

# 3D-Kenngrößen nach ISO 25178

Christian Wiehr, Jörg Seewig,  
Technische Universität, Kaiserslautern

## 1 Einführung

Zur Charakterisierung der Oberflächenrauheit bilden 2D-Profilschnitte den Stand der Technik. Mess- und Auswertestrategien sind durch diverse ISO-Normen festgelegt und haben sich in der industriellen Praxis bewährt. Hierbei wird mit einem taktilen Messsystem ein Schnitt der Oberfläche abgetastet (ISO 3274)[5]; diese Daten werden zunächst gefiltert und aufbereitet (ISO 11562, ISO 13565-1)[8,9], um anschließend die Kennwerte zu berechnen (ISO 4287 / ISO 4288 / ISO 13565-2)[6,7,9]. Für eine sinnvolle Betrachtung der Oberfläche als Schnitt muss die generelle Oberflächenbeschaffenheit beachtet werden. Bei der Bewertung von Riefen ist es so zum Beispiel notwendig, die Messung orthogonal zur Riefenrichtung durchzuführen, um eine Aussage über deren Eigenschaften treffen zu können. Hat eine Oberfläche zufällig verteilte Strukturelemente, reicht ein 2D-Schnitt nicht mehr aus, um die Oberfläche ausreichend zu beschreiben, da die Position des Schnittes nicht gezielt bezüglich der Strukturelemente gewählt werden kann. Eine höhere Aussagekraft erhält man, indem man statt der Schnitte flächige Bereiche der Oberfläche abtastet. Mit dieser Erweiterung schafft man den Schritt zur flächenhaften 3D-Oberflächenmesstechnik.

Um die Messdaten einer 3D-Messung sinnvoll auszuwerten und somit die Oberfläche zu charakterisieren, sind Kenngrößen notwendig, die die mehr zur Verfügung stehenden Daten sinnvoll nutzen. Den Ursprung für diese neuen Kenngrößen bildet das EU-Projekt „Development of Methods for the Characterisation of Roughness in Three Dimensions“[2], welches 1990 begann und die sogenannten „Birmingham 14“-3D-Rauheitskenngrößen hervorbrachte. Im Anschluss erfolgte die Bewertung der „Birmingham 14“-Kenngrößen hinsichtlich der Aussagekraft über die Funktionalität von Oberflächen. Man stellte fest, dass die Kenngrößen, die zum Teil aus der 2D-Messtechnik übernommen wurden, nicht ausreichen, um die Funktionalität ausreichend zu beschreiben[3]. Daher wurde die Topografieauswertung um Kenngrößen erweitert, die eine funktions- und strukturorientierte Auswertung und damit eine echte 3D-Auswertung der Oberfläche möglich macht. Diese Erkenntnisse bilden die Basis für die Normenreihe EN ISO 25178, erarbeitet vom Technischen Komitee TC213 der Arbeitsgruppe WG16 der ISO, die die praktische Nutzung der 3D-Rauheitsmesstechnik ermöglicht.

## 2 Messverfahren

Zum Messen von Oberflächen existieren verschiedene Verfahren unterschiedlicher physikalischer Prinzipien und Eigenschaften. Hier wird ein Überblick über gängige Verfahren gegeben, die in der Praxis angewendet werden, bzw. die zukünftig mit steigender Verbreitung der 3D-Rauheitsmesstechnik und den zugehörigen Kenngrößen Anwendung finden können.

### 2.1 Taktile Messverfahren

Bei bisherigen taktilen Messverfahren wird die Oberfläche mit einer Tastnadel (meist mit Diamantspitze) abgetastet. Die Tastnadel wird durch eine Vorschubeinheit über die Oberfläche geführt, und

die Ablenkung der Tastnadel durch die Oberfläche durch einen Messwandler in Messwerte umgesetzt. Aus diesen Messwerten lassen sich dann nach ISO 4287 oder ISO 13565 Kennwerte ermitteln, mit deren Hilfe man (basierend auf dem Profilschnitt) die Struktur der Oberfläche beurteilen kann. Für eine flächige Messung werden entsprechend mehrere parallele Profilschnitte aufgezeichnet und zu einer Topografie zusammengesetzt. Um eine ausreichende Genauigkeit der Fläche zu erreichen, muss die Anzahl der parallelen Schnitte entsprechend hoch sein. Dies schlägt sich auf der benötigten Dauer der Messung nieder. Für eine Messfläche von  $(2 \times 2) \text{ mm}^2$  bei  $1 \mu\text{m}$  Digitalisierungsabstand sind beispielsweise etwa 8 Stunden Messzeit nötig. Damit ist dieses Verfahren im fertigungsnahen Bereich nicht praktikabel einzusetzen.

Weiterhin sind taktile Messungen nur sinnvoll bei Bauteilen mit harten Oberflächen, da empfindlichen Oberflächen (z.B. aus Leichtmetall oder Kunststoff) durch die Tastnadel beschädigt werden können. Solche Oberflächen müssen dann berührungslos (optisch) erfasst werden.

## 2.2 Optische Messverfahren

Statt einer taktilen Abtastung lässt sich die Topografie der Oberfläche auch optisch erfassen. Die Messung erfolgt berührungslos und kann damit auch schneller erfolgen. Nachfolgend werden die zwei Hauptgruppen und beispielhaft jeweils ein Messprinzip zur optischen Erfassung von Oberflächen beschrieben. Während *Punktsensoren* die Oberfläche wie der taktile Sensor sequenziell abtasten, können *flächenhafte Sensoren* die Oberfläche komplett erfassen, was die Messung weiter beschleunigt.

### 2.2.1 Optische Punktsensoren

Das Vorgehen des taktil linienhaften Messens aus 2.1 lässt sich erweitern, indem anstelle einer Tastnadel ein optischer Punktsensor eingesetzt wird. Durch die berührungslose Messung ist eine wesentlich höhere Abtastgeschwindigkeit im Vergleich zur taktilen Messung möglich. Begrenzend wirkt hier der Vorschub, der mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit zusätzliche Messabweichungen generiert.

Neben marktverfügbaren Systemen wie dem Fasersensor (interferometrisches Prinzip) oder Sensoren, die nach dem Autofokusprinzip arbeiten, sei hier beispielhaft der weit verbreitete konfokal chromatische Sensor genannt. Er macht sich den Effekt der chromatischen Aberration von Objektiven zu Nutze, bei dem die unterschiedlichen Wellenlängen des verwendeten Weißlichts beim Durchgang durch die Optik unterschiedlich stark gebrochen werden und somit unterschiedliche Fokusse ausbilden. Jeder Wellenlänge und somit jedem Fokus kann nun per Kalibrierung ein Höhenwert zugewiesen werden. Während einer Messung wird das von der Oberfläche zurückreflektierte Licht erfasst und mittels einer Spektralanalyse die Wellenlänge des am stärksten fokussierten Lichts (und damit dem intensivsten) der entsprechende Höhenwert an dieser Stelle zugeordnet.

### 2.2.2 Optische Flächensensoren

Hierunter verstehen wir Messsysteme, welche ein flächenhaftes Sensorarray (meist CCD oder CMOS-Chip) verwenden. In der Anwendung bewährt haben sich hier die konfokale Mikroskopie, die Fokusvariation und die hier beispielhaft beschriebene Weißlichtinterferometrie mit Mirau-Interferometer.

Die Interferometrie allgemein nutzt die Überlagerung von kohärentem Licht, um aus der Interferenz der Lichtwellen Informationen über die unterschiedliche Laufzeit und damit die Wegdifferenz der Lichtstrahlen zu schließen. Hierzu wird das kohärente monochromatische Licht in einen Objektstrahl und einen Referenzstrahl aufgeteilt. Der Objektstrahl wird auf die abzutastende Oberfläche geschickt und von dort reflektiert. Der reflektierte Strahl überlagert sich mit dem Referenzstrahl und

bildet Interferenzstreifen aus. Dieses Streifenmuster lässt sich nutzen, um die Oberflächentopografie zu rekonstruieren. Allerdings geht bei starken Höhenunterschieden die Eindeutigkeit der Zuordnung der Streifen verloren. Verwendet man dagegen Weißlicht statt monochromatischem Licht, dann kann man aus den Interferenzstreifen der verschiedenen Wellenlängen ein Korrelogramm bilden. Dieses beschreibt die Intensität des Lichts in Abhängigkeit der Wegdifferenz. Wenn die Weglängen der Strahlen identisch sind, ergibt sich an dieser Stelle ein Intensitätsmaximum. Beim schichtweisen Abtasten der Oberfläche kann die Intensität über einen Sensor gemessen werden. Da Weißlicht nur eingeschränkt interferenzfähig, also kurzkohärent ist, was den Weglängenunterschied der Strahlen auf etwa  $2\ \mu\text{m}$  beschränkt, resultiert außerhalb der Interferenzerscheinung nur eine mittlere Lichtintensität im Intensitätsverlauf. Die resultierenden Intensitätsfunktionen über der Scanhöhe werden dann ausgewertet und über das Maximum der Intensitätsfunktion lässt sich der optischen Weglänge ein Höhenwert zuordnen. Oftmals ermittelt man anstelle des Intensitätsmaximums den Intensitätsschwerpunkt, da das Korrelogramm meist mit Abweichungen überlagert ist und das Maximum somit einen messtechnisch unsicheren Höhenwert liefert.

### **2.3 Grenzen und Probleme**

Die Oberfläche beeinflusst optische Messungen stärker als taktile Messungen. So kommt hier auch das Reflektionsverhalten zum Tragen. Dies kann, wie auch bei Oberflächen mit großen Steigungen, dazu führen, dass in die Sensoren zu wenig Licht einfällt und dadurch Fehlstellen bei den Messwerten entstehen. Es ist zwar möglich, die Objektivöffnung zu vergrößern, dies reduziert allerdings die mögliche Messfläche. Beugungserscheinungen und Überlagerungen von Intensitätsfunktionen benachbarter Pixel sorgen ebenfalls für verfälschte Messwerte bzw. Fehlstellen. Weiterhin sind auch die optischen Eigenschaften der zu erfassenden Oberfläche bei der Messung und bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Beispielsweise können bei der Weißlichtinterferometrie Kanten, an denen zwei verschiedene Materialien auf gleicher Höhe, aber mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften aneinander angrenzen, fälschlicherweise als Höhenunterschied interpretiert werden, sogenannte Phasensprünge.

## **3 Messdatenaufbereitung**

Bevor die gemessenen Daten zu Kennwerten ausgewertet werden können, müssen sie zuerst signaltechnisch aufbereitet werden. Dieses ist notwendig, da die rohen Messdaten nicht nur die Rauheitsinformationen, sondern auch Informationen über Form und Welligkeit der Oberfläche enthalten. Diese müssen daher ausgefiltert werden, damit die Kennwerte, die die Rauheit der Oberfläche beschreiben sollen, nicht verfälscht werden. Die Messdatenaufbereitung funktioniert bei der 3D-Messtechnik ähnlich wie bei der klassischen 2D-Messtechnik. Aus den Messdaten wird über den sogenannten F-Operator die nominelle Form entfernt. Dies erfolgt mittels auf die Oberfläche angepasster Einpassalgorithmen. Anschließend wird das (hochfrequente) Messgeräterauschen mittels Tiefpassfilterung entfernt (S-Filter). Die resultierende Oberfläche enthält jetzt noch Informationen über Rauheit, Formabweichungen und Welligkeit. Sie wird für die Bewertung der gesamten Oberflächenfeinstruktur benutzt. Um die Rauheit der Oberfläche beschreiben zu können, müssen zuvor noch die Formabweichungen und Welligkeiten, die im Vergleich zur Rauheit niederfrequente Signale darstellen, mittels Hochpassfilter (L-Filter) entfernt werden.

## 4 Kenngrößen

Die größere Menge an Daten, die bei der 3D-Messung anfallen, erlaubt eine wesentlich detailliertere Charakterisierung von Oberflächen. Die dazu notwendigen Kenngrößen werden hier vorgestellt, um einen Überblick über die Möglichkeiten zur Topografiecharakterisierung zu geben.

### 4.1 Amplitudenkenngrößen

Die Amplitudenkenngrößen wurden weitestgehend von denen der 2D-Profilchnittauswertung übernommen und von der linienhaften auf die flächenhafte Auswertung übertragen. Die in der Praxis meistgenutzten 2D-Kenngrößen, der arithmetische Mittenrauwert  $R_a$ , der quadratischen Mittenrauwert  $R_q$  und die mittlere Rautiefe  $R_z$ , werden so zu den 3D-Kenngrößen  $S_a$ ,  $S_q$  und  $S_z$ . Die mittlere Rautiefe  $R_z$  ist nicht direkt übertragbar, da die Messstrecke in mehrere (meist 5) Einzelmessstrecken aufgeteilt wird, um durch die Mittelung der Kennwerte der Einzelstrecken eine größere statistische Sicherheit für den Kennwert der Gesamtstrecke zu erhalten. Bei einer flächenhaften Auswertung zur Bestimmung von  $S_z$  besteht das Problem der sinnvollen Auswahl der Einzelmessflächen. Daher ist im Normenentwurf festgelegt,  $S_z$  zunächst als Spitzenwert der gesamten Messfläche zu betrachten, d.h. es wird die Höhe der höchsten Spitze zur Tiefe des tiefsten Tals addiert. Da bei diesen Kenngrößen die Vorzeichenwerte der einzelnen Höhenwerte wegfällen, lassen sich beispielsweise spitzkämmige Oberflächen nicht von rundkämmigen unterscheiden. Dadurch ist keine sichere Bewertung des Funktionsverhaltens der Oberfläche mit nur diesen Kenngrößen möglich.

### 4.2 Räumliche Kenngrößen

Während Amplitudenkenngrößen die Höhenstruktur der Oberfläche auf einzelne Werte reduzieren, beschreiben die räumlichen Kenngrößen Strukturmuster der Oberfläche. Hierfür wird die Autokorrelationsfunktion (ACF, autocorrelation function) genutzt. Mit dieser lässt sich feststellen, wie ähnlich die Oberfläche mit sich selbst ist, um zum Beispiel Vorzugsrichtungen zu finden. Bei der ACF wird der Mittelwert der mit sich selbst multiplizierten, gegeneinander verschobenen Rauheitswerte der Messfläche berechnet. Durch die Normierung über die mittlere Leistung lässt sich festlegen, dass die ACF im Ursprung gleich 1 ist.

Eine gestrahlte Oberfläche hat beispielsweise eine zufällige Oberflächenstruktur und ist daher nur im Ursprung der ACF ähnlich mit sich selbst. In allen anderen Gebieten sorgt die Zufallsstruktur dafür, dass sich die Rauheitswerte durch die Mittelwertbildung ausgleichen und daher die ACF an diesen Stellen gegen Null geht. Dagegen weist eine gefräste Oberfläche durch den Vorschub des Werkzeugs eine periodische Riefenstruktur auf. Wird die ACF nun berechnet, stellt man in Riefenrichtung eine hohe Ähnlichkeit fest, während senkrecht zur Riefenrichtung die ACF genau wie die Höhe der Oberfläche periodisch ab- und zunimmt.

Mit der Autokorrelationslänge  $Sal$  und dem Textur-Aspekt-Verhältnis  $Str$  lässt sich feststellen, wie stark die Vorzugsrichtung ausgeprägt ist, und ob die Oberfläche eher isotrop oder anisotrop beschaffen ist. Die Erkennung der Vorzugsrichtung lässt sich vereinfachen, indem man die ACF über eine Fouriertransformation zum Leistungsdichtespektrum der Oberfläche überführt. Die Leistungsdichtespitzen geben dabei die Vorzugsrichtungen an.

### 4.3 Hybride Kenngrößen

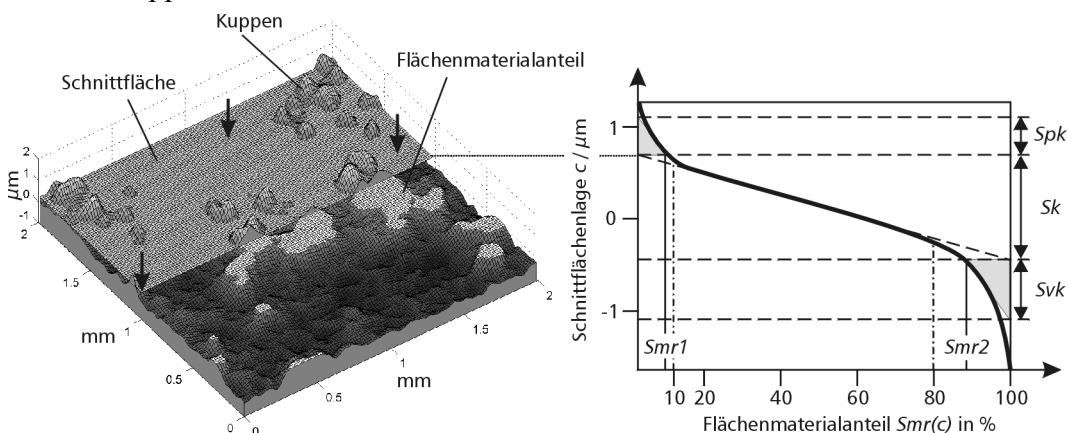
Die rein vertikalen als auch die rein räumlichen Informationen über die Oberflächentopografie lassen sich zu den sogenannten hybriden Kenngrößen kombinieren. Hier wird der Differenzialoperator genutzt, um die Steigung zu bestimmen, welche für die Kenngrößen  $Sdq$  und  $Sdr$  benötigt wird.  $Sdq$

ist die mittlere quadratische Oberflächensteigung, die z.B. dazu verwendet werden kann, das optische Verhalten der Oberfläche zu beurteilen. Mit  $Sdr$  wird das Verhältnis der wahren Oberfläche zur Messfläche berechnet und ist damit ein Maß für die Rauheit der Oberfläche. So ist bei rauen Oberflächen die wahre Fläche wesentlich größer als die Messfläche. Allerdings sorgt eine Differenzierung für eine Verstärkung der Störsignale, beispielsweise die des hochfrequenten Messgeräteraustauschs. Statistisch unsichere Kennwerte sind die Folge.

#### 4.4 Funktionsorientierte Kenngrößen

Um das Funktionsverhalten der Oberfläche zu bewerten, reichen die bisherigen Kenngrößen nicht aus, da sie die Oberflächen nur allgemein beschreiben. Mit den funktionsorientierten Kenngrößen wird der Fokus auf funktionsrelevante Strukturen der Topografie wie Kuppen, Riefen und den Kernbereich der Oberfläche gelegt. So sind die Kuppen beispielsweise relevant als Kontakt- und Reibflächen zu anderen Oberflächen, während die Riefen wichtig für die Aufnahme von Schmiermitteln sind, und der Kernbereich für die mechanische Belastbarkeit des Werkstücks sorgt.

Kern der funktionsorientierten Kenngrößen ist die Flächenmaterialanteilkurve (bezeichnet als  $Smr$ ), die auch schon länger als Abbott-Kurve in der 2D-Messtechnik industriell erfolgreich eingesetzt wird, insbesondere in der ISO 13565-2. Sie beschreibt den Materialanteil der Oberfläche abhängig von der Höhe einer Schnittfläche durch die Oberfläche (siehe Bild 1). Der flache, zentrale Teil der Kurve zeigt hier den Kernbereich, umgeben von steilen Anteilen (bezeichnet als  $Smr1$  und  $Smr2$ ), die den Kuppen- und den Riefenanteil beschreiben.



**Bild 1:** Darstellung einer Oberfläche mit Schitzebene und herausragenden Kuppen (links) und daraus abgeleiteter Flächenmaterialanteilkurve (rechts)

Basierend auf der Abbott-Kurve lassen sich weitere Kenngrößen definieren: Die Kernrauheit  $Sk$  gibt an, wie belastbar die Oberfläche in ihrem Kernbereich ist, und die reduzierte Spitzenhöhe  $Spk$  bzw. die reduzierte Riefentiefe  $Svk$  geben an, um welche Höhe die Kuppen bzw. Riefen vom Kernbereich herausstehen. Hierdurch lässt sich das Funktionsverhalten charakterisieren. Über die Integration der Flächenmaterialanteilkurve lässt sich auch das Materialvolumen  $V_m$  oder das materialfreie Volumen  $V_v$  pro Flächeneinheit ermitteln.

#### 4.5 Strukturorientierte Kenngrößen

Die bisher vorgestellten Kenngrößen sind integrale Größen, die sich auf die gesamte Oberfläche beziehen, aber mit denen sich einzelne Strukturen der Oberfläche nicht beschreiben lassen. Um diese einzelnen Strukturen wie etwa Riefenkanäle zur Aufnahme von Schmiermittel zu charakterisieren, wird auf Techniken aus der Orografie (einem Spezialgebiet der Geowissenschaften, das sich mit der Struktur von Gebirgen beschäftigt) zurückgegriffen. Die Oberfläche wird hier als Land-

schaft betrachtet, bestehend aus Hügeln (mit Spitzen) und Tälern (mit Tiefpunkten). Diese Landschaft wird nun „beregnet“, das Wasser fließt in Richtung der Gradienten der Oberfläche ab und bildet Abflusslinien, wo es zu den Tiefpunkten hin abfließt, und Wasserscheiden, die die Grenze zwischen Tälern bilden. Schnittpunkte von Abflusslinien und Wasserscheiden stellen Sattelpunkte in der Landschaft dar. Die Abflusslinien, Wasserscheiden und Sattelpunkte, die sich so ergeben, lassen sich in einem sogenannten „change tree“ darstellen. Dieser lässt sich dann nach den gewünschten Strukturmerkmalen auswerten, zum Beispiel um die Anzahl der Spitzen der Topografie zu erhalten. Durch Messgeräteraustauschen ergibt sich eine hohe Zahl an Spitzen und Tiefpunkten, was den change tree stark anwachsen lässt. Daher reduziert man ihn, indem man irrelevante Punkte herauschneidet („pruning“). Das nach Wolf benannte „Wolf pruning“ entfernt anhand der Höhendifferenz jedes Extrempunktes zum nächsten Sattelpunkt den oder die Extrempunkte mit der geringsten Differenz. Dies wird so lange durchgeführt, bis eine Mindestanzahl von Punkten oder ein Mindestabstand zwischen allen Punkten erreicht ist.

## 5 Fazit

Die 3D-Rauheits-Messtechnik bietet aufgrund dem mehr an Daten vielfältige Möglichkeiten zur Oberflächencharakterisierung, die weit über die bisherigen der 2D-Messtechnik hinausgehen. Dies geht allerdings einher mit einer Steigerung an Komplexität. Mit der neu erscheinenden Normenreihe EN ISO 25178 werden Kenngrößen und Auswertetechniken definiert, die die bestehenden Möglichkeiten nicht nur auf die 3D-Welt überträgt, sondern sie auch um die Fähigkeit der Beschreibung der Struktur und der Funktionalität der Oberfläche erweitert.

## 6 Literatur

- [1] D. J. Whitehouse, *Handbook of Surface Metrology*, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, **1994**, ISBN 0-7503-0039-6.
- [2] Stout et. al., *The Development of Methods for the Characterization of Roughness in three Dimensions*, Commission of the European Communities. Publ. No. EUR 15178 EN, **1993**, ISBN 0-70441313-2.
- [3] L. Blunt, X. Jiang, *Development of a Basis for 3D Surface Texture Standards “Surfstand”*, **2003**, ISBN 1 9039 9611 2
- [4] E. Mainsah et. al., *Metrology and Properties of Engineering Surfaces*, Kluwer Academic Publishers. **2001**, ISBN 0-412-80640-1.
- [5] ISO 3274, *Geometrical Product Specification (GPS) – Surface Texture: Profile method – Nominal characteristics of contact (stylus) instruments*, **1996**
- [6] ISO 4287, *Geometrical Product Specification (GPS) – Surface Texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters*, **1997**
- [7] ISO 4288, *Geometrical Product Specification (GPS) – Surface Texture: Profile method – Rules and procedures for the assessment of surface texture*, **1997**
- [8] ISO 11562, *Geometrical Product Specification (GPS) – Surface Texture: Profile method – Metrological characteristics of phase correct filters*, **1996**
- [9] ISO 13565 Part 1/ Part 2, *Geometrical Product Specification (GPS) – Surface Texture: Profile method – Surfaces having stratified functional properties*, **1996**