkmale tragen unmittelbar zur Messunsicherheit bei.

3.4.2

Messvolumen

Bereich des Gerätes, welcher durch die Grenzen aller drei durch das Gerät gemessenen Koordinaten angegeben wird

ANMERKUNG Für Messgeräte zur flächenhaften Ermittlung der Oberflächentopographie ist das Messvolumen definiert durch:

- den Messbereich der **Antriebseinheit für X** (3.2.3) und der **Antriebseinheit für Y** (3.2.4);
- den Messbereich des **Tastsystems** (3.3.1).

3.4.3

Umkehrspanne

Eigenschaft einer Messeinrichtung oder eines messtechnischen Merkmals, die darin besteht, dass die Anzeige der Messeinrichtung oder der Wert des Merkmals von der Folge der vorausgegangenen Eingangsgrößen abhängt

ANMERKUNG 1 Die Umkehrspanne kann auch z. B. von der Länge des Weges nach Änderung der Einstellung der Eingangsgröße abhängen.

[ISO 14978:2006, 3.24]

ANMERKUNG 2 Für ein laterales Scanningsystem handelt es sich hauptsächlich um die Abweichung durch eine neue Positionierung.

3.4.4

Übertragungsfunktion

F_x, F_y, F_z

graphische Darstellung der Funktion, welche den Zusammenhang zwischen der tatsächlichen Größe und der gemessenen Größe beschreibt

Siehe Bild 3.

ANMERKUNG 1 Eine tatsächliche Größe in X-Richtung (bzw. in Y- oder Z-Richtung) entspricht einer gemessenen Größe x_m (bzw. y_m oder z_m).

ANMERKUNG 2 Die Übertragungsfunktion kann für die Justierung oder für die Korrektur von Abweichungen verwendet werden.

3.4.5

Verstärkungskoeffizient

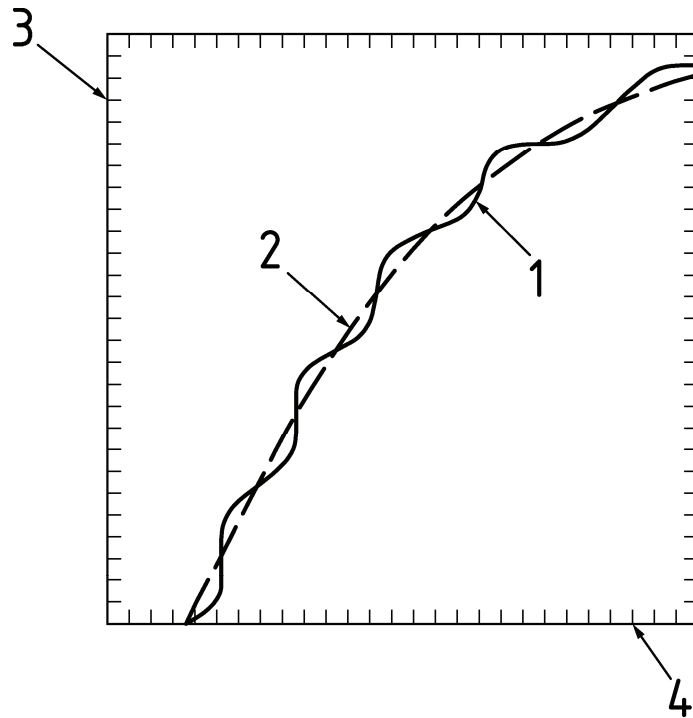
$\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$

Steigung der linearen Regressionsfunktion, welche aus der Übertragungsfunktion erhalten wird

Siehe Bild 4.

ANMERKUNG 1 Es gibt Verstärkungskoeffizienten, welche auf die X-, Y- und Z-Größen anwendbar sind.

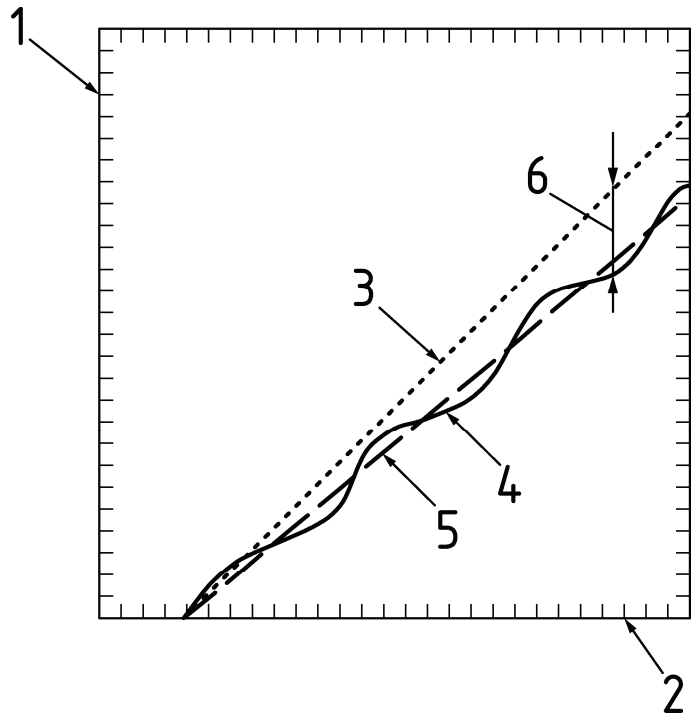
ANMERKUNG 2 Die ideale Übertragungsfunktion ist eine Gerade mit einer Steigung gleich eins, was bedeutet, dass die Werte der Messgröße gleich den Werten der Eingangsgrößen sind.



Legende

- | | | | |
|---|--|---|------------------|
| 1 | Übertragungsfunktion | 3 | gemessene Größen |
| 2 | Auswertung der Übertragungsfunktion durch
eine Polynomapproximation | 4 | Eingangsgrößen |

Bild 3 — Beispiel für eine nichtlineare Übertragungsfunktion



Legende

- | | | | |
|---|-----------------------------|---|---|
| 1 | gemessene Größen | 4 | linearisierte Übertragungsfunktion |
| 2 | Eingangsgrößen | 5 | Gerade, deren Steigung der Verstärkungskoeffizient α ist |
| 3 | ideale Übertragungsfunktion | 6 | lokale verbleibende Korrektur vor Justierung |

Bild 4 — Beispiel für die Linearisierung einer Übertragungsfunktion

3.4.6

Geräterauschen

internes Rauschen, addiert zum Ausgangssignal, welches durch das Gerät verursacht worden ist, wenn dieses idealerweise in eine störungsfreie Umgebung gebracht wird

ANMERKUNG 1 Das interne Rauschen kann elektronisches Rauschen, von Verstärkern, als Ursache haben.

ANMERKUNG 2 Das Rauschen hat typischerweise eine hohe Frequenz, wodurch die Fähigkeit des Gerätes, Oberflächentopographien kleiner Größenordnung nachzuweisen, begrenzt wird.

ANMERKUNG 3 Das S-Filter, festgelegt in ISO/DIS 25178-3, kann zur Verringerung dieses Geräterauschens verwendet werden.

3.4.7

statisches Rauschen

N_s

Summe des Geräte- und Umgebungsruschens im Ausgangssignal, ohne irgendeine Bewegung des lateralen Scanningsystems

ANMERKUNG 1 Das Umgebungsruschen wird z. B. durch seismische, akustische und externe elektromagnetische Störungen hervorgerufen.

ANMERKUNG 2 Die Anmerkungen 2 und 3 zu 3.4.6 gelten für diese Begriffe ebenfalls.

3.4.8 dynamisches Rauschen

N_d

Rauschen, welches während der Bewegung der Antriebseinheiten im Ausgangssignal auftritt

ANMERKUNG 1 Die Anmerkungen 2 und 3 zu 3.4.6 gelten für diese Begriffe ebenfalls.

ANMERKUNG 2 Das dynamische Rauschen enthält das **statische Rauschen** (3.4.7).

3.4.9 Abtastintervall in X-Richtung

D_x

Abstand zwischen zwei benachbarten Messpunkten entlang der X-Achse

3.4.10 Abtastintervall in Y-Richtung

D_y

Abstand zwischen zwei benachbarten Messpunkten entlang der Y-Achse

3.4.11 Digitalisierungsschritt in Z-Richtung

D_z

kleinste Höhenänderung entlang der Z-Achse zwischen zwei Ordinatenwerten der erfassten Oberfläche

ANMERKUNG 1 Die Höhe eines Punktes wird durch Suchen nach der Position des Maximalwerts der Spektrometerkurve ausgewertet. Obwohl die laterale Auflösung des Spektrometers relativ klein ist (Anzahl der Pixel) wird der Digitalisierungsschritt in Z-Richtung der **chromatischen Sonde** (3.3.2) durch Verwendung eines Subpixel-Algorithmus verbessert.

ANMERKUNG 2 Es können mehrere verschiedene Algorithmen zur Auswertung der Position des Maximums verwendet werden. Die gängigsten sind in der Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1 — Wirksamkeit des Auswertalgorithmus

Algorithmus	Genauigkeit	Geschwindigkeit
Einfache Feststellung der Pixelposition des Intensitätsmaximums	schlecht	hoch
Einpassen einer bekannten Kurve (Gaußkurve, Pearsonkurve usw.)	gut	niedrig
Schwerpunkt der Intensitätsverteilung	gut	hoch

3.4.12 laterale Auflösung

R_1

kleinster Abstand zwischen zwei Geometrieelementen, welcher nachgewiesen werden kann

3.4.13 Breitenbegrenzung für die volle Höhenübertragung

W_1

Breite der schmalsten rechteckförmigen Rille, deren gemessene Höhe durch die Messung unverändert bleibt

BEISPIEL 1 Die Messung eines Gitters, dessen Rillen breiter sind, als die Breitenbegrenzung für die Höhenübertragung, führt zu einer korrekten Messung der Rillentiefe (siehe Bilder 5 und 6).

BEISPIEL 2 Die Messung eines Gitters, dessen Rillen schmaler sind, als die Breitenbegrenzung für die Höhenübertragung, führt zu einer fehlerhaften Rillentiefe (siehe Bilder 7 und 8). In dieser Situation ist das Signal im Allgemeinen gestört und kann möglicherweise nicht gemessene Punkte enthalten.

ANMERKUNG Die metrologischen Merkmale einschließlich:

- des **Abtastintervalls in X- und des Abtastintervalls in Y-Richtung**,
- des Digitalisierungsschritts in Z-Richtung und
- des verwendeten Filters

sollten in der Weise angepasst werden, dass sie die laterale Auflösung und die Breitenbegrenzung für die volle Höhenübertragung nicht beeinflussen.

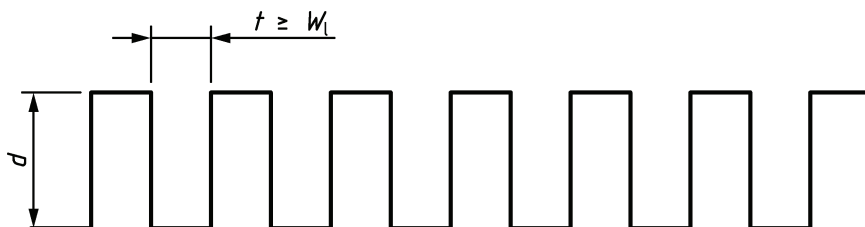
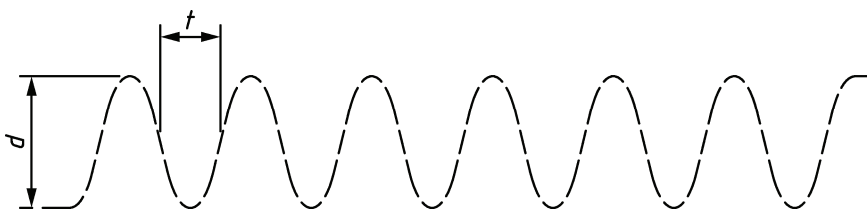


Bild 5 — Gitter mit horizontalem Abstand



ANMERKUNG Der Abstand und die Tiefe der Rillen des Gitters werden korrekt gemessen.

Bild 6 — Messung des Gitters

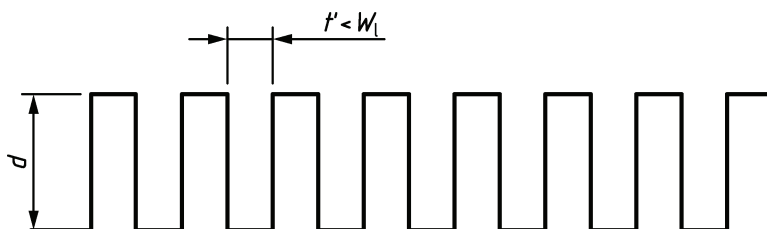
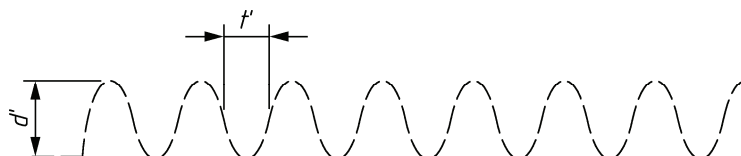


Bild 7 — Gitter mit horizontalem Abstand



ANMERKUNG Der Abstand wird korrekt gemessen, aber die Tiefe ist kleiner ($d' < d$).

Bild 8 — Messung des Gitters

3.4.14

maximale lokale Steigung

größte lokale Steigung eines Oberflächenelements, welches durch das Tastsystem bewertet werden kann

BEISPIEL 1 Bei einem gekippten Spiegel (spiegelnde Reflexion) ist die maximale Steigung etwa gleich dem halben Aperturwinkel der Linse (siehe Bilder 9 und 10). Wenn der Kippwinkel diesen Winkel überschreitet, dann wird das von der Oberfläche reflektierte Licht nicht mehr durch die Linse gesammelt.

Im Bild 9 ist R_1 ein in Richtung des Detektors reflektierter Lichtstrahl. R_2 ist ein außerhalb der Linse reflektierter Lichtstrahl. Nur ein Teil der Beleuchtungsstrahlen wird in Richtung des Detektors reflektiert und führt zu einem kleineren Signallevel im Vergleich zur Reflexion eines nicht gekippten Spiegels. Wenn der Kippwinkel sich dem halben Aperturwinkel annähert, erreicht das Signal den Wert null (siehe Bild 9).

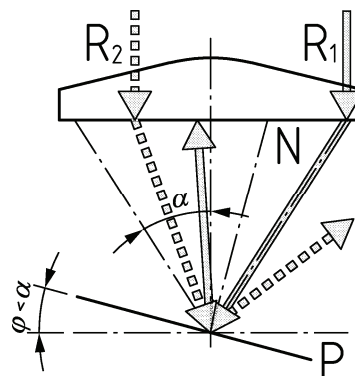
Wenn der Planspiegel um einen Winkel gekippt wird, welcher größer als der halbe Aperturwinkel α ist, dann werden alle Beleuchtungsstrahlen außerhalb der Linse reflektiert (siehe Bild 10).

BEISPIEL 2 Für eine raue Oberfläche (diffuse Reflexion) ist die maximale Steigung größer als der halbe Aperturwinkel α . Die Winkelverteilung des gestreuten Lichts ist abhängig von der Rauheit und den lokalen Steigungen der Flächenelemente innerhalb der Abmessung des Messflecks. Je größer die Rauheit, desto mehr Licht wird bei größeren Winkeln von der spiegelnden Richtung weggestreut.

In Bild 11 erlaubt die durch die raue Oberfläche verursachte diffuse Reflexion einem gewissen Prozentsatz der Beleuchtungsstrahlen in Richtung des Detektors reflektiert zu werden, während der Hauptteil die Sammellinse verfehlt. Dies zeigt, warum bei rauen Oberflächen größere Steigungen gemessen werden können, als bei glatteren Oberflächen.

ANMERKUNG 1 Der Begriff „lokale Steigung“ ist in der Norm ISO 4287 festgelegt.

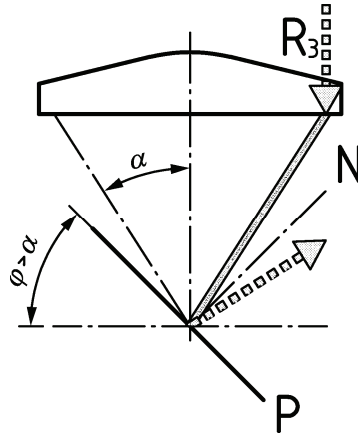
ANMERKUNG 2 Die größte lokale Steigung ist sehr stark von der Rauheit des Werkstücks, der Reflektivität des Werkstücks und der während der Messung verwendeten Integrationszeit abhängig.



Legende

P	Planspiegel	R_2	außerhalb der Linse reflektierter Lichtstrahl
N	Achse senkrecht zum Planspiegel	α	halber Aperturwinkel
R_1	in Richtung des Detektors reflektierter Lichtstrahl	φ	Kippwinkel

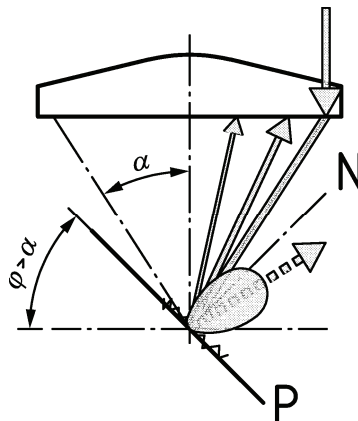
Bild 9 — Reflexion von einem Spiegel, welcher um einen Winkel gekippt ist, der kleiner als der halbe Aperturwinkel ist



Legende

- | | | | |
|-------|---|-----------|----------------------|
| P | Planspiegel | α | halber Aperturwinkel |
| N | Achse senkrecht zum Planspiegel | φ | Kippwinkel |
| R_3 | außerhalb der Linse reflektierter Lichtstrahl | | |

Bild 10 — Reflexion von einem Spiegel, welcher um einen Winkel gekippt ist, der größer als der halbe Aperturwinkel ist



Legende

- | | | | |
|---|--------------------------------|-----------|----------------------|
| P | raue Planfläche | α | halber Aperturwinkel |
| N | Achse senkrecht zur Oberfläche | φ | Kippwinkel |

Bild 11 — Reflexion von einer raunen Planfläche, welche um einen Winkel gekippt ist, der größer als der halbe Aperturwinkel ist

3.4.15

Messfleckgröße

W_{spot}

Größte laterale Abmessung des projizierten Abbilds der Lochblende der Lichtquelle

ANMERKUNG 1 Die Messfleckgröße hängt von den Konstruktionsmerkmalen des Systems ab: **numerische Apertur** (3.3.5), **Vergrößerung**, **Durchmesser der Lochblende der Lichtquelle** (3.3.10), Brechzahl und restliche geometrische Aberrationen.

ANMERKUNG 2 Die Messfleckgröße hängt von der Wellenlänge des Lichts ab. Deshalb ist sie über die vertikale Höhe des Messbereichs nicht konstant.

ANMERKUNG 3 Je größer die Messfleckgröße, desto größer wird die laterale Auflösung sein und es wird eine stärkere Glättung der Oberflächenunregelmäßigkeiten stattfinden.

ANMERKUNG 4 Die sichtbare Messfleckgröße erscheint viel größer als die eines Messflecks eines fokussierten monochromatischen Lichtstrahls, weil das menschliche Auge die Einhüllende des Strahls sieht, welcher aus den fokussierten und nicht fokussierten Abbildern zusammengesetzt ist, die durch alle sichtbaren Wellenlängen erzeugt werden (siehe Bild 12). Da die Wellenlänge von weißem Licht durch eine chromatische Linse in verschiedenen Punkten entlang der optischen Achse fokussiert werden, sind die meisten von ihnen nicht in der Probenoberfläche fokussiert und erzeugen folglich eine Messfleckgröße, welche sichtbar größer erscheint, als der Messfleckdurchmesser, welcher durch einen fokussierten monochromatischen Lichtstrahl erzeugt wird.

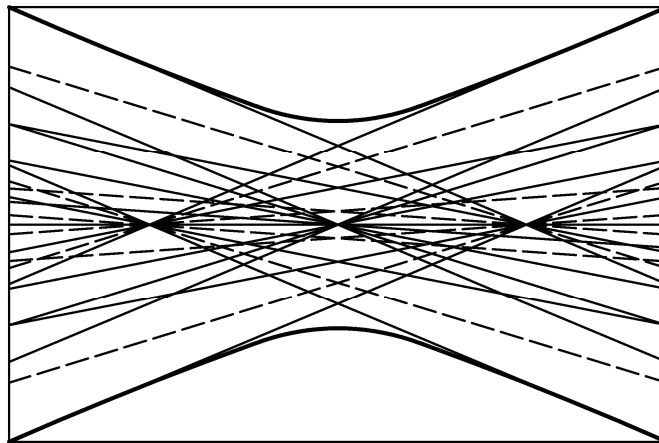


Bild 12 — Durch alle Wellenlängen erzeugte Kaustik

3.4.16

Integrationszeit

T_i

Zeit, während der das einfallende Licht durch den Detektor im Spektrometer gesammelt (integriert) wird

ANMERKUNG 1 Je länger die Integrationszeit ist, desto mehr Licht wird gesammelt. Die Verwendung einer langen Integrationszeit bei einer hellen Probe kann den Detektor sättigen [die Sättigung hängt von der Reflektivität der Probe und der Intensität der **Lichtquelle** (3.3.9) ab].

ANMERKUNG 2 Die kürzeste Integrationszeit ist üblicherweise durch die Geschwindigkeit des Detektors (notwendige Verzögerung, um das spektrale Signal vom Detektor zum Speicher zu übertragen), die Rechenfähigkeit des Prozessors (das Signal muss notwendigerweise vor dem nächsten Zyklus verarbeitet werden), der Intensität der Lichtquelle und der Abmessung der Lochblende des Detektors (es ist notwendig, während des Intervalls genug Licht zu sammeln) begrenzt.

ANMERKUNG 3 Während der Abtastung einer Profillinie wird jeder Datenpunkt über ein Segment, dessen Abmessung von der Geschwindigkeit der Vorschubeinheit und der Integrationszeit abhängt, entlang der X-Achse integriert. Die effektive laterale Auflösung in X-Richtung kann durch die Bewegung möglicherweise größer als die statische laterale Auflösung sein.

3.4.17

Messfrequenz

f_m

Anzahl der durch das **Tastsystem** (3.3.1) je Sekunde zur Verfügung gestellten Datenpunkte

ANMERKUNG 1 Die Messfrequenz bestimmt das **Abtastintervall in X-Richtung** (3.4.9) folgendermaßen:

$$D_x = v_x / f_m$$

Dabei ist

D_x das laterale Abtastintervall in X, in Mikrometer;

v_x die Messgeschwindigkeit in X-Richtung, in Mikrometer je Sekunde;

f_m die Messfrequenz, in Hertz.

ANMERKUNG 2 Die Messfrequenz kann nicht größer als die Integrationsfrequenz sein (d. h. die Zeit zwischen zwei Datenpunkten sollte größer als die Integrationszeit plus der Berechnungszeit sein). Allerdings kann zum Beispiel eine Messfrequenz von 300 Hz gemeinsam mit einer Integrationszeit von 1 kHz (Integrationszeit von 1 ms) gewählt werden.

ANMERKUNG 3 Der Begriff *Integrationszeit* wird anstelle von Integrationsfrequenz verwendet, weil sie zu einer Expositionszeit des Detektors in Beziehung steht. Im Gegensatz dazu wird der Begriff *Messfrequenz* anstelle von Messzeit verwendet, weil der Anwender eine Datenrate in Punkten je Sekunde wählt und weil der Begriff *Messzeit* mit der Dauer der gesamten Messung durcheinandergebracht werden könnte.

4 Zusammenfassung der metrologischen Merkmale

Metrologische Merkmale von flächenhaft messenden Oberflächenmessgeräten müssen Tabelle 2 entsprechen. Dort sind die Achsen angegeben, die von Abweichungen der metrologischen Merkmale beeinflusst werden.

Tabelle 2 — Metrologische Merkmale

Gruppe	Element	Metrologische Merkmale		Abweichung entlang ...
Tastsystem	chromatisches Objektiv	W_{spot}	Abmessung des Messflecks	X, Y und Z
		A_N	numerische Apertur	X und Z
		R_1	laterale Auflösung	X und Y
	optoelektronische Vorrichtung	C_z	Koeffizient des Höhenabgleichs	Z
		α_z	Koeffizient der Höhenverstärkung	Z
		z_{HYS}	vertikale Umkehrspanne	Z
		F_z	Übertragungskurve	Z
		D_z	Höhendigitalisierungsschritt	Z
		T_i	Integrationszeit	X und Z
		f_m	Messfrequenz	X
Antriebseinheit	Positionssensor (linearer Encoder, Messschraube, ...)	F_x oder F_y	Übertragungsfunktionen	X oder Y
		α_x oder α_y	lateraler Verstärkungskoeffizient	X oder Y
		D_x oder D_y	laterales Abtastintervall	X oder Y
		x_{HYS}	Umkehrspanne der Repositionierung in X-Richtung zwischen zwei benachbarten Profilen	X
		y_{HYS}	Umkehrspanne der Repositionierung in Y-Richtung	Y
		v_x	Messgeschwindigkeit in X-Richtung	X und Z

Tabelle 2 (fortgesetzt)

Gruppe	Element	Metrologische Merkmale		Abweichung entlang ...
Antriebseinheit	Bezugsführungsfläche (Höhenkomponente)	$Z_{FLT(X,Y)}$	Höhenkomponente der Ebenheitsabweichung bei der Bewegung in der XY-Ebene $Z_{FLT(X,Y)}$ enthält insbesondere:	Z
		$Z_{STR(X)}$	Höhenkomponente der Geradheitsabweichung entlang der X-Achse	
		$Z_{STR(Y)}$	Höhenkomponente der Geradheitsabweichung entlang der Y-Achse	
	Bezugsführungsfläche (laterale Komponente)	Δ_{PER}	Rechtwinkligkeitsabweichung zwischen X- und Y-Achse	X und Y
		$Y_{STR(X)}$	laterale Y-Komponente der Geradheit entlang der X-Achse (Verdrehung)	X und Y
		$X_{STR(Y)}$	laterale X-Komponente der Geradheit entlang der Y-Achse (Verdrehung)	X und Y
Gerät		N_s	statisches Rauschen	Z
		N_d	dynamisches Rauschen	Z

Anhang A (normativ)

Klassifizierung der verschiedenen Konfigurationen von Rastergeräten für die flächenhafte Oberflächentopographie

Es gibt vier wesentliche Gesichtspunkte für ein Rastergerät für die flächenhafte Oberflächentopographie: der Antrieb der X-Achse, der Antrieb der Y-Achse, das Z-Messsystem (Sonde) und die zu messende Oberfläche. Es gibt unterschiedliche Arten wie diese Komponenten konfiguriert sein können und deshalb wird es Unterschiede zwischen den verschiedenen Konfigurationen geben, wie dies in der Tabelle A.1 erklärt ist.

Tabelle A.1 Mögliche Konfigurationen für das laterale Scanningsystem

Vorschubeinheit				
2 Bezugsführungen (X und Y)			1 Bezugsführungsfläche	
PX o CY	PX o PY	CX o CY	PXY	CXY
Bewegung des Tastsystems entlang der X-Achse und Bewegung der Komponente entlang der Y-Achse	Bewegung des Tastsystems entlang der X und Y-Achse	Bewegung der Komponente entlang der X und Y-Achse	Bewegung des Tastsystems entlang XY-Ebene	Bewegung der Komponente entlang der XY-Ebene
ANMERKUNG Für zwei gegebene Funktionen f und g ist $f \circ g$ die Komposition dieser Funktionen.				
PX = Bewegung des Tastsystems entlang der X-Achse.				
PY = Bewegung des Tastsystems entlang der Y-Achse.				
CY = Bewegung der Komponente entlang der Y-Achse.				

Anhang B (informativ)

Allgemeine Prinzipien

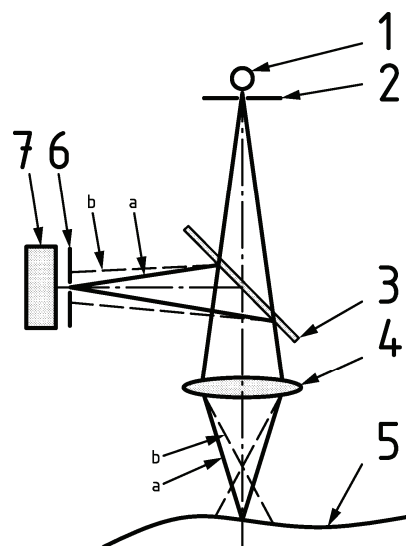
B.1 Grundlegende Prinzipien

B.1.1 Das Prinzip der konfokalen Mikroskopie

Die konfokale Mikroskopie (oder konfokale Bilderzeugung) besteht aus:

- Abbildung der Lochblende der Lichtquelle in einen fokussierten Fleck auf der Oberfläche;
- Abbildung dieses Flecks auf die Diskriminationslochblende.

Das Bild B.1 verdeutlicht das optische Prinzip der konfokalen Mikroskopie.



Legende

- | | | | |
|---|-----------------------------|---|---------------------------|
| 1 | Lichtquelle | 5 | Werkstück |
| 2 | Lochblende der Lichtquelle | 6 | Diskriminationslochblende |
| 3 | halbdurchlässiger Spiegel | 7 | Photodetektor |
| 4 | achromatische Objektivlinse | | |
- a auf das Werkstück fokussierter Lichtstrahl
b defokussierter Lichtstrahl

Bild B.1— Prinzip eines konfokalen Sensors

Ein solches optisches System wird durch die folgenden Elemente charakterisiert:

- die zwei Lochblenden sind konjugierte Lochblenden (konfokales Prinzip);
- das Licht geht zweimal durch das Objektiv (in entgegengesetzten Richtungen);
- der Aufbau ist koaxial.

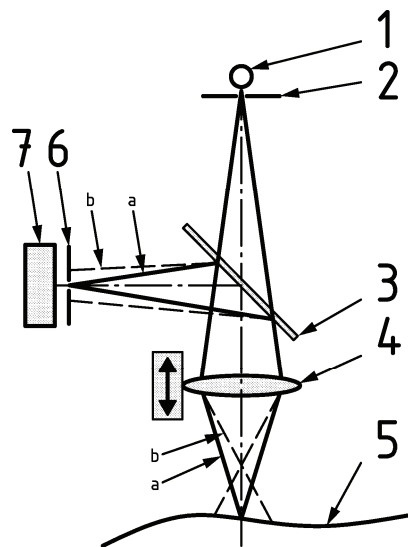
Ein von der Lichtquelle ausgesendeter Lichtstrahl geht durch die Lochblende der Lichtquelle und wird dann durch eine achromatische Objektivlinse auf die Oberfläche fokussiert. Der von der Oberfläche reflektierte Lichtstrahl wird durch die Diskriminationslochblende, welche nur das auf die Lochblende fokussierte Licht und nicht das defokussierte Licht in der Umgebung der Lochblende durchlässt, zum Detektor (im Allgemeinen ein photoelektrischer Empfänger) zurückgesendet.

Der Detektor empfängt die maximale Lichtintensität, wenn der Lichtstrahl auf die Oberfläche fokussiert ist.

Das durch diese Vorrichtung zur Verfügung gestellte Höhenunterscheidungsvermögen kann als Oberflächenhöhenensor eines Messgerätes zur Ermittlung der Oberflächentopographie verwendet werden.

B.1.2 Brennpunkt suchender konfokaler Sensor

Das Bild B.2 verdeutlicht das Prinzip der Höhenmessung unter Verwendung einer Brennpunktssuche.



Legende

- | | | | |
|---|-----------------------------|---|---------------------------------|
| 1 | Lichtquelle | 5 | Werkstück |
| 2 | Lochblende der Lichtquelle | 6 | Diskriminationslochblende |
| 3 | halbdurchlässiger Spiegel | 7 | Photodetektor |
| 4 | achromatische Objektivlinse | 8 | vertikale Verschiebevorrichtung |
- a auf das Werkstück fokussierter Lichtstrahl
 b defokussierter Lichtstrahl

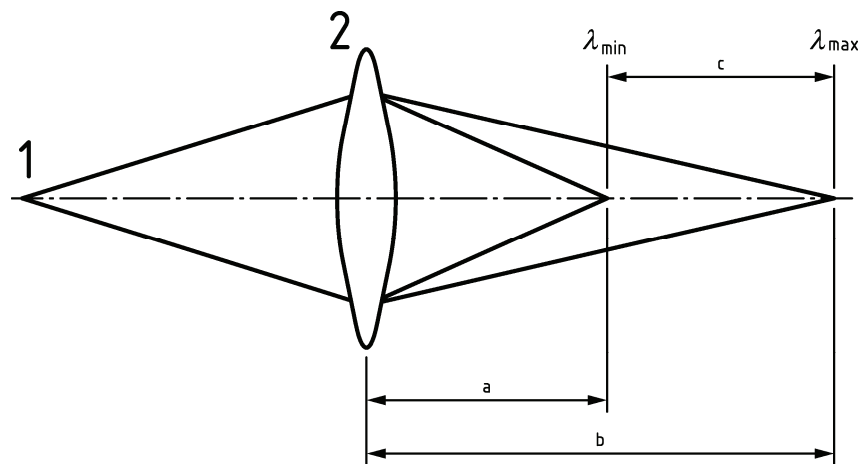
Bild B.2 — Prinzip eines Brennpunkt suchenden konfokalen Sensors

Durch Bewegung der Objektivlinse entlang der vertikalen Achse erreicht man, dass das Signal ein Maximum annimmt, wenn der Lichtstrahl auf die Oberfläche fokussiert ist. Deshalb ist es möglich, die Höhe der Oberfläche durch eine Analyse des Detektorsignals nachzuweisen.

B.1.3 Prinzip der axialen chromatischen Dispersion

Bei einem chromatischen optischen System hängt die Position des Abbildes irgendeiner gegebenen Punktlichtquelle von der Wellenlänge des Lichtstrahls ab. Wenn der Lichtstrahl polychromatisch ist, dann zeigt das optische System ein Kontinuum von Abbildern, welche zum spektralen Gehalt dieses Lichtstrahls in Beziehung stehen.

Die axiale chromatische Dispersion ist ein physikalisches Merkmal, welche in allen brechenden und beugenden optischen Systemen, sowie solchen mit einem Gradienten des Brechungsindex vorhanden ist. Bild B.3 verdeutlicht dieses Merkmal.



Legende

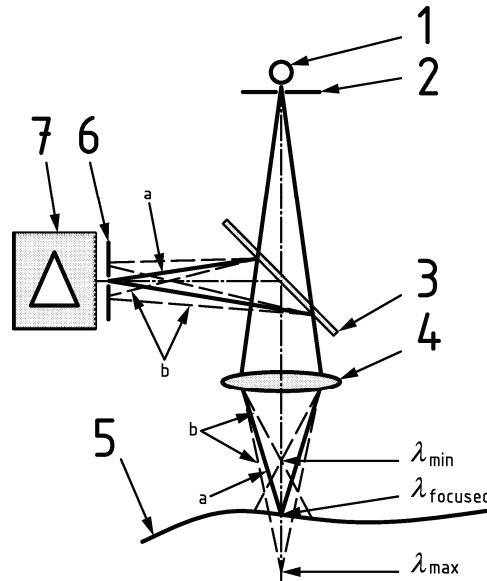
- 1 Punktlichtquelle 2 chromatische Objektivlinse
- a Brennweite der kürzesten Wellenlänge
b Brennweite der längsten Wellenlänge
c axiale chromatische Dispersion

Bild B.3 — Prinzip der axialen chromatischen Dispersion

B.2 Chromatische konfokale dimensionelle Messtechnik

Das Messprinzip besteht aus zwei Operationen:

- 1) Durchführung einer *spektralen Kodierung* des Messraumes. Diese erfolgt durch Streckung der axialen chromatischen Dispersion des Beleuchtungsstrahls in kontrollierter Weise.
- 2) Durchführung einer *spektralen Dekodierung* des reflektierten Lichtstrahls. Diese kann zum Beispiel durch die Benutzung eines Spektrometers erfolgen.



Legende

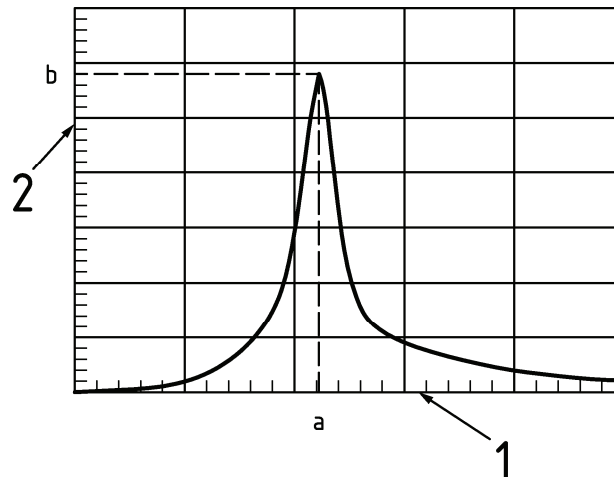
- | | | | |
|---|--|---|---------------------------|
| 1 | Lichtquelle | 5 | Werkstück |
| 2 | Lochblende der Lichtquelle | 6 | Diskriminationslochblende |
| 3 | halbdurchlässiger Spiegel | 7 | Spektrometer |
| 4 | Objektivlinse mit axialer chromatischer Dispersion | | |
- a auf das Werkstück fokussierter Lichtstrahl
 b defokussierter Lichtstrahl

Bild B.4 — Prinzip eines chromatischen konfokalen Sensors

Es gibt unterschiedliche Wege, um den spektralen Gehalt eines Lichtstrahls zu analysieren, welcher durch die Diskriminationslochblende gefiltert worden ist. Einer davon ist die Verwendung des traditionellen Spektrometers, bestehend aus einem dispersiven Element (ein Gitter oder ein Prisma) und einer Detektorzeile.

Die relative Höhe der Oberfläche in irgendeinem gegebenen Punkt (x, y) wird aus den Daten des Spektrometers folgendermaßen erhalten:

- das von der Oberfläche reflektierte Licht wird durch die Diskriminierungslochblende, welche die meisten Wellenlängen entfernt, außer solchen, welche in der Nähe der fokussierten Wellenlänge liegen, zum Spektrometer gesendet.
- Im Spektrometer werden die fokussierten Wellenlängen zu einer höheren Intensität führen, als die defokussierten, wodurch sich ein Intensitätsmaximum in der Spektrometerkurve ergibt (siehe Bild B.5).
- Wenn der Sensor kalibriert worden ist, kann die zum Intensitätsmaximum der Spektrometerkurve gehörende Wellenlänge in einen Abstand von einer vorher festgelegten Bezugsebene umgewandelt werden.



Legende

- 1 Wellenlängensachse (Pixel der CCD-Zeile im Spektrometer)
- 2 Intensitätsachse (willkürliche Einheiten)

- a Position der fokussierten Wellenlänge
- b Intensitätsmaximum

Bild B.5 — Intensitätsmaximum der Spektrometerkurve

Der vertikale Bereich des Sensors (in Z-Richtung) ist gleich der zwischen der kürzesten und der längsten Wellenlänge durch den Detektor beobachteten chromatischen Dispersion. Dieser Sensortyp ist in der Lage einen vertikalen Bereich der relativen Höhe der Oberflächentopographie von einigen zehn Mikrometern bis zu mehreren Millimetern zu erreichen, abhängig von der Linse des Objektivs.

Da der Sensor die Höhe in einem einzelnen Punkt auf dem Werkstück misst, ist es möglich, ihn zur Messung eines Profils oder einer Fläche zu verwenden. Dazu ist es notwendig, in X-Richtung abzutasten, um ein Profil zu erhalten, und in X- und Y-Richtung um ein flächenhaftes topographisches Bild zu erhalten.

Da dieser Sensor keinerlei vertikale Verschiebevorrichtung besitzt, ist das durch den Sensor erzeugte Rauschen geringer und die Messung schneller als bei einem Einzelpunkt des Brennpunkt suchenden konfokalen Systems.

Die Breite des spektralen Maximums wird durch die Abmessung der Lochblende, die numerische Apertur des chromatischen Objektivs und die Stärke der chromatischen Dispersion bestimmt.

B.3 Merkmale von Messgeräten zur flächenhaften Ermittlung der Oberflächentopographie

B.3.1 Allgemeines

Messgeräte zur flächenhaften Ermittlung der Oberflächentopographie ermöglichen die Ermittlung von Größen in X-, Y- und Z-Richtung, aus denen die flächenhaften Parameter der Oberflächentopographie berechnet werden können (siehe Bild B.6).

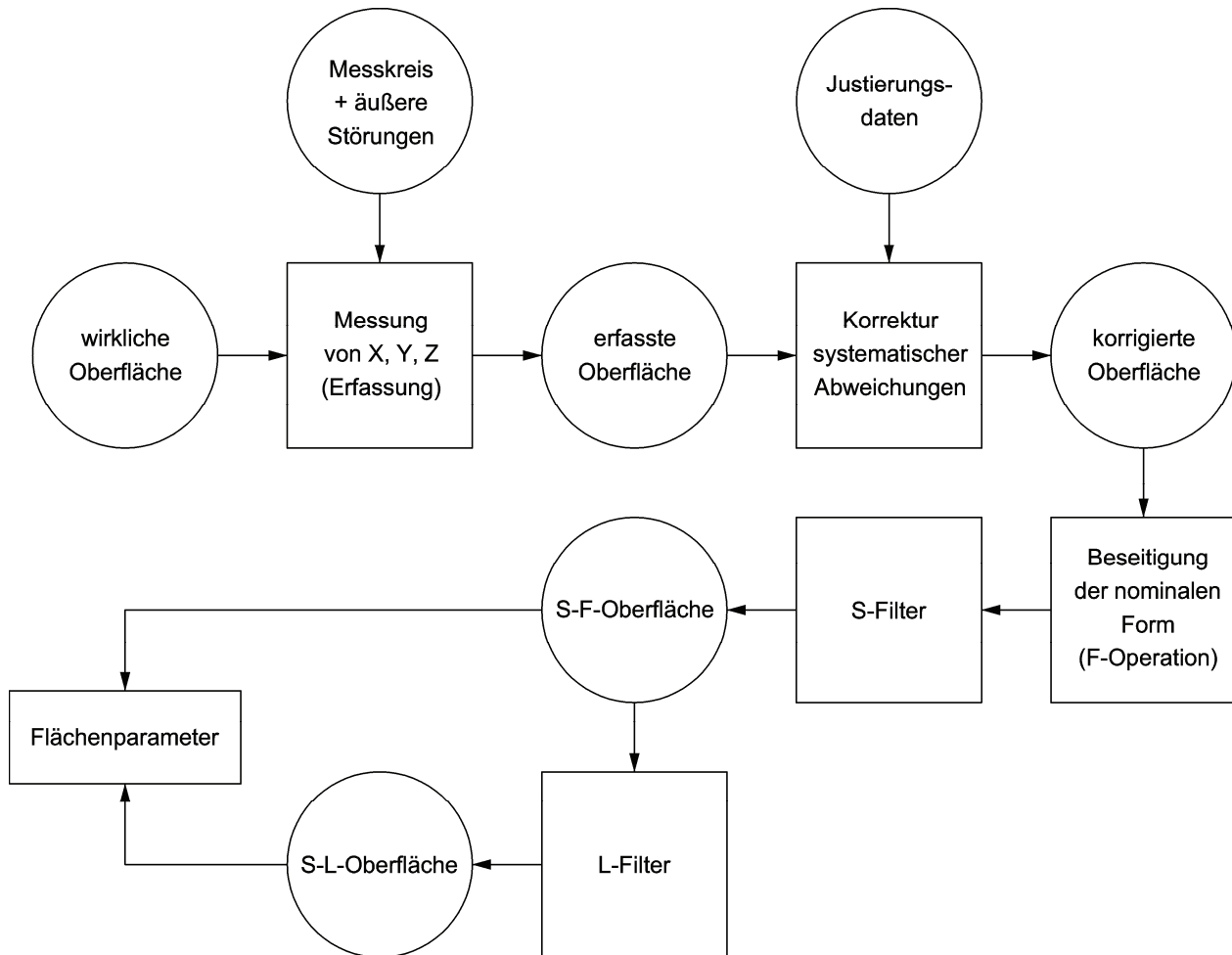


Bild B.6 — Typisches Messverfahren, angewendet auf ein Messgerät für die flächenhafte Oberflächentopographie

Größen in X und Y kennzeichnen die laterale Position des Messpunkts. Die Größe Z kennzeichnet die Höhe des Messpunkts.

Die Kenntnis dieser drei Größen gibt die Möglichkeit zur Berechnung verschiedener flächenhafter Parameter der Oberflächentopographie.

B.3.2 Messgerät zur flächenhaften Ermittlung der Oberflächentopographie mit einer chromatischen konfokalen Sonde

Ein Messgerät zur flächenhaften Ermittlung der Oberflächentopographie besteht aus einem lateralen Scanningsystem und einem Tastsystem.

Ein Messgerät zur flächenhaften Ermittlung der Oberflächentopographie mit einer chromatischen konfokalen Sonde verwendet ein berührungsloses Tastsystem, welches auf dem optischen Prinzip der chromatischen konfokalen Dispersion zur Ermittlung der Oberflächenhöhen beruht.

Dieser Messgerätetyp ist ebenfalls dazu in der Lage, Profilmessungen durchzuführen. Der Bereich der Höhenmessungen erlaubt üblicherweise nur die Messung der Oberflächentopographie von flachen oder schwach gekrümmten Werkstückoberflächen. Typischerweise ist der Höhenmessbereich kleiner als einige Millimeter.

B.3.3 Messverfahren

Ein typisches Messgerät zur flächenhaften Ermittlung der Oberflächentopographie verwendet das folgende Messverfahren:

- das Tastsystem führt eine Erfassung des Profils durch, indem es eine kontinuierliche Messung entlang der X-Achse über eine Länge l_x ausführt;
- nachdem das Profil gemessen worden ist, kehrt das Tastsystem zu seiner Anfangsposition zurück (siehe unten);
- die senkrechte Antriebseinheit entlang der Y-Achse macht einen Schritt um den Abstand eines Abtastintervalls entlang der Y-Achse;
- die oben angegebenen drei Schritte werden wiederholt, bis die Messung vollständig abgeschlossen ist;
- damit hat man die erfasste Oberfläche erhalten. Sie enthält n Profile, welche voneinander durch das Abtastintervall in Y-Richtung getrennt sind, wobei jedes Profil m Punkte enthält, welche durch das Abtastintervall in X-Richtung getrennt sind.

Es ist auch möglich die Messung ohne das Tastsystem nach jedem Profil in seine Anfangsposition durchzuführen. Das nächste Profil kann auch in entgegengesetzter Richtung, verglichen mit der vorhergehenden Abtastrichtung, abgetastet werden. Für diesen Fall wird empfohlen, dass die entsprechende Umkehrspanne mit der annehmbaren Messunsicherheit im Einklang steht. Allerdings ist ein typisches Tastsystem im Allgemeinen für die Messung in nur einer Richtung konstruiert.

Empfehlungen zur Wahl von Auswertebereichen und Abtastabständen sind in der Norm ISO 25178-3 angegeben.

B.4 Vergleich der Merkmale von Geräten mit mechanischem Taster und mit chromatischem Sensor

Der chromatische Sensor hat viele Ähnlichkeiten mit taktilen Sensoren, wie zum Beispiel mit einem Taster. Die Messprotokolle bleiben dieselben, das Gerät muss das Werkstück oder den Sensor bewegen, um ein Profil oder ein topographisches Abbild zu erzeugen. Begriffe, wie Taster, Kegelwinkel, mechanische Filterung usw. können auf ähnliche Begriffe bei chromatischen Sensoren übertragen werden.

Die Genauigkeit der Messung und die vertikale Auflösung sind für den Taster und den chromatischen Sensor von der gleichen Größenordnung. Deshalb sind eine Anzahl von Internationalen Normen, welche ursprünglich für Tastschnittgeräte geschaffen worden sind, auch für Geräte geeignet, welche mit chromatischen Sensoren ausgerüstet sind.

In der Tabelle B.1 werden die Merkmale eines traditionellen berührenden Tasters mit Drehzapfen denen eines chromatischen Sensors gegenübergestellt.

Tabelle B.1 — Vergleich der metrologischen Merkmale eines Tasters und eines chromatischen Sensors

Taster		Chromatischer Sensor	
r_{tip}	Tastspitzenradius	W_{spot}	Messfleckdurchmesser
α	Kegelwinkel	A_N	numerische Apertur
L	Länge	D	Arbeitsabstand
r_H	Höhe		
vertikaler Bereich		chromatische Schärfentiefe	
		λ ($\Delta\lambda$)	Wellenlänge der Lichtquelle (spektrale Bandbreite)
F_z	Übertragungsfunktion	F_z	Übertragungsfunktion
α_z	Verstärkungskoeffizient	α_z	Verstärkungskoeffizient
z_{HYS}	Umkehrspanne		
J_y	laterale Komponente der Abweichung des Vorschubs des Drehzapfens		
D_z	vertikaler Digitalisierungsschritt	D_z	vertikaler Digitalisierungsschritt

B.5 Nicht gemessene Punkte (fehlende Daten)

Jedes Mal wenn der Sensor nicht in der Lage ist die Z-Position eines Punktes auf der Oberfläche zu erfassen, wird dieser Punkt als „nicht gemessen“ markiert (d. h. für diesen Punkt wurde keine Information zur Verfügung gestellt).

Ein nicht gemessener Punkt wird üblicherweise dann erzeugt, wenn die Verarbeitungseinheit kein Maximum im Spektrum nachweisen kann, d. h. unter einer der in der Tabelle B.2 angegebenen Bedingungen.

Tabelle B.2 — Mögliche Erklärungen, warum nicht gemessene Punkte vorhanden sein können

Bedingung	Kommentar	Lösung
Das Werkstück ist zu dunkel.	Die Intensität des reflektierten Lichts ist zu niedrig.	Erhöhe die Integrationszeit oder erhöhe die Leistung der Lichtquelle.
Das Werkstück glänzt zu stark.	Die Intensität des reflektierten Lichts ist zu hoch und sättigt den Detektor.	Verringere die Integrationszeit oder verringere die Leistung der Lichtquelle.
Die lokale Steigung ist zu groß.	Das meiste reflektierte Licht fällt auf Bereiche außerhalb der Lochblende vor dem Detektor.	keine
außerhalb des Messbereichs	Das Maximum liegt am Rand des Spektralbereichs oder außerhalb der Lochblende vor dem Detektor.	keine

ANMERKUNG Nicht gemessene Punkte können auch durch eine Interpolationstechnik rekonstruiert werden (dieser Gegenstand wird in einem Dokument der Normenreihe ISO/TS 16610 behandelt werden).

B.6 Ausreißer

Ausreißer sind schlechte Punkte, welche erzeugt werden, wenn der Sensor die Spektrometerdaten falsch interpretiert.

Dies kann zum Beispiel in den folgenden Fällen geschehen:

- große Steigungen;
- plötzliche Höhenveränderungen (Stufen);
- halbdurchlässige Teilchen;
- geringe Intensität des reflektierten Signals (schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis);
- falsche Fokussierung, verursacht durch die Krümmung der Oberfläche;
- heterogene Oberflächenbedingungen innerhalb des Messflecks.

Diese Ausreißer erscheinen üblicherweise als positive oder negative Spitzen in der Umgebung von stufenförmigen Übergängen oder in der Umgebung nicht gemessener Bereiche.

Diese Punkte sollten beseitigt oder korrigiert werden, bevor eine Berechnung (Rauheitsparameter) durchgeführt wird. Sie erklären manchmal Abweichungen, welche bei den Rauheitsparametern beobachtet werden, wenn ein Vergleich mit einer Messung mit einem Tastschnittgerät durchgeführt wird.

B.7 Messung von transparentem Material

Der chromatische Sensor erzeugt ein Intensitätsmaximum im Spektrometer für die fokussierte Wellenlänge. Wenn mehr als eine Wellenlänge im Bereich des Detektors fokussiert wird, wie zum Beispiel für den Fall einer transparenten Schicht, dann ist es möglich, die Position der zwei (oder mehrerer) Maxima zu identifizieren.

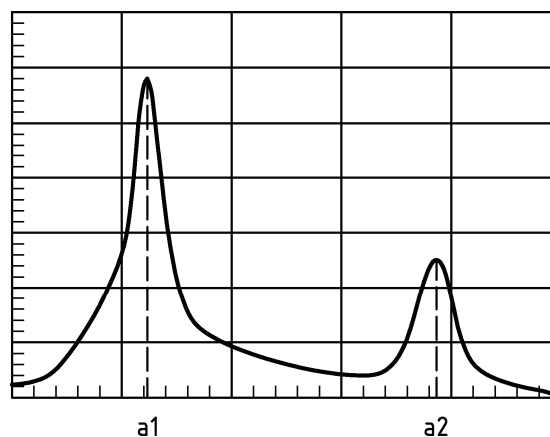


Bild B.7 — Die zwei Übergangsf lächen einer transparenten Schicht werden nachgewiesen (die horizontale Achse stellt den Abstand zur Oberfläche dar, die vertikale Achse stellt die Intensität des reflektierten Lichts dar)

Die Bedingung zum Nachweis zweier Übergangsf lächen eines transparenten Materials ist, dass die optische Dicke kleiner als der Messbereich des Sensors ist (siehe Bild B.8). So ist es zum Beispiel möglich mit einem Sensor mit dem Messbereich 1 mm eine optische Dicke zu messen, welche kleiner als 1 mm ist.

Anstatt die zwei Übergangsf lächen nachzuweisen, ist es möglich nur eine der beiden zurückzubehalten (zum Beispiel die zweite Übergangsf läche). Diese Fähigkeit erlaubt es dem Sensor die Oberfl ächentopographie unterhalb einer transparenten Schicht (ein Ölfilm, Lack usw.) zu messen.

Anhang C (normativ)

Begriffsdiagramme

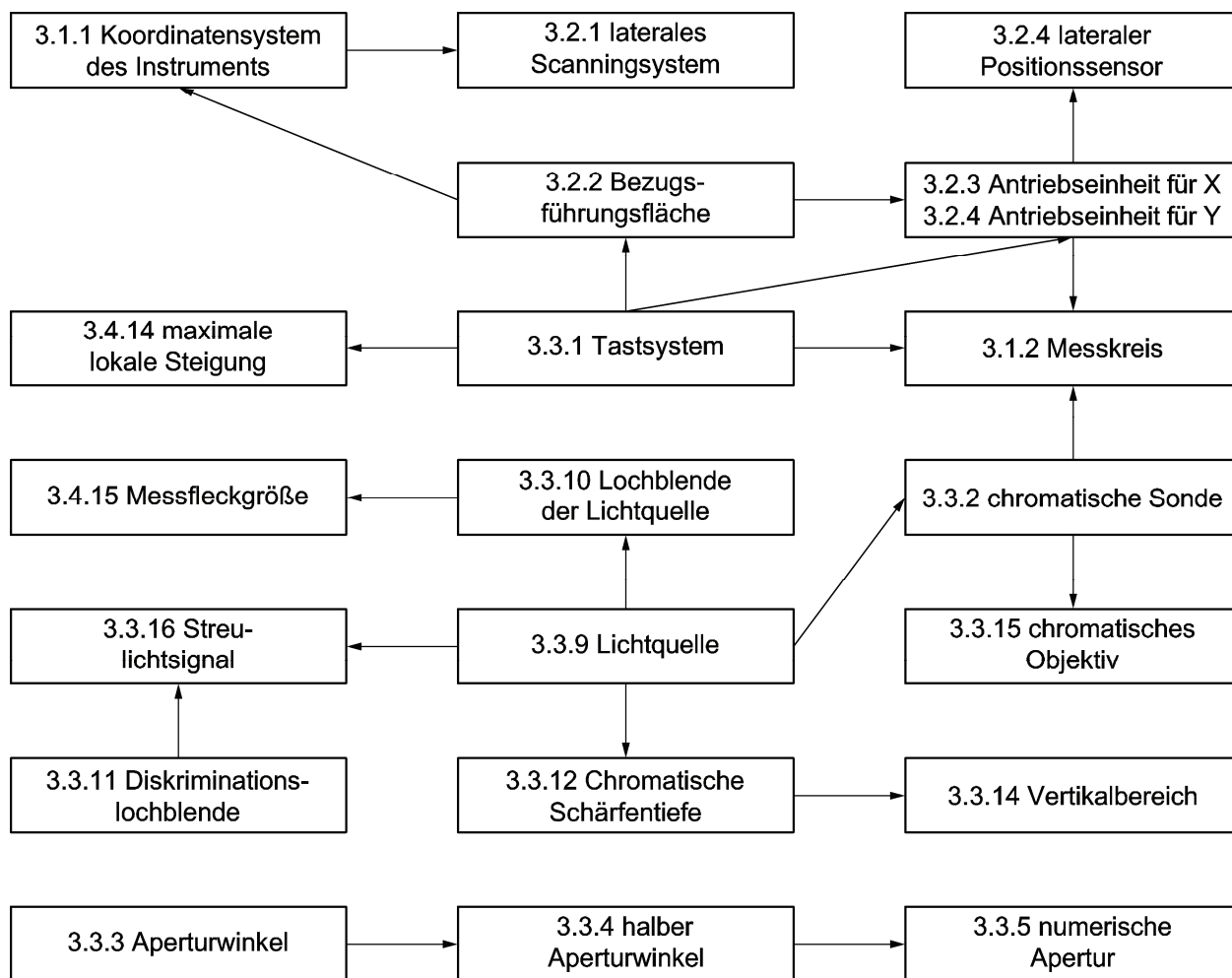


Bild C.1 — In Beziehung stehende Begriffe, 1

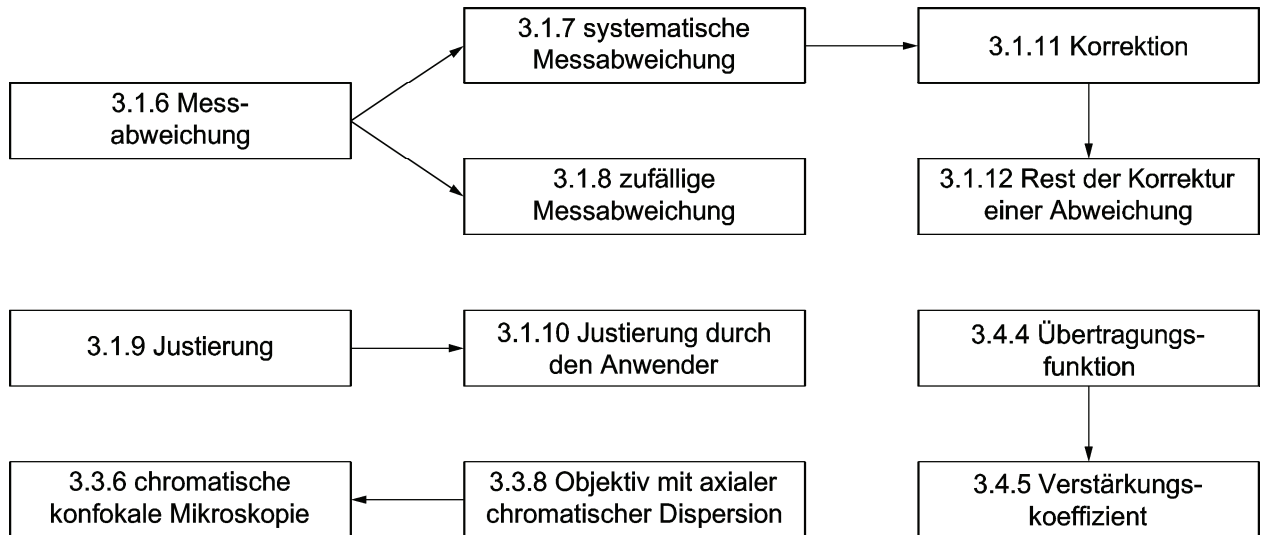


Bild C.2 — In Beziehung stehende Begriffe, 2

Anhang D (informativ)

Zusammenhänge mit dem GPS-Matrix-Modell

D.1 Allgemeines

Zu den vollständigen Einzelheiten des GPS-Matrix-Modells siehe ISO/TR 14638.

D.2 Informationen über diese Norm und ihre Anwendung

Dieser Teil der Norm ISO 25178 legt die grundlegenden Begriffe für chromatisch konfokale Geräte fest.

D.3 Position im GPS-Matrix-Modell

Diese Internationale Norm ist eine allgemeine GPS-Norm (siehe ISO/TR 14638). Sie beeinflusst das Kettenglied 5 der Normenkette über Rauheitsprofil, Welligkeitsprofil, Primärprofil und flächenhafte Oberflächenbeschaffenheit in der Matrixstruktur, wie in Bild D.1 graphisch dargestellt.

Globale GPS-Normen						
Matrix allgemeiner GPS-Normen						
Kettenglieder	1	2	3	4	5	6
Maß						
Abstand						
Radius						
Winkel						
Form einer bezugsunabhängigen Linie						
Form einer bezugsabhängigen Linie						
Form einer bezugsunabhängigen Oberfläche						
Form einer bezugsabhängigen Oberfläche						
Richtung						
Lage						
Lauf						
Gesamtlauf						
Bezüge						
Rauheitsprofil						
Welligkeitsprofil						
Primärprofil						
Oberflächenunvollkommenheit						
Kanten						

Bild D.1 — Position im GPS-Matrix-Modell

D.4 Betroffene Internationale Normen

Die betroffenen Internationalen Normen sind diejenigen, welche aus den Kettengliedern der in Bild D.1 gekennzeichneten Normen hervorgehen.

Literaturhinweise

Allgemeine

- [1] ISO 14406:—², *Geometrical product specifications (GPS) — Extraction*
- [2] ISO/TR 14638:1995, *Geometrical Product Specifications (GPS) — Masterplan*
- [3] ISO 14660-1:1999, *Geometrical Product Specifications (GPS) — Geometrical features — Part 1: General terms and definitions*
- [4] ISO 14978:2006, *Geometrical product specifications (GPS) — General concepts and requirements for GPS measuring equipment*
- [5] ISO/TS 16610 series, *Geometrical product specifications (GPS) — Filtration*
- [6] ISO 25178-2, *Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal — Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters*
- [7] ISO 25178-3, *Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal — Part 3: Specification operators*
- [8] ISO 25178-6:2010, *Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal — Part 6: Classification of methods for measuring surface texture*
- [9] ISO 25178-601, *Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal — Part 601: Nominal characteristics of contact (stylus) instruments*
- [10] ISO/DIS 25178-701, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft — Teil 701: Kalibrierung und Normale für berührend messende Geräte (mit Taster)*
- [11] ISO/IEC Guide 98-3, 2008, *Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM: 1995)*
- [12] BLUNT L. & JIANG X. (2003) *Advanced techniques for assessment surface topography — Development of a basis for the 3D Surface Texture Standards “SURFSTAND”, Kogan Page Science, ISBN 1903996112*

Chromatisch konfokale Mikroskopie

- [13] PICARD B. (1988) *Procédé de microscopie optique confocale à balayage et en profondeur de champ étendue, French Patent FR 8800934 (Publication 0327425), CEA*
- [14] BROWNE M., AKINYEMI O. and BOYDE A., *Confocal surface profiling utilizing chromatic aberration, Scanning 14, 1992*
- [15] SANDOZ P., *Profilométrie en lumière polychromatique et par microscopie confocale, PhD Thesis, Université de Franche-Comté, Besançon, France, 1993*
- [16] COHEN-SABBAN J. *et al. Dispositif de tomographie optique en champ coloré, French Patent FR 9402489 (Publication 2716727), 1994*

2) Zur Veröffentlichung

- [17] MALY M. and BOYDE A., Real-time stereoscopic confocal reflection microscopy using objective lenses with linear longitudinal chromatic dispersion, *Scanning* **16**, 187–192
- [18] TIZIANI, H.J. and UHDE H.-M., Three-dimensional image sensing by chromatic confocal microscopy, *Appl. Opt.*, **33**, 1994, pp. 1838–1843
- [19] COHEN-SABBAN J. et al., *Dispositif de microstratigraphie*, French Patent FR 9510401 Publication 2738343, 1995
- [20] TIZIANI H.J., ACHI R. and KRÄMER R., Chromatic confocal microscopy with microlenses, *J. of Mod. Opt.* **43**, 1996, 155–163
- [21] DOBSON S.L., SUN P.-C., FAINMAN Y. (1997), Diffractive lenses for chromatic confocal imaging, *Appl. Opt.* **36**, pp. 4744–4748
- [22] LIN P.C., SUN P.-C., ZHU L. and FAINMAN Y. Single-shot depth-section imaging through chromatic slit-scan confocal microscopy. *Appl. Opt.* **37**, 1998, pp. 6764–6770
- [23] CHA, S., LIN P., ZHU L., SUN P.-C., FAINMAN Y. Nontranslational three-dimensional profilometry by chromatic confocal microscopy with dynamically configurable micromirror scanning, *Appl. Opt.* **39**, 2000, pp. 2605–2613
- [24] COHEN-SABBAN J., GAILLARD-GROLEAS J., CREPIN P. J., *Quasi confocal extended field surface sensing*, Proc. SPIE 4449, 2001, pp. 178–183
- [25] COHEN-SABBAN J., *High resolution color coded confocal spherometry*, SPIE conf. 5180, San Diego. CA. USA, 2003
- [26] VAISSIERE D., *Métrie tridimensionnelle des états de surface par microscopie confocale à champ étendu*, PhD thesis, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, France, 2003
- [27] RUPRECHT A.K., KÖRNER K., WIESENDANGER T.F., TIZIANI H.J. and OSTEN W., *Chromatic confocal detection for high speed micro-topography measurements*, Proc. SPIE 5302, 2004, pp. 53–60
- [28] RUPRECHT A.K., WIESENDANGER T.F., TIZIANI H.J., Chromatic confocal microscopy with a finite pinhole size, *Opt Letter*, **29**(18), 2004, pp 2130–2132
- [29] SHI K., LI P., YIN S., LIU Z. Chromatic confocal microscopy using supercontinuum light, *Optics Express*, **12**, 2004, pp. 2096–2101
- [30] COHEN-SABBAN J., GAILLARD-GROLEAS J. and CREPIN P. J. *Extended-field confocal imaging for 3D surface sensing*, Proc. SPIE 5252–49, 2004, pp. 366–371

Andere nützliche Literaturstellen

- [31] MINSKY M., *Microscopy apparatus*, US Patent 3013467, 1957
- [32] PETRAN M. and HADRAVSKY M. *Confocal microscopy*, Czechoslovakian Patents 128936 and 128937, 1966
- [33] COURTNEY-PRATT, J.S., GREGORY, R.L. Microscope with enhanced depth of field and 3D capability, *Appl. Opt.* **12**, 1973, pp. 2509–2519
- [34] MOLESINI, G., PEDRINI, G., POGGI, P. and QUERCIOLO, F., Focus-wavelength encoded optical profilometer, *Optics Communications*, **49**, 1984, pp. 229–233
- [35] MOLESINI, G. and QUERCIOLO, F., Pseudocolor effects of longitudinal chromatic aberration, *J. Opt.* **17**, 1986, pp. 279–282

- [36] WILSON T., *Confocal microscopy*, Academic Press, London, 1990
- [37] PERRIN, H., SANDOZ, P. and TRIBILLON, G., *Profilometry by spectral encoding of the optical axis*, in Proc. SPIE 2340, 1994, pp. 366–374
- [38] JORDAN, H-J., WEGNER, M. and TIZIANI, H.J., Highly accurate non-contact characterization of engineering surfaces using confocal microscopy. *Meas. Sci. Technol.*, **9**, 1998, 1142–1151
- [39] HECHT, E., *Optics*, 4th Ed. Addison-Wesley, ISBN 0805385665, Reading (MA), 2001
- [40] Leach, R.K. *Fundamental principles of engineering nanometrology*. Elsevier, Amsterdam, 2009