

# Oberflächenmesstechnik

## Rauheitsmessung



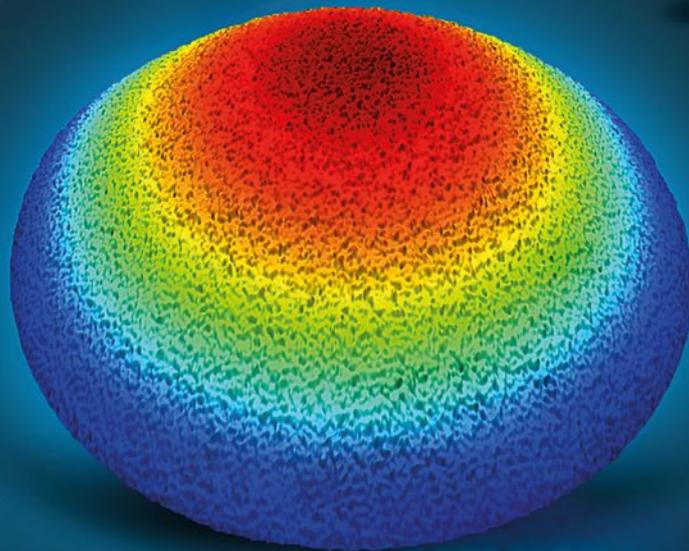
FORMABWEICHUNG



WELLIGKEIT



RAUHEIT

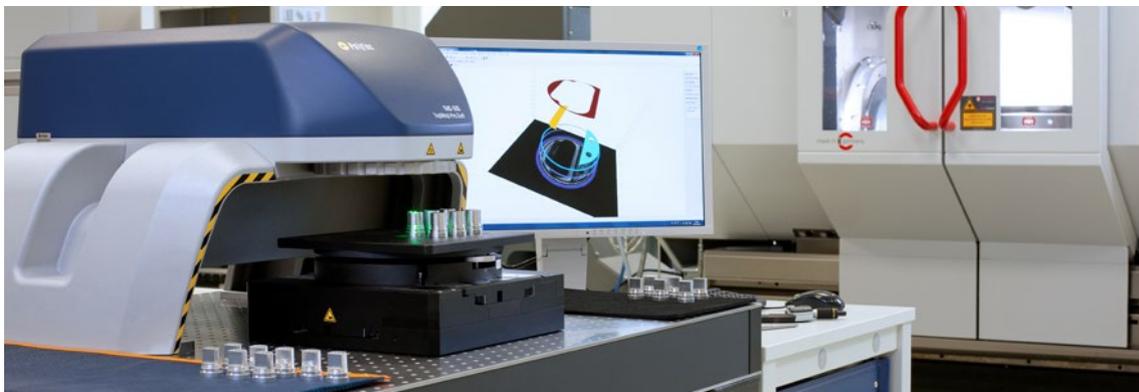


# Oberflächengestalt und Konzept der Rauheitsmessung

Für die Funktionserfüllung eines Bauteils ist die Ausgestaltung der Bauteiloberfläche von besonderer Bedeutung. Das gilt gleichermaßen für Maschinenkomponenten wie für Medizinprodukte, die Halbleiterindustrie bis hin zu Konsumgütern aller Art. Als das Bindeglied zur Außenwelt ist die Oberfläche verantwortlich für die Gleiteigenschaften und die Verschleißfestigkeit, aber auch für die Dichtheit einer Bauteilpaarung sowie für das optische Erscheinungsbild. Eine Oberfläche kann derart gestaltet sein, dass sie großen Kräften standhält, gut haftet oder gleitet. Sie kann im Hinblick leichter Sterilisierbarkeit, widerstandarm elektrischer Leitfähigkeit oder bestmöglicher Wärmeübertragung optimiert sein. Nicht zuletzt entscheidet die Ausgestaltung der Oberfläche

über die Ästhetik und Anmutung und damit über das optische und haptische Qualitätsempfinden. Der mikroskopischen Struktur einer Oberfläche kommt folglich eine hohe Bedeutung zu, herstellungsbedingte Gestaltabweichungen der Oberfläche können zur Beeinträchtigung der Bauteilfunktion oder zum frühzeitigen Ausfall des Bauteils im Betrieb führen.

Die Oberfläche ist das Ergebnis eines oftmals mehrstufigen Herstellungsprozesses, bei dem verschiedene Werkzeuge und Fertigungsverfahren zum Einsatz kommen. Nur ein sorgsam abgestimmter und qualitätsüberwachter Fertigungsprozess kann den hohen Anforderungen an die Oberflächenqualität gerecht werden.

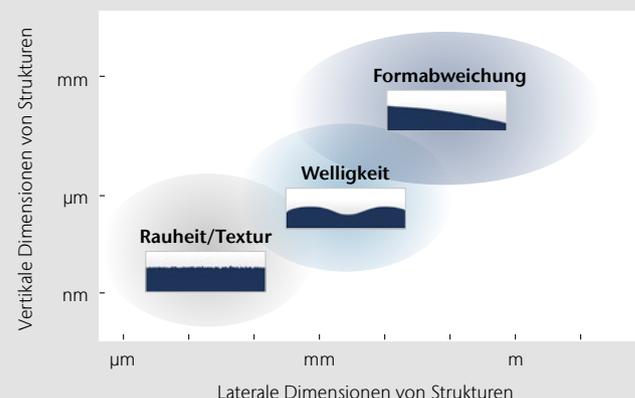


Bei genauer Betrachtung ist jede Oberfläche ein komplexes Gebilde, eine Überlagerung zahlreicher Strukturen unterschiedlicher Größenordnung und Längenausdehnungen. Zu den Oberflächenbestandteilen zählen Form, Welligkeit und Rauheit. Die Abweichungen von der idealisierten, vollständig ebenen und glatten Oberfläche haben ihre Ursache im Fertigungsprozess.

Die mithilfe einer Oberflächenmessung zur Verfügung gestellte Information kann wertvolle Hinweise für die Optimierung des Fertigungsprozesses sowie dessen kontinuierliche Überwachung liefern.

Sehr oft wird hierbei explizit eine bestimmte Ausprägung der jeweiligen Bestandteile für die Funktionserfüllung gefordert. Jedoch können fehlerhafte Führungen der Werkzeugmaschinen, nicht einwandfreies Einspannen des Werkstücks und Verzug durch thermische Einwirkungen ungewollte Formabweichungen verursachen. Unwucht und Maschinenschwingungen prägen sich als Welligkeit auf der Oberfläche aus, während sich Bearbeitungsverfahren und die Spanbildung auf die Rauheit einer Oberfläche auswirken.

Längenskala Oberflächenbestandteile

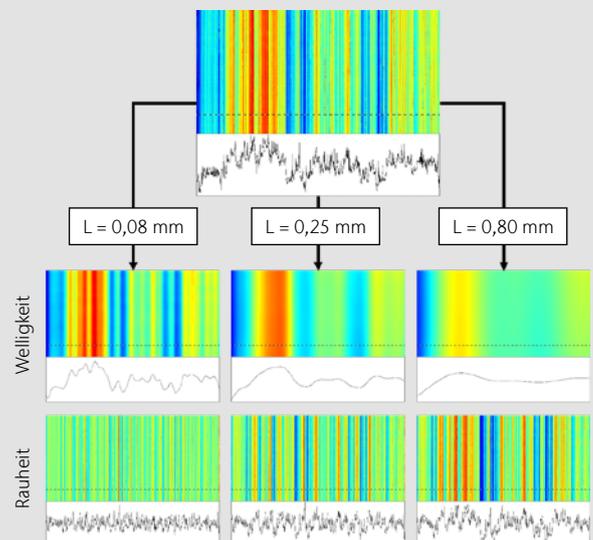


**Form, Welligkeit und Rauheit sind keine scharf voneinander abgegrenzten Merkmale, die separiert nebeneinander vorliegen. Vielmehr kann eine Oberfläche als Überlagerung zahlreicher Wellenlängen beschrieben werden, wobei der Übergang von den besonders langwelligen Formanteilen über die Welligkeits- bis hin zu den kurzwelligen Rauheitsanteilen der Oberfläche fließend erfolgt.**

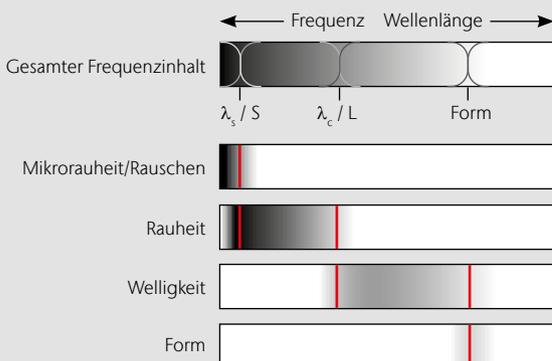
Die Separierung der Rauheit von der Welligkeit erfolgt mithilfe von Frequenzfiltern, deren Parametrisierung wesentlich darüber entscheidet, welche Oberflächenmerkmale als Welligkeit und welche als Rauheit zu behandeln sind und im weiteren Verlauf der Messkette ausgewertet werden sollen. Ein Frequenzfilter spaltet dabei diejenigen Komponenten der Oberfläche ab, die unterhalb oder oberhalb eines bestimmten Grenzwertes, der sog. Grenzwellenlänge (profilhafte Auswertung) oder des Nesting Index (flächenhafte Auswertung), liegen. Um dem fließenden Übergang der Oberflächenbestandteile gerecht zu werden, erfolgt diese Abspaltung nicht scharf bei einer Wellenlänge, sondern durch kontinuierliche Dämpfung der auszuschließenden Frequenzanteile. Die für die Abtrennung der Mikrorauheit sowie für die Separierung von Welligkeit und Rauheit eingesetzten Filter werden bei der profilbasierten Rauheitsauswertung als  $\lambda_s$ - und  $\lambda_c$ -Filter, bei der flächenhaften Auswertung als S- und L-Filter bezeichnet. Es handelt sich hierbei um Tief- bzw. Hochpassfilter mit Gauß-Charakteristik. Nach Anwendung dieses Gauß-Filters bleibt für die weitere Auswertung ein bandbreitenbegrenztes Profil bzw. eine bandbreitenbegrenzte Oberfläche übrig.

Die Charakteristika „Rauheit“ und „Welligkeit“ sind also nicht starr definiert, sondern hängen maßgeblich von der gewählten Grenzwellenlänge ab. Sie sind somit das Ergebnis einer mathematischen Trennung von Frequenzanteilen. Durch Überlagerung des Welligkeits- mit dem Rauheitsprofil ergibt sich erneut das gemessene Profil.

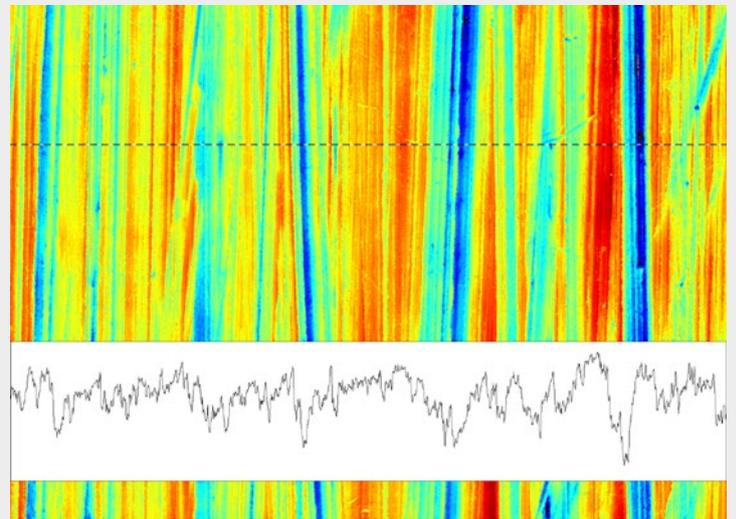
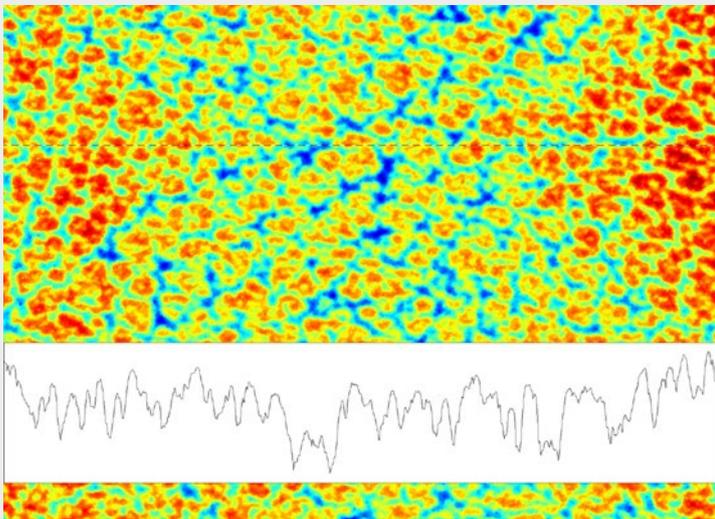
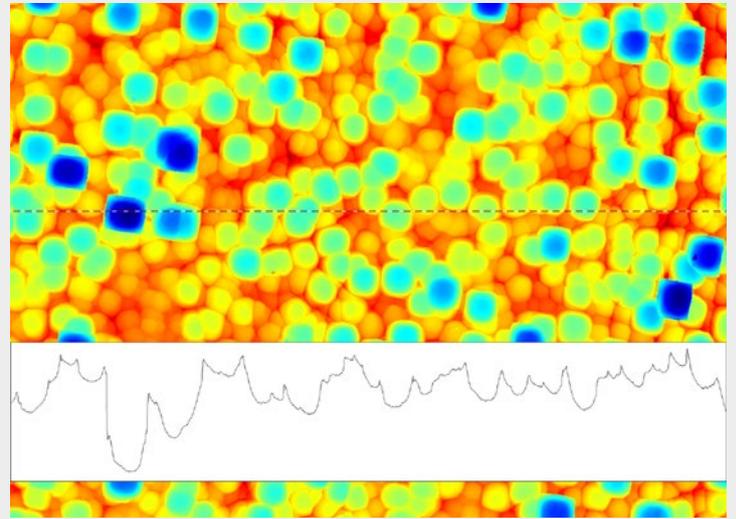
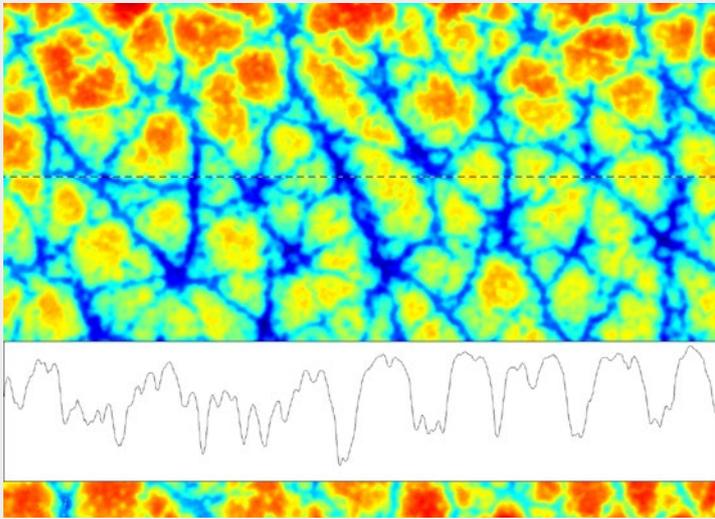
**Einflüsse der gewählten Grenzwellenlänge**



Bei der Bestimmung von Oberflächenkenngrößen kommt der Wahl der Grenzwellenlänge eine zentrale Bedeutung zu. Durch Veränderung dieses Parameters werden Anteile, die zuvor als Welligkeit gewertet wurden, nun der Rauheit zugeordnet oder umgekehrt. Es gilt: Je kleiner die Grenzwellenlänge gewählt wird, desto stärker gehen die hochfrequenten (= rauen) Anteile der Oberfläche in das Welligkeitsprofil mit ein. Das verbleibende Rauheitsprofil nimmt in seiner Amplitude ab, die Rauheitskennwerte fallen kleiner aus. In der Konsequenz bedeutet das, dass sich für dieselbe Oberfläche bei unterschiedlicher Einstellung der Grenzwellenlänge unterschiedliche Messwerte für die interessierende Messgröße ergeben.



# Profil- und flächenhafte Rauheitsauswertung



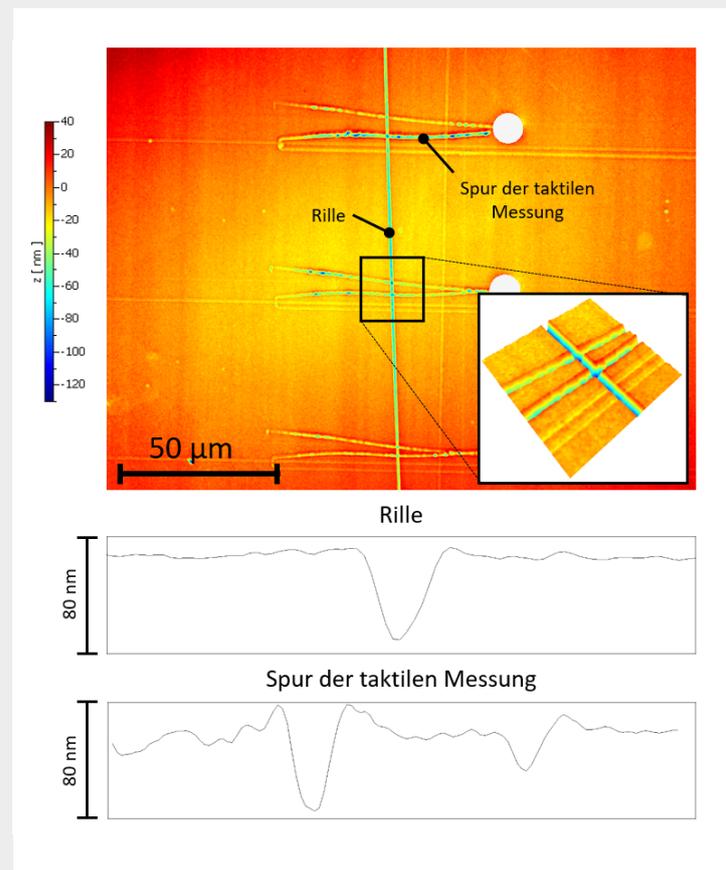
Flächenhaft ermittelte Messdaten geben ein vollständiges und leicht erfassbares Bild der gesamten Oberfläche. Dagegen enthält ein Messprofil immer nur einen kleinen Ausschnitt des gesamten Bildes und ist zudem weniger intuitiv zu erfassen.

Die Prüfung einer Oberfläche und insbesondere deren detaillierte Oberflächenbeschaffenheit wie Rauheit und Oberflächenparameter erfolgt üblicherweise mithilfe abtastender Messspitzen oder Tastschnittgeräten, wobei die Tastspitze über die Bauteiloberfläche geführt und dabei durch die Oberflächentextur vertikal ausgelenkt wird. Bei diesem Verfahren wird die Information über die Oberfläche entlang eines Profils (2D) gewonnen.

Die profilhafte Messung und Auswertung der Rauheit ist bereits lange in der Normung verankert und wird in der industriellen Praxis vielfach angewendet. Inwieweit die Reduzierung der Oberfläche auf einen Profilschnitt brauchbare Ergebnisse liefert, hängt maßgeblich von der Oberflächenbeschaffenheit und den funktionsrelevanten Anforderungen ab. Weist die Oberfläche zufällig verteilte Strukturelemente auf, so wird das Ergebnis für den Rauheitskennwert stark von der gewählten Messposition beeinflusst. Die Beschreibung der Oberflächenbeschaffenheit als Profilschnitt genügt dann oftmals nicht mehr. Profilhafte Auswertungen erlauben nur eine begrenzte Aussage über die Ursache mangelnder Funktionsfähigkeit und beinhalten nur wenig Informationen für die Fertigungssteuerung.

Die dreidimensionale Messung ist dieser Limitierung nicht unterworfen. Sie liefert nicht nur ein für die menschliche Auffassungsgabe leichter greifbares Abbild der Oberfläche, sondern erlaubt auch eine funktions- und strukturorientierte Auswertung. Aus den flächenhaft vorliegenden Messdaten können weiterhin mühelos Linienprofile extrahiert und nach den Regeln der profilhaften Rauheitsauswertung bewertet werden. Im Unterschied zur taktilen Messung erfolgt die dreidimensionale optische Rauheitsmessung berührungslos und rückwirkungsfrei, empfindliche Oberflächen werden durch die Messung nicht beschädigt.

### Bilder von Beschädigungen durch taktile Messung:



Eine taktile Höhenmessung hat Kratzer in der Oberfläche hinterlassen, die in derselben Größenordnung liegen wie die zu messende Stufe (70 nm).

**Die Messketten für die flächen- bzw. profilhafte Auswertung werden in den jeweiligen Normenreihen ISO 25178 bzw. ISO 4287 beschrieben und unterscheiden sich im Detail voneinander:**

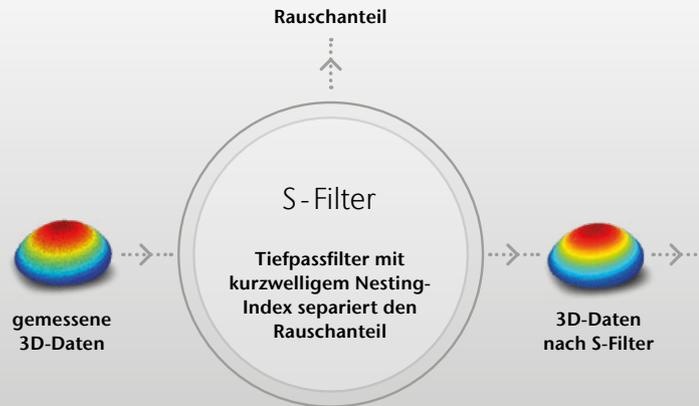
- Die Bezeichnungen sowohl für Frequenzfilter als auch für bandbreitenbegrenzte Oberflächen wurden in der Normung für die neuere flächenhafte Auswertung abgeändert. Bei der Bestimmung von Welligkeits- und Rauheitskenngrößen muss eindeutig gekennzeichnet werden, auf welche Oberfläche sich diese beziehen. In der Linienauswertung geht dieser Bezug aus der Bezeichnung der Kenngröße hervor. Hier entscheidet der erste Buchstabe des Texturparameters darüber, ob die Berechnung auf dem Primär- (P), Welligkeits- (W) oder Rauheitsprofil (R) zu berechnen ist.

Beispielhafte Rauheitsangaben:

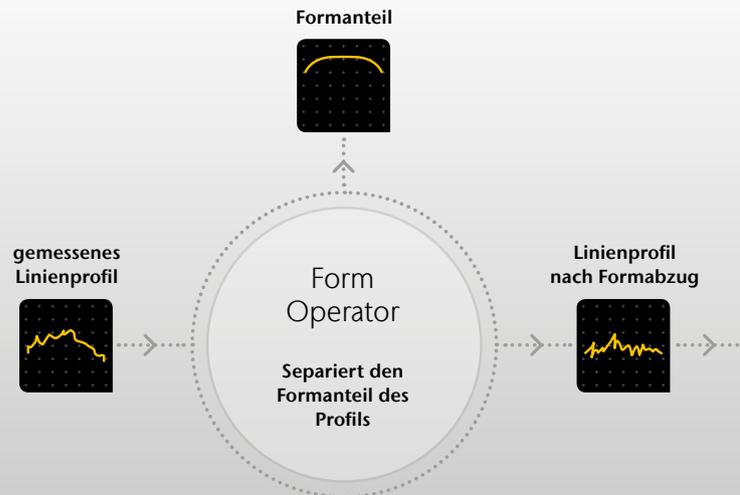
- Die Reihenfolge für die Anwendung von  $\lambda_s/S$ -Filtern und Formabzug ist in beiden Normenreihen vertauscht.
- Die Grenzwellenlänge, die Einzelmessstrecke und die Auswertelänge werden in Abhängigkeit der Oberflächeneigenschaften auf Grundlage einer Tabelle ermittelt. Hierzu wird der zu erwartende Texturparameter geschätzt und eine Testmessung mit den dieser Schätzung entsprechenden Einstellgrößen durchgeführt. Je nach Profilcharakteristik werden die Texturparameter  $R_{sm}$  bzw.  $R_z$  oder  $R_a$  bestimmt. Der Messwert wird anschließend mit der für diesen Bereich gültigen Grenzwellenlänge verglichen. Für eine korrekte Auswertung ist die kleinste Grenzwellenlänge zu wählen, für die die Bereichszugehörigkeit erfüllt ist. Der Konstrukteur/Entwickler kann ein hiervon abweichendes Vorgehen festlegen und in der technischen Zeichnung vermerken. Das ist insbesondere dann sinnvoll, wenn sich die Messgröße an einer Bereichsgrenze befindet. Bei konsequenter Anwendung der beschriebenen Vorgehensweise müssten andernfalls für zwei Bauteile gleichen Typs unterschiedliche Grenzwellenlängen, Mess- und Auswertestrecken herangezogen werden.

Für die flächenhafte Auswertung gibt es keine vergleichbare Tabelle zur Bestimmung des Nesting-Index. Für die Vergleichbarkeit der Flächentextur- mit den Profiltextrurparametern ist es jedoch empfehlenswert, dieselben Längen und einen vergleichbaren Nesting-Index zu wählen.

**Flächenauswertung (ISO 25178-1, -2, -3)**

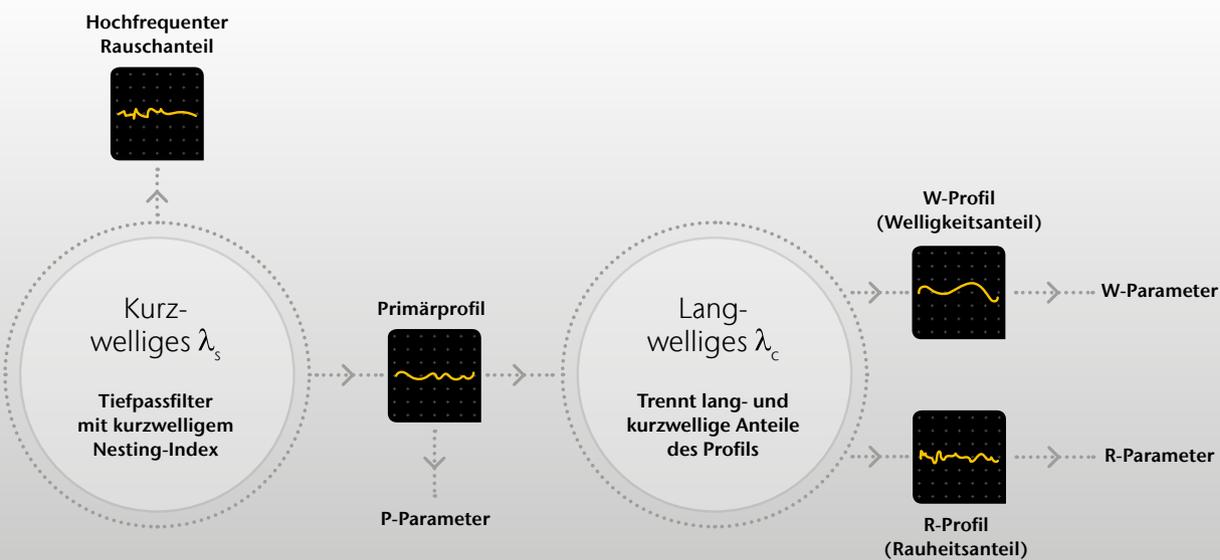
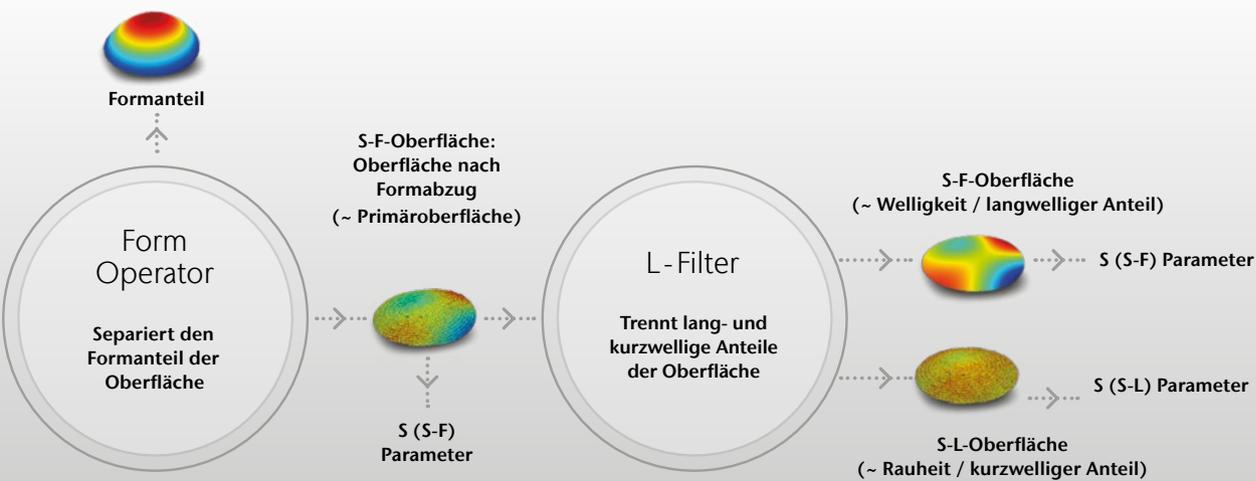


**Linienauswertung (ISO 4287, 4288 und ISO 3274)**



Periodische Profile	
$R_{sm}$ (mm) (Rillenbreite)	
>0.013 ... 0.04	
>0.04 ... 0.13	
>0.13 ... 0.4	
>0.4 ... 1.3	
>1.3 ... 4	

$R_s$  Spalte auch anzuwenden bei der Bestimmung von  $R_p, R_{sm}, R_{sm}$  und  $R_{\Delta q}, R_z$  Spalte auch anzuwenden bei der Bestimmung von  $R_v, R_p, R_c$  und  $R_c$

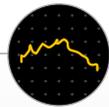


Aperiodische Profile		Nesting-Index/Grenzwellenlänge		Einzel-/Gesamtmessstrecke	
$R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$\lambda_c$ (mm)		$L_r$ / $L_n$ (mm)	
>0.025 ... 0.1	>0.006 ... 0.02	0.08		0.08 / 0.4	
>0.1 ... 0.5	>0.02 ... 0.1	0.25		0.25 / 1.25	
>0.5 ... 10	>0.1 ... 2	0.8		0.8 / 4	
>10 ... 50	>2 ... 10	2.5		2.5 / 12.5	
>50 ... 200	>10 ... 80	8		8 / 40	

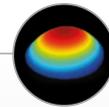
# Kenngrößen in der Oberflächenmesstechnik

Die mathematische Beschreibung zahlreicher Oberflächenkenngrößen findet sich in diversen internationalen Normen. In der praktischen Anwendung sind insbesondere die Normenreihen ISO 4287 und ISO 13565 für die 2D-Kenngrößen sowie die Flächennorm ISO 25178 von Bedeutung. Diese Standards definieren und beschreiben die gängigen Texturparameter.

Für die Vielzahl der Kenngrößen aus den Profilnormen findet sich ein Äquivalent in der erschienenen Flächennorm. Darüber hinaus bietet die flächenhafte Auswertung der Topografie jedoch aufgrund der hinzukommenden Dimension zusätzliche Möglichkeiten.



## Oberflächenkenngrößen



### ISO 4287, ISO 13565

#### 2D-Kenngrößen

##### Amplitudenparameter

Ra, Rq, Rz, Rp, Rv, Rc, Rsk, Rku, Pt

##### Räumliche Parameter

RSm, R<sub>Pc</sub>

##### Mischparameter

Rdq

##### Funktionale Parameter

Rmr, Rpk, Rk, Rvk, Mr1, Mr2, Rdc

### ISO 25178

#### 3D-Kenngrößen

##### Höhenparameter

Sa, Sq, Sz, Sp, Sv, Ssk, Sku

##### Funktionale Parameter (Fläche)

Smr, Smc, Spk, Sk, Svk, Smr1, Smr2, Spq, Smq, Svq, Sxp

##### Funktionale Parameter (Volumen)

Vvc, Vw, Vmp, Vmc

##### Räumliche Parameter

Sal, Str

##### Hybridparameter

Sdq, Sdr

##### Mischparameter

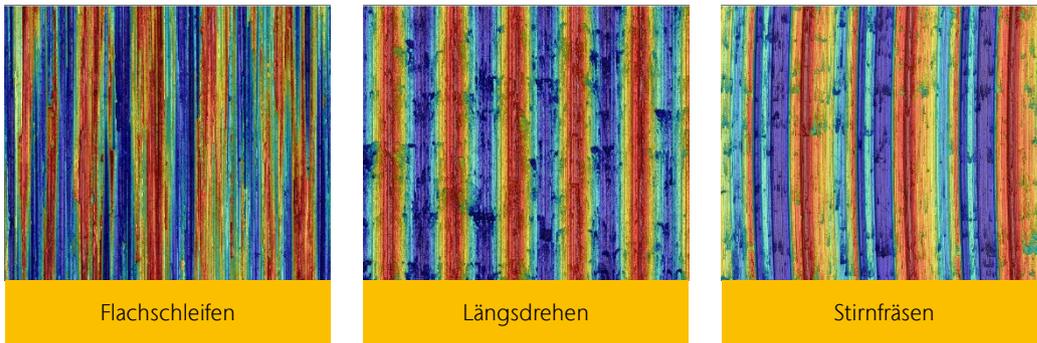
Std

##### Strukturorientierte Parameter

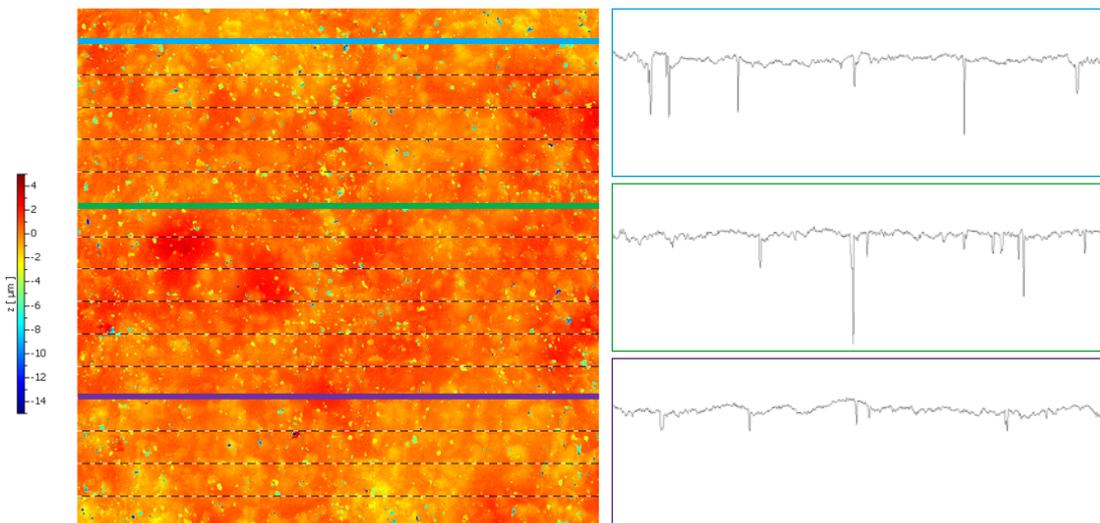
Spd, Spc, S10z, SSp, Ssv

Die häufig in der Praxis angewendeten Amplituden-/Höhenparameter wurden weitgehend auf die flächenhafte Auswertung erweitert. Die flächige Messung und Auswertung der Topografie hat dabei den Vorteil, dass sie nicht der Sensitivität der Messposition unterliegt und somit – insbesondere für inhomogene und fehlerbehaftete Oberflächen – zuverlässigere Ergebnisse liefert. Der

Parameterfamilie ist jedoch insgesamt gemein, dass sie die funktionalen Unterschiede zwischen spitzkämmigen und rundkämmigen Oberflächen nicht abbilden kann. Das heißt, dass sehr unterschiedlich hergestellte und ausgestaltete Oberflächen dennoch die gleichen Ergebnisse für diese Oberflächenkenngrößen aufweisen können.



Die Höhenparameter lassen begrenzten Rückschluss auf die Gestalt der Oberfläche zu. Mit verschiedenen Fertigungsverfahren hergestellte Oberflächen können trotz ihres unterschiedlichen Charakters die gleiche Rauheit aufweisen (hier:  $S_a/R_a \approx 1.6 \mu\text{m}$ ).



ISO 4287				
	Min	Max	Ø	Std
Ra $\mu\text{m}$	0,40	0,93	0,58	0,108
Rq $\mu\text{m}$	0,53	2,00	1,04	0,287

ISO 13565				
	Min	Max	Ø	Std
Rk $\mu\text{m}$	0,92	2,24	1,44	0,265
Rpk $\mu\text{m}$	0,13	1,38	0,52	0,241
Rvk $\mu\text{m}$	0,67	5,10	2,16	0,902

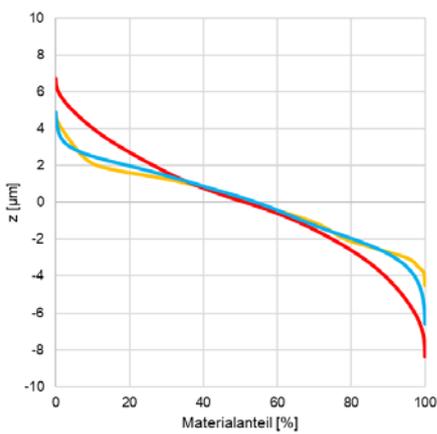
ISO 25178	
Sa $\mu\text{m}$	0,63
Sq $\mu\text{m}$	1,13
Sk $\mu\text{m}$	1,61
Spk $\mu\text{m}$	0,67
Svk $\mu\text{m}$	2,36

Im Fall von Oberflächen mit zufällig verteilten Strukturen ist der Messwert bei profihafter Rauheitsmessung empfindlich gegenüber der Messposition. Flächenhafte Rauheitskennwerte liefern stabilere und zuverlässigere Ergebnisse.

Die Funktionsparameter erlauben eine funktionsorientierte Bewertung der Oberflächenbeschaffenheit. Diese Bewertung erfolgt auf Basis der Materialanteilkurve. Sie entsteht durch sukzessives Schneiden der Messdaten über den gesamten Höhenbereich (gleich einem Zerlegen in dünne Scheiben). In der Materialanteilkurve wird aufgetragen, welcher prozentuale Materialanteil auf welcher Schnitthöhe vorliegt. Durch grafische Konstruktion lässt sich die Materialanteilkurve in drei Bereiche zerlegen: den Spitzen- (Xpk), Kern- (Xk) und Riefenbereich (Xvk). Durch Auswertung der absoluten Größen sowie der Relationen zwischen den drei Bereichen lässt

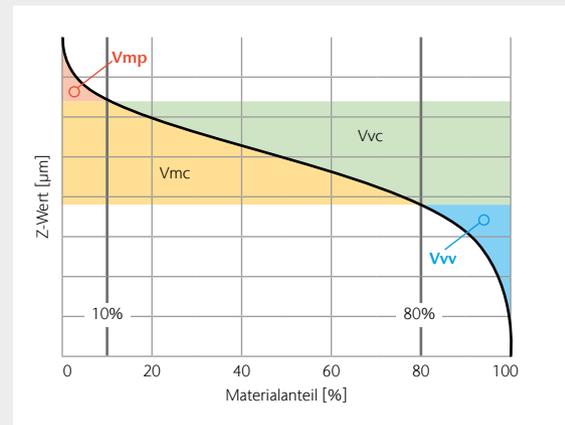
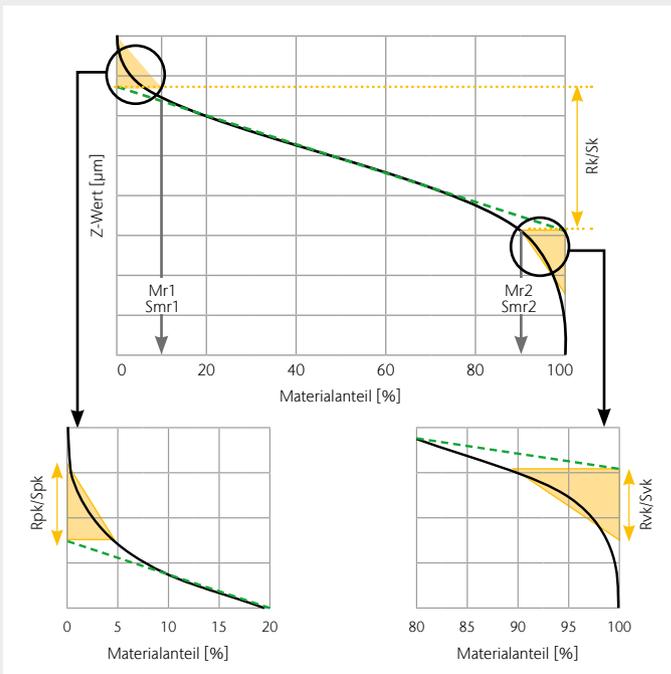
sich das funktionale Verhalten der Oberfläche beschreiben. Der Spitzenbereich unterliegt einem erhöhten Verschleiß, tragfähige Oberflächen bündeln viel Material im Kernbereich, der Riefenbereich stellt ein Reservoir für Kühl- oder Schmierstoffe bereit. Je nach funktionalen Anforderungen an die Oberfläche muss ein Fertigungsverfahren gewählt werden, aus dem eine geeignete Materialverteilung resultiert.

Dieselbe Vorgehensweise lässt sich um eine Dimension auf die Materialvolumenparameter erweitern.



Bearbeitung	Stirnfräsen	Längsdrehen	Flachschleifen
Spk	1,9 µm	2,1 µm	0,8 µm
Sk	3,3 µm	4,5 µm	5,3 µm
Svk	2,2 µm	0,8 µm	1,9 µm

Aus der Materialanteilkurve lassen sich funktionsrelevante Eigenschaften einer Oberfläche ableiten.



Dank der vorliegenden räumlichen Messdaten ergeben sich bei flächenhafter gegenüber profilhafter Messung zusätzliche Auswertungsmöglichkeiten.

Mithilfe des entwickelten Grenzflächenverhältnisses  $S_{dr}$  lässt sich die tatsächliche Größe der Oberfläche bestimmen, die mit der Umgebung in Kontakt steht. Der Kennwert gibt an, um welchen Anteil die Fläche größer ist als ihre Projektion. Für eine vollkommen ebene Fläche ist  $S_{dr}$  0, für sehr zerklüftete Oberflächen kann der Wert auch über 100% betragen.  $S_{dr}$  kann dann hilfreich sein, wenn eine Oberfläche benetzt werden soll oder im Energieaustausch mit der Umgebung steht.

Der quadratische Neigungsmittelwert  $S_{dq}$  berechnet sich als der quadratische Mittelwert der Steigungen an

allen Punkten. Für eine vollkommen ebene Fläche ist  $S_{dq}$  0 und nimmt mit dem Auftreten von steilen Flanken zu. Mithilfe der Parameter  $S_{al}$  (Autokorrelationslänge),  $S_{tr}$  (Seitenverhältnis der Oberflächentextur) und  $S_{td}$  (Texturrichtung) kann eine Oberfläche auf Ähnlichkeit mit sich selbst, ihre Gleichförmigkeit in X- und Y-Richtung und eine bevorzugte Texturrichtung untersucht werden. Darüber hinaus gibt es in der Flächennorm eine weitere neue Parameterfamilie, die Topografieparameter. Dabei werden nach einer Segmentierung der Oberfläche Topografie-Elemente gezählt (Spitzen pro Fläche,  $S_{pd}$ ) oder gemittelt (Fünf-Punkt-Spitzenhöhe,  $S_{5p}$ , und andere).

## Zusammenfassung

Die Rauheitsmessung findet in den unterschiedlichsten Industrien vielfältige Anwendung. Optische Profilometer ersetzen dabei zunehmend taktile Messsysteme. Es ist davon auszugehen, dass die 2D-Parameter mittelfristig nur dort Bestand haben werden, wo ihre Aussagekraft ausreicht. Die flächenhafte Charakterisierung der Oberfläche mithilfe der optischen 3D-Oberflächenmesstech-

nik bietet nicht nur eine bessere visuelle Zugänglichkeit zu den Messdaten, sondern erlaubt auch weiterreichende Auswertungsmöglichkeiten. Messeinrichtungen sollten daher spätestens dann ergänzt oder ersetzt werden, wenn 2D-Kennwerte die Charakteristik oder Funktion der Oberfläche nicht ausreichend genau oder nur unzuverlässig beschreiben können.

### Autoren

M.Sc. Jan Zepp

Applikation

Dr.-Ing. Özgür Tan

Strategisches Produktmarketing

Geschäftsbereich Optische Messsysteme

Polytec GmbH



## Zukunft seit 1967

Hightech für Forschung und Industrie.  
Vorreiter. Innovatoren. Perfektionisten.

Den Ansprechpartner für Ihre  
Region finden Sie unter:  
**[www.polytec.com/contact](http://www.polytec.com/contact)**

**Polytec GmbH**  
Polytec-Platz 1-7 · 76337 Waldbronn  
Tel. +49 7243 604-0 · [info@polytec.de](mailto:info@polytec.de)