



**Praktikum**  
**Grundlagen der Fertigungstechnik**  
**Bachelorstudiengang Werkstoffwissenschaft**

**Versuch F2**

**Messung der Mikrogeometrie technischer Funktionsflächen und  
Strukturen**

**Versuchsziel**

Die Mikrogeometrie technischer Funktionsflächen resultiert im Wesentlichen aus den Werkstoffeigenschaften und den Entstehungs- bzw. Bearbeitungsbedingungen. Es bestehen i.a. enge Zusammenhänge zwischen den Oberflächeneigenschaften und dem angestrebten Funktionsverhalten. Aus der Analyse der technischen Oberflächen können einerseits Rückschlüsse auf die Entstehungsbedingungen gezogen bzw. Aussagen über das zu erwartende Funktionsverhalten abgeleitet werden. Typische Messaufgaben in der Oberflächenmesstechnik betreffen die Ermittlung meist statistischer Kenngrößen aus Oberflächenausschnitten. Dafür können eine Reihe unterschiedlicher Messprinzipie genutzt werden, wobei taktile Profilometrie das am weitesten verbreitete Messprinzip ist und üblicherweise auch das Referenz-Messverfahren darstellt.

Das Ziel des Versuches besteht darin, dass ausgehend von charakteristischen Eigenschaften von Oberflächen der Zusammenhang zwischen geometrischen Merkmalen und Funktionsverhalten deutlich wird. Es sollen Kenntnisse und Fertigkeiten zur Oberflächenmessung mit einem taktilen Profilometer erarbeitet werden. Das beinhaltet u. a.:

- Auswahl von Messverfahren für Oberflächenmessungen
- Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Oberflächenmessungen
- Interpretation der Ergebnisse von Oberflächenmessungen

## 1. Zur Verfügung stehende Technik

Die 2D-Oberflächenmessungen werden auf einem Profilometer **FormTalysurf Laser series 2** (Hersteller: Taylor Hobson Ltd. Leicester, GB) mit der Auswertesoftware **µltra** durchgeführt. Als Messobjekte dienen Oberflächen-Vergleichsstücke (Drehen, Schleifen) bzw. spezielle Probe-Werkstücke (Läppen). Zur 3D-Oberflächenmessung dient das Weißlichtinterferenz-Mikroskop CCI HD (Hersteller: Taylor Hobson Ltd. Leicester, GB).

## 2. Aufgabenstellung

### Schwerpunkte des Versuchsprogramms:

- Demonstration von Möglichkeiten zur Kalibrierung/Einmessung von Profilometern
- Ermittlung der Messbedingungen für unterschiedliche Messobjekte/Oberflächenstrukturen
- Durchführung der Messungen an unterschiedlichen Oberflächenstrukturen (periodisch/aperiodisch, isotrop/anisotrop) /Berechnung der Kenngrößen bzw. Kennkurven
- Untersuchung der Auswirkung unterschiedlicher Filter-Einstellungen (Beispiel: Messobjekt „Drehen Rz 10 µm“)
- Durchführung einer 3D-Messung mit dem Weißlicht-Interferenzmikroskop einschließlich Auswertung
- Vergleich 2D-/3D-Messung

### Versuchsauswertung im Protokoll:

- Erläuterung der Vorgehensweise bei der Oberflächenmessung
- Darstellung der Zusammenhänge zwischen den Profiltypen P, W, R (Beispiel: Messobjekt „Drehen Rz 10 µm“)
- Vergleich der Messwerte mit Nominalwerten der Oberflächenvergleichsstücke
- Diskussion der Auswirkungen unterschiedlicher Filter-Einstellungen (Beispiel: Messobjekt „Drehen Rz 10 µm“)
- Interpretation der Kennfunktionen der verschiedenen Oberflächenstrukturen (Vergleich periodische / aperiodische Oberflächenstruktur)

## 3. Grundlagen

### 3.1 Eigenschaften von Oberflächen

Der Oberflächenbegriff wird in der Messtechnik in mehrfacher Hinsicht mit unterschiedlichen Begriffsinhalten gebraucht. Die Betrachtungen beziehen sich zunächst auf die **Oberfläche** als Begrenzungsfläche eines festen Körper gegenüber dem umgebenden Medium. Gegenstand der Oberflächenmessungen in der Fertigungsmesstechnik sind i. a. **technische Oberflächen**, also Oberflächen an Bauteilen technischer Systeme. Diese Oberflächen müssen hinsichtlich der Konstruktion, Fertigung und messtechnischen Bewertung immer im engen Zusammenhang mit der bezweckten Funktion (z. B. Gleitfläche, Dichtfläche) gesehen werden, weshalb der Begriff „**technische Funktionsfläche**“ angebracht ist. Es handelt sich dabei um durch den Menschen mit technischen Hilfsmitteln erzeugte Oberflächen, die einen technischen Zweck erfüllen sollen.

Diese Oberflächen existieren vor der Herstellung zunächst als **geometrisch-ideale Oberfläche** (als Zielvorstellung/Modell in Form einer technischen Zeichnung oder als Geometriedaten in einem CAD-System bestehende Oberfläche, die aufgrund der Unzulänglichkeiten der Maschinen, Werkzeuge, Werkstoffe und des Menschen nicht erreicht wird). Die in der Fertigung erzeugte Oberfläche eines festen Körpers mit herstellungs- und zufallsbedingten Abweichungen wird als **wirkliche Oberfläche** bezeichnet.

Die **Ist-Oberfläche** ist schließlich die messtechnisch erfasste Oberfläche als mehr oder weniger angenähertes Abbild der wirklichen Oberfläche aufgrund der z. B. in ihrer Auflösung oder Messunsicherheit begrenzten Messverfahren bzw. -geräte.

Die geometrischen Abweichungen der Oberflächen haben unterschiedliche Ursachen und werden in sechs Ordnungen unterteilt (Tabelle 1). Die wirkliche Oberfläche entspricht der Überlagerung der Ordnungen 1 bis 6.

**Tabelle 1: Ordnungen von Gestaltabweichungen**

Gestaltabweichung		Beispiele für die Art der Abweichung	Beispiele für die Entstehungsursache
1. Ordnung Formabweichung		Unebenheit Unrundheit	Fehler in den Führungen der Werkzeugmaschinen; Durchbiegung des Werkstückes; Härteverzug; Verschleiß
2. Ordnung Welligkeit		Wellen	Außermittige Einspannung oder Formfehler von Fräsern; Schwingungen
3. Ordnung	Rauheit	Rillen	Form der Werkzeugschneide; Vorschub oder Zustellung des Werkzeuges
4. Ordnung		Riefen Schuppen Kuppen	Vorgang der Spanbildung; Werkstoffverformung beim Abrasivstrahlen Knospenbildung bei galvan. Behandlung
5. Ordnung		Gefügestruktur	Kristallisationsvorgänge; Veränderung der Oberfläche durch chemische Einwirkung (z. B. Beizen); Korrosionsvorgänge
6. Ordnung		Gitteraufbau des Werkstoffes	Physikalische und chemische Vorgänge im Aufbau der Materie; Spannungen und Gleitungen im Kristallgitter

### 3.2 Messverfahren

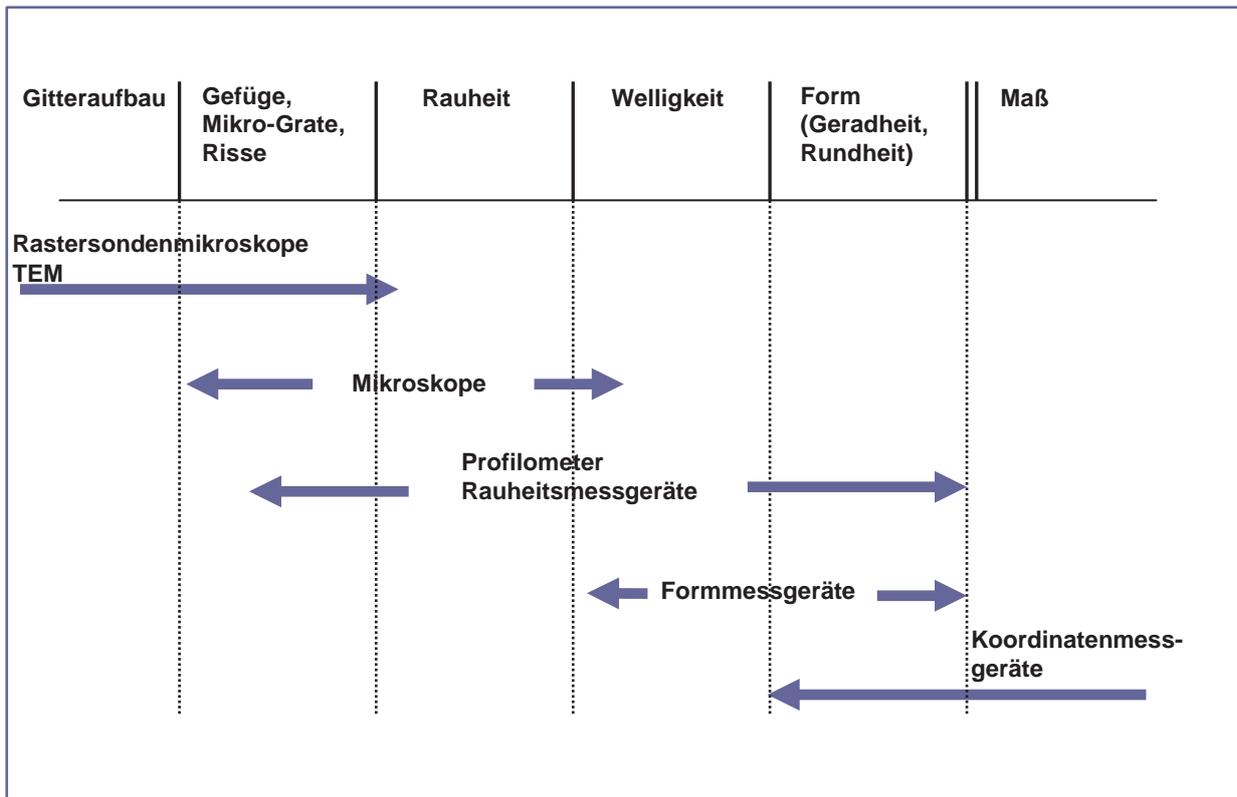
Da es aufgrund des großen Bereiches der Amplituden und Ortswellenlängen der Oberflächenabweichungen praktisch nicht möglich ist, alle Ordnungen von Gestaltabweichungen mit einer Methode zu erfassen, werden entsprechend unterschiedliche Messgeräte eingesetzt (Bild 1). Oberflächenmessgeräte im engeren Sinne basieren auf berührenden (taktilen) und berührungslosen (in den meisten Fällen optischen) Messverfahren. Im Zusammenhang mit diesen am weitesten verbreiteten Messverfahren werden auch die folgenden Begriffe benutzt:

#### **Mechanische Oberfläche**

Menge aller Punkte der realen Oberfläche, die mit einem sphärischen Tastkörper mit einem endlichen Radius R angetastet werden können.

#### **Elektro-magnetische Oberfläche**

Menge aller Punkte der realen Oberfläche, die bei elektro-magnetischer Bestrahlung mit der Wellenlänge  $\lambda$  reflektieren.

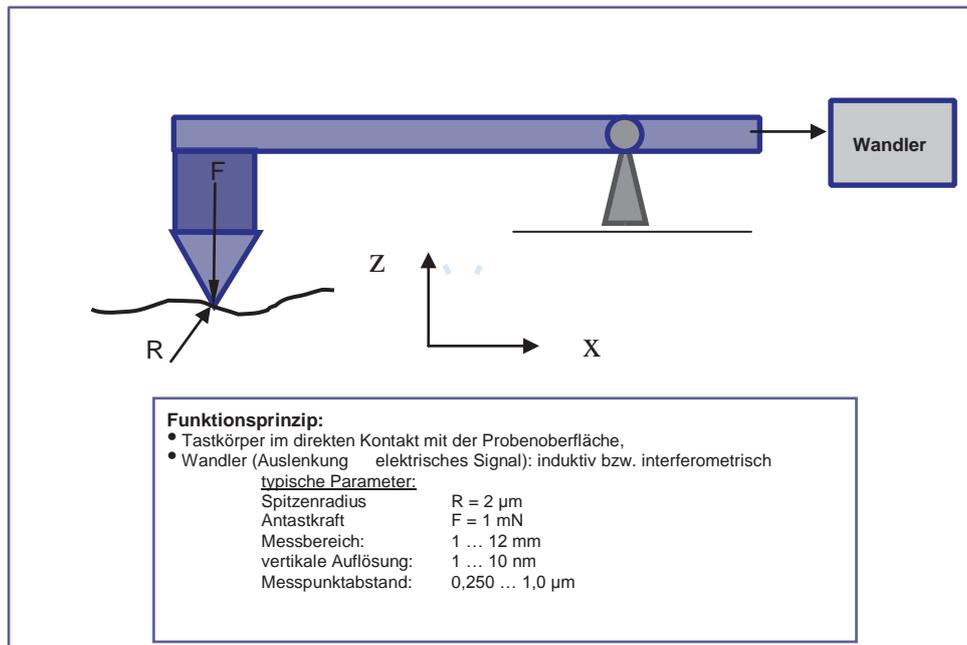


**Bild 1: Anwendungsbereiche von Messgeräten für geometrische Merkmale**

### 3.3 Taktile Profilometer

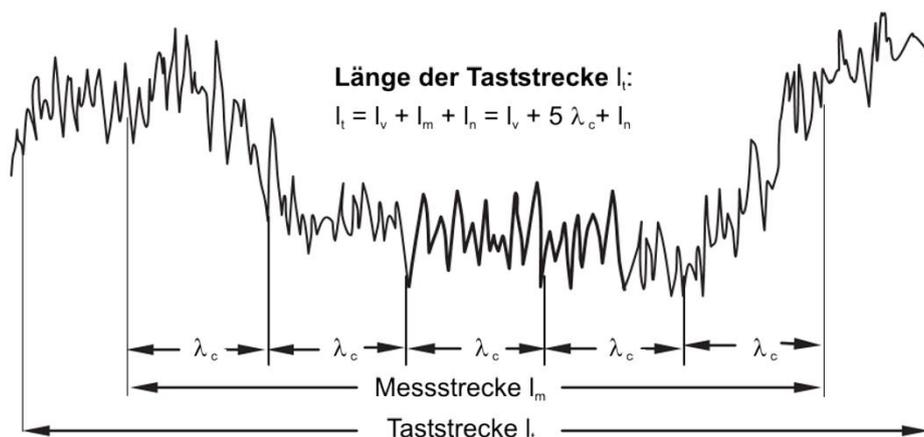
Das Grundprinzip der taktilen Profilometer ist zunächst vergleichsweise einfach. Ein nadelförmiger Tastkörper wird mit einer definierten Tastkraft in Kontakt mit der zu messenden Oberfläche gebracht und über diese hinwegbewegt, wobei die Auslenkungen  $z_i(x_i)$  in ein elektrisches Signal umgewandelt werden (Bild 2). Als Wandler dienen induktive bzw. interferometrische Systeme. Die kommerziell verfügbaren taktilen Profilometer unterscheiden sich u. a. durch die Anwendungsbedingungen (portable Messgeräte, stationäre Messgeräte), durch die Messbereiche sowie die messtechnisch relevanten Parameter Auflösung und Messunsicherheit. Durch die Auswahl der Tastkörper kann eine weitere Anpassung an die speziellen Anforderungen von Messaufgaben erfolgen. Taktile Messverfahren sind vergleichsweise unempfindlich gegenüber leichten Verschmutzungen (Ölfilm / Fettfilm) der zu messenden Oberflächen.

Die mechanische Wechselwirkung zwischen Tastkörper und Messobjekt ist mit elastischen Deformationen, bei entsprechend empfindlichen Oberflächen auch mit plastischen Deformationen verbunden, was die Anwendung in bestimmten Fällen ausschließt. Trotz einiger Restriktionen sind taktilen Profilometer in der Oberflächenmesstechnik am weitesten verbreitet und stellen Referenzgeräte dar. Taktile Messungen können als linien- oder flächenhafte Scans ausgeführt werden, was in der Auswertung schließlich die Berechnung von 2D- bzw. 3D-Parametern ermöglicht. Zur Gewährleistung der Übertragbarkeit von Messungen sind die Messbedingungen und Auswerteverfahren in Standards definiert. Das betrifft zunächst die Auswahl der Mess-Strecke, den Spitzenradius des Tastkörpers sowie den Digitalisierungsabstand der Ordinaten.

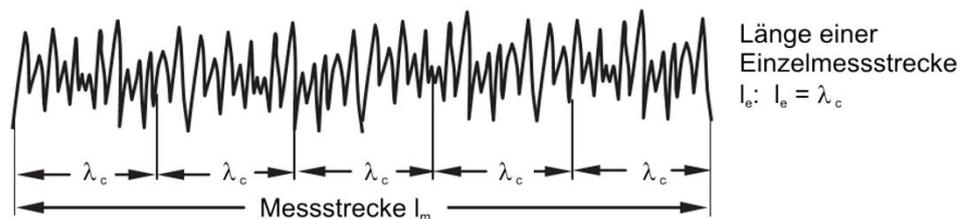


**Bild 2: Grundprinzip und typische Merkmale von taktilen Profilometern**

Gliederung der Taststrecke (ungefiltertes Profil)



Gliederung der Messstrecke (R-Profil)



**Bild 3: Gliederung der Taststrecke und der Mess-Strecke**

### 3.4 Messung und Auswertung von Oberflächenprofilen

Ein wesentlicher Parameter ist in diesem Zusammenhang die Grenzwellenlänge  $\lambda_c$ , die einerseits die Mess- bzw. Abtaststrecke bei der Messung bestimmt und zum anderen bei der nachfolgenden Filterung zur Trennung von Rauheit und Welligkeit die Übertragungscharakteristik des Filters festlegt (Bild 3; Bild 4).

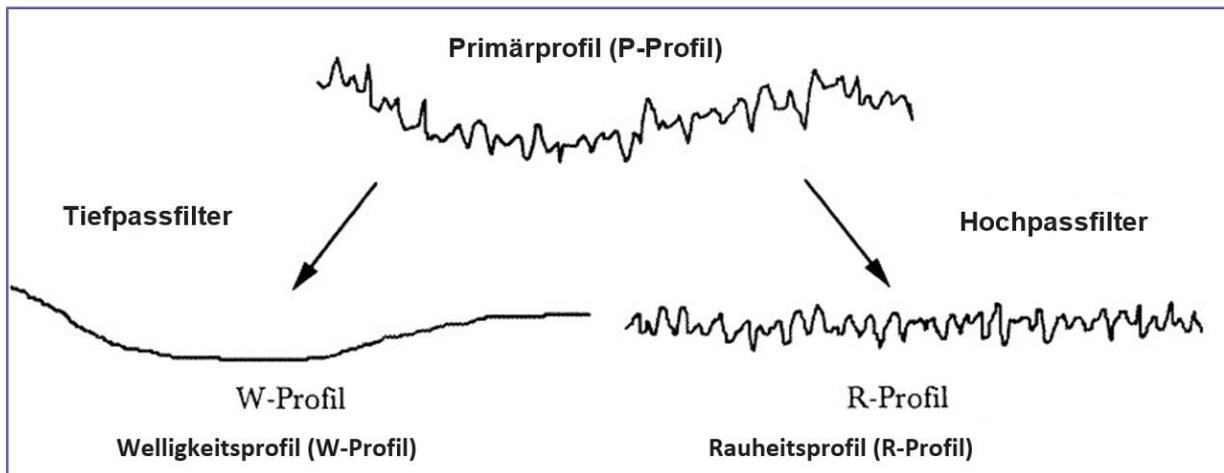


Bild 4: Profilarten in der Oberflächenmesstechnik

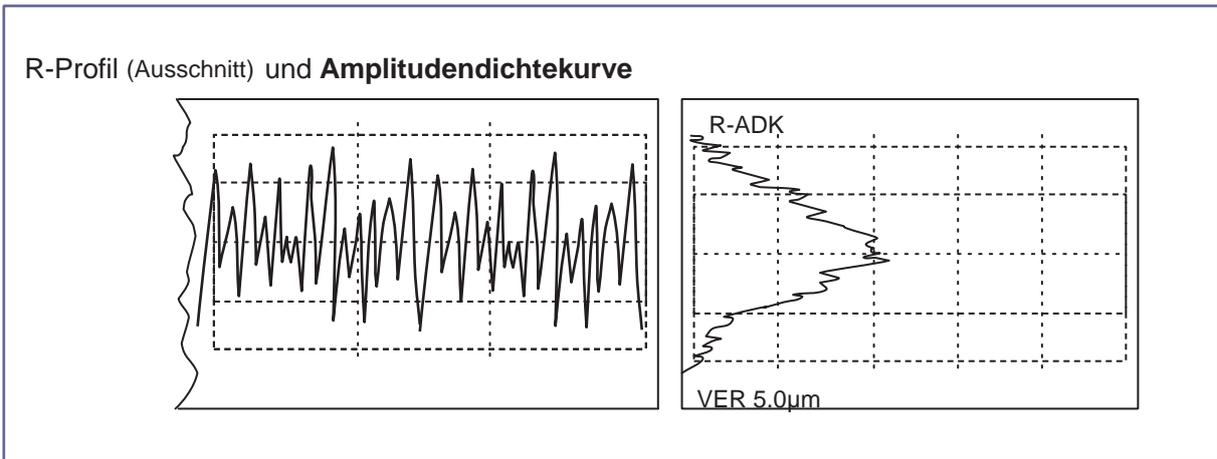
Aufbauend auf diesen Profilen können durch Anwendung entsprechender Berechnungsvorschriften die eigentlichen Messgrößen ermittelt werden. Die Oberflächenkenngrößen können unterteilt werden in:

- Senkrechtkenngößen
- Waagrechtkenngößen
- Hybrid-Kenngrößen
- Charakteristische Kurven und abgeleitete Kennwerte

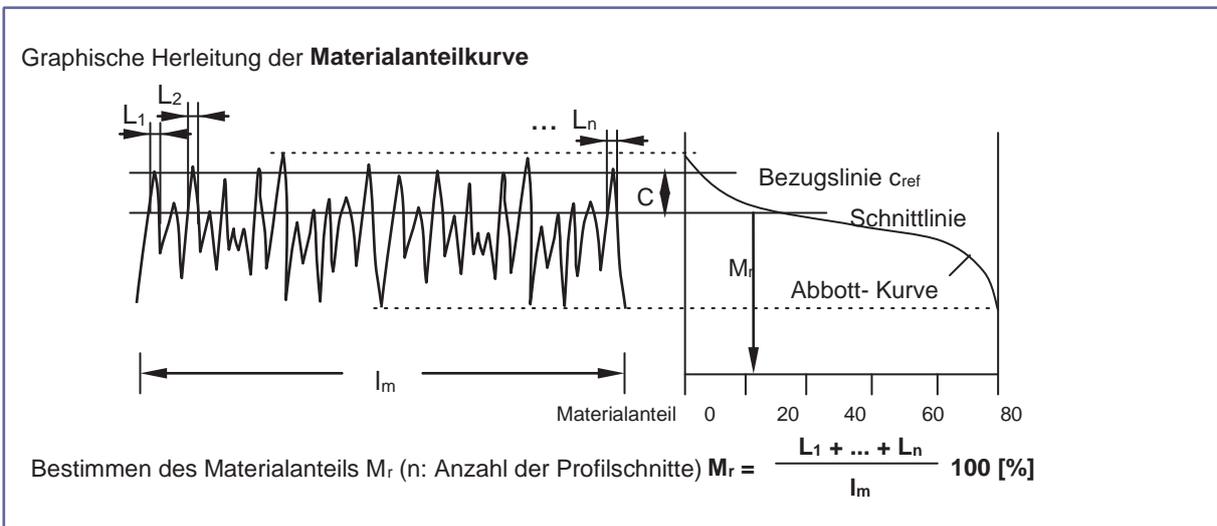
In der Praxis werden vor allem folgende Senkrechtkenngößen verwendet:

Arithmetischer Mittenrauhwert $R_a$	$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l  z(x)  dx$	(Gl. 1.1)
Quadratischer Mittenrauhwert $R_q$	$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l z^2(x) dx}$	(Gl. 1.2)
Gemittelte Rauhtiefe $R_z$	$R_z = \frac{1}{n} (Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n)$	(Gl. 1.3)
Rauhtiefe $R_t$	senkrechter Abstand des höchsten vom niedrigsten Profilpunkt	
Maximale Rauhtiefe $R_{max}$	größte Einzelrauhtiefe $Z_i$ , d.h. der größte innerhalb einer Einzelmessstrecke ermittelte Abstand zwischen höchstem und niedrigstem Profilpunkt	

Zu den charakteristischen Kurven gehören die Amplitudendichtefunktion bzw. -kurve und die Materialanteilkurve. Die Amplitudendichtefunktion gibt die Häufigkeitsdichte-Funktion der Profil-Ordinaten wieder (Bild 5). Diese sagt aus, mit welcher Häufigkeit/Wahrscheinlichkeit ein Ordinatenwert im Profil vorhanden ist. Die Materialanteilkurve (Abbott-Kurve, Traganteilkurve) stellt den Materialanteil als Funktion der Schnittlage dar (Bild 6).



**Bild 5: Ermittlung der Amplitudendichtekurve**



**Bild 6: Ermittlung der Materialanteilkurve**

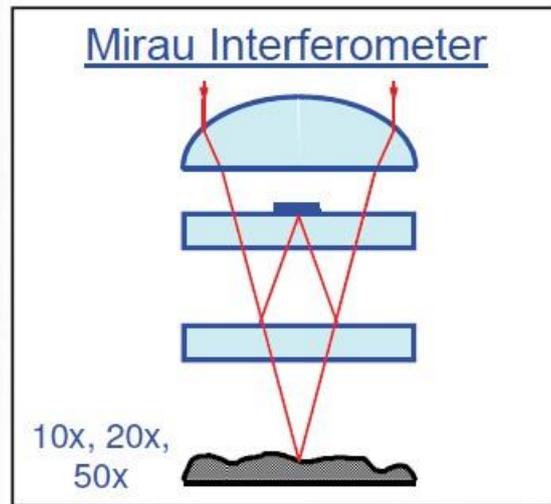
### 3.5 Optische Oberflächenmessgeräte

Optische Oberflächenmessgeräte basieren auf einer großen Vielfalt unterschiedlicher Messprinzipie. Die Messung kann mit einem optischen Punktsensor (z. B. achromatisch konfokaler Sensor) erfolgen, der mit einem entsprechenden Positioniersystem verbunden ist, oder die Oberfläche wird flächenhaft erfasst (z. B. konfokales Mikroskop, Weißlicht-Interferenzmikroskop), wobei ein Positioniersystem für das Scannen in z-Richtung sowie zur Erweiterung des Messbereiches in der x-y-Ebene dient. Optische Oberflächenmessgeräte auf der Basis der Weißlicht-Interferometrie sind aufgrund einer Reihe von Merkmalen für eine Vielzahl anspruchsvoller Messaufgaben in der Oberflächenmesstechnik sehr gut geeignet.

Die Anwendungsgebiete sind:

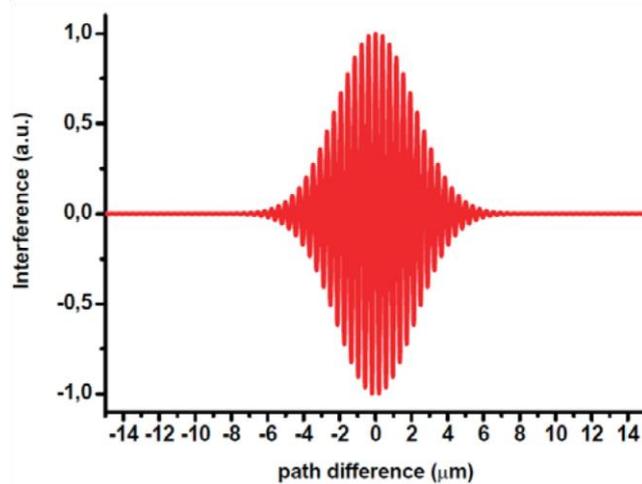
- hochauflösende optische 3D-Oberflächenmessung
- hochauflösende 3D-Schichtdicken-Messung (Dickschicht, Multi-Layer-Schichten, Dünnschicht)

Das Messprinzip „Weißlicht-Interferenzmikroskopie“ wird auch als „**VSI** Vertical Scanning Interferometry“ bezeichnet. Ein Weißlicht-Interferenzmikroskop ist vom Grundaufbau ein (Auflicht-) Mikroskop mit integrierter Interferometer-Anordnung (Bild 7) sowie einer hochauflösenden z-Positionierachse.

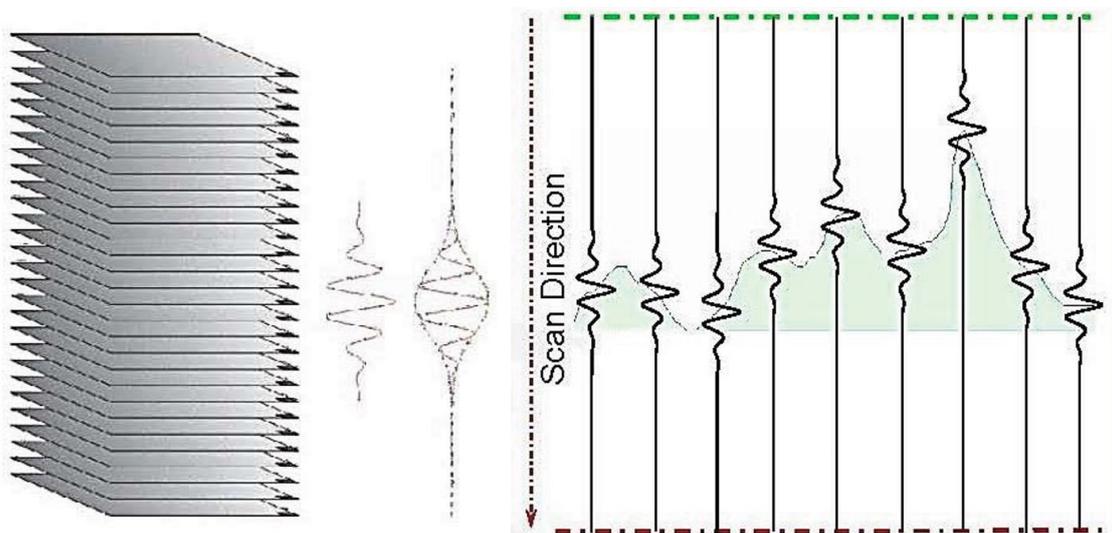


**Bild 7: Schematische Darstellung eines Mirau-Interferometers**

Es wird eine Lichtquelle mit kurzkohärentem Licht (Weißlicht, monochromatisches Licht / Kohärenzlänge  $\approx 5 \mu\text{m}$ ) benutzt. Daraus resultiert, dass Interferenzerscheinungen nur bei optischen Weglängendifferenzen zwischen Referenz-Strahl und Mess-Strahl von  $\text{OPD} \approx 0$  auftreten. Das wird auch als „oberflächendiskriminierender Effekt“ dieser Anordnung bezeichnet (Bild 8).



**Bild 8: Interferenz bei kurzkohärentem Licht**



**Bild 9: Erfassung und Auswertung der Interferenz-Signale**

Zur Datenerfassung wird die Referenz (Spiegel) mit dem hochgenauen Positioniersystem (z-Achse) verschoben. Der Intensitätsverlauf der Interferenz-Signale wird dabei mit einer hochauflösenden Kamera für jedes Pixel zugeordnet zu den z-Positionen erfasst („Bildstapel“).

Mit einem Auswerte-Algorithmus werden die Maxima der Signalverläufe berechnet. So wird jedem Pixel eine Höhen-Information (z-Wert) zugeordnet. Im Messprozess wirkt jedes Kamera-Pixel wie ein kleiner optischer Abstands-Sensor (Bild 9).

Im Ergebnis der Messung liegt die Topographie der vorgesehenen Oberfläche des Messobjekts als 3D-Punktewolke vor. Folgende Merkmale des Weißlicht-Interferenzmikroskops sind für die Anwendung bedeutsam:

- Messobjekte mit einem Reflexionsgrad von 0,3% bis 100 % können gemessen werden
- Messbereich in der z-Achse (vertikal): 2,2 mm
- 0,1 Angstrom Auflösung über dem gesamten Messbereich in der z-Achse (vertikal); (die vertikale Auflösung ist unabhängig von der Objektiv-Vergrößerung)
- Wiederholbarkeit: < 0,2 Angstrom RMS bzw. < 0,1 % bei Stufenhöhen
- Auflösung lateral: in Abhängigkeit vom eingesetzten Objektiv (0,5 µm bis 5,4 µm)
- Messfeld: in Abhängigkeit vom eingesetzten Objektiv (6,4 mm x 6,4 mm bis 0,16 mm x 0,16 mm)
- Messbare Neigung von Profil-Elementen: in Abhängigkeit vom eingesetzten Objektiv (2,7° bis 38°)

Durch 3D-Messungen kann grundsätzlich ein größerer Umfang an Informationen über die Oberflächen erhalten werden. Die Vorgehensweise zur Datenauswertung ähnelt der Vorgehensweise bei der 2DMessung (Ausrichtung, Filterung). Neben den üblichen Senkrecht-Kenngrößen und Kenn-Funktionen sind eine Vielzahl von Parametern definiert, die zum Ziel haben Oberflächen im Hinblick auf ihre Funktion zu charakterisieren (ISO 25178). Dem gegenüber steht, dass in der Praxis Oberflächenmessungen überwiegend noch als 2D-Messungen ausgeführt werden.

#### 4. Literatur

- [1] von Weingraber, H.; Abou-Aly, M.: Handbuch Technische Oberflächen: Typologie, Messung und Gebrauchsverhalten; Vieweg, Braunschweig, 1989.
- [2] Whitehouse, D. J.: Handbook of surface and nanometrology; Inst. of Physics Publ., Bristol, 2003.
- [3] Whitehouse, D. J.: Handbook of surface metrology; Inst. of Physics Publ., Bristol, 1994.
- [4] Thomas, T. R.: Rough surfaces; Imperial College Press, London, 1999.
- [5] Sorg, H.: Praxis der Rauheitsmessung und Oberflächenbeurteilung; Hanser, München, 1995.
- [6] DIN EN ISO 1302 (06/02): Angabe der Oberflächenbeschaffenheit in der technischen Produktdokumentation.
- [7] DIN EN ISO 3274 (04/98): Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten.
- [8] DIN EN ISO 4287 (10/98): Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Begriffe, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit.
- [9] DIN EN ISO 4288 (04/98): Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit.