

Rauheitskenngrößen für die 3D-Oberflächenmesstechnik im Bereich der Mikro- und Nanotechnik

J. Seewig, Hannover

1 Einleitung

Die Charakterisierung der Oberflächenrauheit durch 2D - Profilschnitte ist Stand der Technik und deren Auswertestrategie durch ein umfassendes Regelwerk festgelegt. In der industriellen Praxis ist dabei folgende Vorgehensweise üblich: Datenaufnahme durch ein taktiles Messsystem (ISO 3274 [6]), Extraktion der Rauheit mittels Profilter (ISO 11562 [9], ISO 13565-Teil 1 [10]), Kennwertberechnung (ISO 4287 [7] /ISO 4288 [8], ISO 13565-Teil 2 [10]). Die Charakterisierung der Oberflächenrauheit durch einen Profilschnitt ist vergleichbar mit der Betrachtung der Oberfläche durch eine Maske mit einem schmalen geraden „Schlitz“. Eine hinreichende Beschreibung der Oberflächenfeinstruktur gelingt dabei nur, wenn der „Schlitz“ alle funktionsrelevanten Feinstrukturen der Oberfläche erfasst. Ein Beispiel hierfür könnte eine gedrehte Oberfläche sein. Die Form der Drehriefen lässt sich dann sinnvoll charakterisieren, wenn der „Schlitz“ senkrecht zu den Drehriefen ausgerichtet wird. Wie verhält es sich jedoch bei Oberflächen, deren Aussehen von deterministischen oder stochastisch verteilten, lokal ausgeformten Strukturelementen geprägt ist (z. B. lasertexturierte Oberflächen) ? Die Oberflächeninformation, die durch den „Schlitz“ gelangt, wird nun nicht mehr ausreichen, um die Strukturelemente in ihrer dreidimensionalen Ausprägung vollständig zu beschreiben. Um einen besseren Eindruck derartiger Oberflächen zu gewinnen, versucht man daher den „Schlitz“ zu weiten; der Übergang zu einer flächenhaften 3D – Oberflächenmesstechnik ist vollzogen.

Obwohl der Einsatz einer dreidimensionalen Oberflächenmesstechnik meist mit einem hohen mess- und auswertetechnischen Aufwand verbunden ist, findet diese Technik zunehmend Eingang in die industrielle Praxis. Während die heute zur Verfügung stehenden optischen Messsysteme zumindest die flächenhafte Datengewinnung erleichtern, steht die eigentliche Charakterisierung der dreidimensional erfassten Oberflächentopographie durch 3D - Kenngrößen noch an ihrem Anfang !

Der Beitrag gibt einen Überblick über die derzeit auf Normungsebene (ISO TC 213, WG16) diskutierten 3D – Rauheitskenngrößen. Es zeigt sich allerdings, dass die Kenngrößen teilweise direkt aus dem 2D – Bereich übertragen werden. Dieses geschieht ohne zu prüfen, ob der Informationsgewinn durch eine aufwendige 3D – Messtechnik die Funktionsaussage dieser Kenngrößen erhöht.

Als Ausblick auf eine „echte“ 3D – Topographieauswertung wird eine funktionsbezogene 3D - Kennzeichnung von Strukturelementen durch Anwendung morphologischer Bildverarbeitung am Beispiel einer modernen AISi Zylinderlauffläche vorgestellt.

2 3D – Datenvorverarbeitung zur Extraktion der Oberflächenrauheit

Wie bei der zweidimensionalen Profilauswertung gliedert sich die Auswertestrategie der 3D – Oberflächenmesstechnik in drei Teile (Bild 1): Datengewinnung, Datenvorverarbeitung und Kennwertberechnung. Die Datengewinnung erfolgt flächenhaft entweder taktill durch Auf-

nahme einer Vielzahl paralleler Profilschnitte oder durch ein schnelleres optisches Messsystem (die Eignung des gewählten optischen Systems für die angestrebte Messaufgabe ist dabei unbedingt zu prüfen). Im Regelfall erfasst das Messsystem nun nicht nur die gewünschte funktionsrelevante Mikro- oder Nanostruktur des Bauteils. Vielmehr werden auch Anteile der Bauteilform sowie Gestaltabweichungen wie Formabweichung und Welligkeit mehr oder weniger stark erfasst. Bevor eine sinnvolle Charakterisierung der Feingestalt durch Kennwerte erfolgen kann, muss diese durch eine geeignete Datenvorverarbeitung aus der gemessenen Oberfläche extrahiert werden. Hierbei ist unbedingt darauf zu achten, dass die geometrischen Details der Feinstruktur erhalten bleiben.



Bild 1: Schritte zur Gewinnung von 3D – Rauheitskennwerten.

Im Bereich der 3D - Oberflächenmesstechnik werden zur Datenvorverarbeitung vorzugsweise diejenigen Verfahren eingesetzt, die nach dem Prinzip des M-Systems arbeiten. Unter einem M-System versteht man ein mittelwertbildendes Verfahren, wie es beispielsweise ein „Best-Fit“ Ausgleichsalgorithmus oder ein lineares Filter darstellt. Eins der weltweit bekanntesten linearen Filter für die geometrische Messtechnik ist das in ISO 11562 genormte Gaußfilter [9]. In der Praxis hat sich nun ein zweistufiges Verfahren durchgesetzt, das mit Hilfe der Bilder 2 bis 4 kurz erläutert werden soll:

Ausgangspunkt bildet die in Bild 2 dargestellte gemessene Oberfläche einer gehonten Zylinderlaufbahn für Verbrennungskraftmaschinen. Die Messdatengewinnung erfolgte relativ zu einer Bezugsfläche. Folge ist, dass nicht nur die zu charakterisierende Honstruktur sondern auch ein Anteil der Zylinderform sowie eine schwach ausgeprägte Welligkeit erfasst wurde. Ist die Nennform des Bauteils bekannt, so wird diese im ersten Schritt mittels „Best-Fit“ eliminiert. In der Praxis hat sich dabei gezeigt, dass es oftmals sogar ausreichend ist, die Nennform durch ein Taylorpolynom niedrigen Gra-

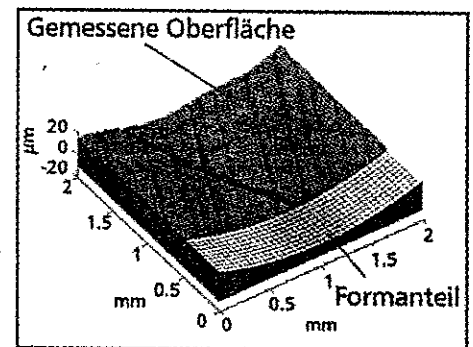


Bild 2: Oberfläche mit Anteil der Bauteilform.

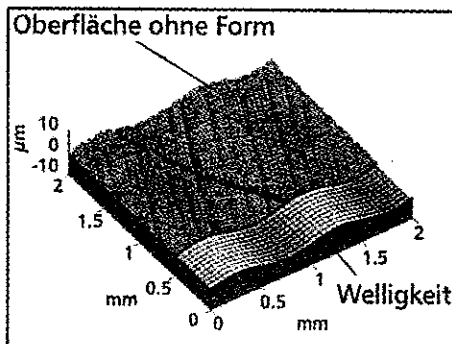


Bild 3: Formbefreite Oberfläche mit Welligkeit.

des zu beschreiben. Dies führt dann auf ein einfaches polynomiales Ausgleichsproblem. Auch bei der Approximation von Freiformflächen haben sich neben Splinesflächen, Polynome niedriger Ordnung bewährt. Bildet man die Differenz zwischen gemessener Oberfläche und eingepasster Nennform, so erhält man eine Oberfläche, die neben der Feinstruktur auch noch Anteile der Formabweichung bzw. Welligkeit besitzt (Bild 3). Im nun folgenden zweiten Schritt werden die Formabweichung und Welligkeit mit Hilfe eines Flächenfilters eliminiert. Vorzugsweise wird hierzu das auf 3D erweiterte Gauß-

filter eingesetzt. Durch geeignete Wahl der Filter-Einstellparameter [1] erhält man jetzt die in Bild 4 dargestellte Oberfläche, die vollständig aus der zu charakterisierenden Oberflächenfeingestalt besteht.

Der Einsatz linearer Flächenfilter zur Approximation langwelliger Gestaltabweichungen kann hierbei insbesondere bei strukturierten Oberflächen kritisch sein. Idealerweise sollte die Filterfläche in dem Bereich der Oberfläche verlaufen, in dem die Amplitudendichte der Feinstruktur maximal ist. Dieser Bereich wird auch Kernrauheit genannt. Schon bei der gezeigten gehonten

Struktur beeinflussen einzelne stark ausgeprägte Riefen die Filterflächenlage erheblich. Die Filterfläche wird in Richtung der Riefen ausgelenkt, da es nicht robust gegenüber Ausreißern ist. Dieses unerwünschte Filterverhalten ist in Bild 5 a) am Beispiel eines Profilschnittes der Zylinderlaufbahn verdeutlicht. Es kommt zu einer Verzeichnung der Rauheitsgeometrie. Völlig anders verhält sich hingegen eine neue Generation von Filtern, die sogenannten robusten Filter [3], [4]. Wie Bild 5 b) zu entnehmen ist, verläuft die Filterfläche exakt auf dem Plateau des Profilschnittes. Die Feinstruktur der Rauheit bleibt erhalten.

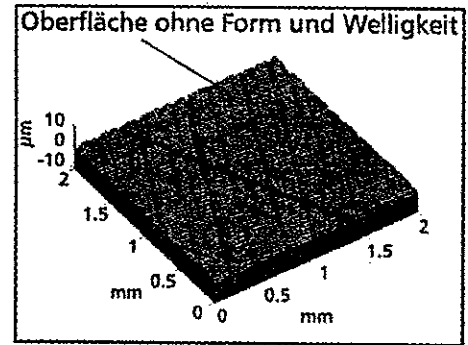


Bild 4: Extrahierte Oberflächenfeinstruktur.

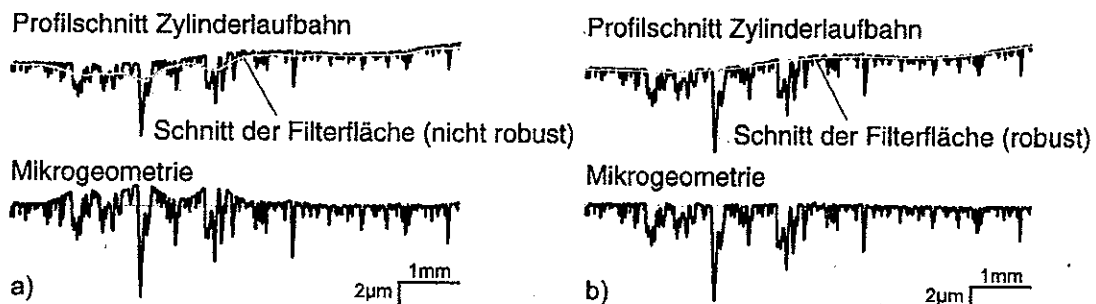


Bild 5: Nicht robuste und robuste Filterung der riefenbehafteten Zylinderlaufbahn.

Ein weiterer Vorteil dieser neuen Filtertechnik ist, dass eine Auswertung bis an den Randbereich der Oberfläche erfolgen kann und somit das ursprüngliche Messfeld vollständig erhalten bleibt. Dies ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn nur kleine Messflächen für die Auswertung zur Verfügung stehen. Für die 2D - Messtechnik stehen die robusten Filter vor Einführung in die internationale Norm. Robuste Flächenfilter werden vom Institut für Mess- und Regelungstechnik der Universität Hannover bereits erfolgreich eingesetzt [5].

Die richtige Wahl des Flächenfilters ist entscheidend für die Auswertung der Rauheit. Generell kann empfohlen werden, bei strukturierten und gleichzeitig plateauartig ausgebildeten Oberflächen vorwiegend robuste Filter einzusetzen. Lineare Flächenfilter sind vorzuziehen, wenn die Amplitudendichte der Oberflächenrauheit annähernd symmetrisch verläuft.

3 Rauheitskenngrößen für die 3D - Oberflächenmesstechnik

Die Charakterisierung von Oberflächentopographien durch 3D - Kenngrößen steht an ihrem Anfang. Hierzu sind folgende Gründe zu nennen: Generell ist der numerische Aufwand einer 3D Topographieauswertung auf Grund der Datenmenge erheblich größer als bei einer 2D - Profilschnittauswertung. Folge ist, dass ein Kompromiss zwischen Messfeldgröße (die nicht vorgeschrieben ist) und lateraler Auflösung einzugehen ist. Bei der Charakterisierung muss man sich daher entweder für eine hochaufgelöste Vermessung nur weniger Strukturen oder

aber für eine Messung vieler jedoch in der Fläche nur gering aufgelöster Strukturen entscheiden. Bei einem vertretbaren Zeitaufwand für die Messung inklusive einer numerischen Auswertung (selbst bei der heute verfügbaren schnellen Rechnertechnologie), führt dies meist zu einer im statistischen Sinne unsicheren Bewertung einer Oberflächentopographie. Desweiteren ist zu beobachten, dass der Wunsch nach Bewertung bestimmter funktionsrelevanter Strukturtypen auf ganz unterschiedliche Auswertestrategien bis hin zu Expertensystemen führt. Damit ist eine Vielzahl verschiedener Algorithmen zu erwarten, die in ihrer Gesamtheit aber kaum Eingang in die Normung bzw. industrielle Messpraxis finden werden. Es bleibt festzustellen, dass ein erheblicher Forschungsaufwand notwendig wird, um ein kompaktes und in Hinblick auf seine Funktionsaussage verlässliches Regelwerk für die 3D – Oberflächenmesstechnik zu schaffen.

Es ist daher nicht verwunderlich, dass auf internationaler Ebene ein 3D – Kenngrößensatz zur Normung vorgeschlagen wird, der zunächst die Übertragung der in der Praxis bewährten 2D – Auswertestrategien gemäß ISO 4287/4288 [7], [8] und ISO 13565, Teil 2 [10] in den 3D – Bereich vorsieht. Dies betrifft insbesondere die Beschreibung vertikaler und volumetrischer Eigenschaften der Topographie. Durch Ergänzung einiger weniger hybrider und räumlich orientierter Kenngrößen ist aber auch ein Schritt in Richtung einer strukturbezogenen Auswertung vollzogen worden. Eine sehr umfassende Beschreibung des nachfolgend aufgeführten 3D – Kenngrößensatzes liefert auch [1].

3.1 Amplituden Kenngrößen

Die in der Praxis wohl am häufigsten verwendeten Kenngrößen im Bereich der 2D – Profilschnittauswertung sind der arithmetische Mittenrauwert R_a , der quadratische Mittenrauwert R_q und die mittlere Rautiefe R_z . Die Umsetzung der Kenngrößen in den Bereich der Topographieauswertung erfolgt durch einfache Erweiterung der linienhaften auf eine flächenhafte Auswertung. So sind der arithmetische Mittenrauwert S_a und der quadratische Mittenrauwert S_q definiert als:

$$S_a = \frac{1}{A} \cdot \iint_A |z(x,y)| \cdot dx \cdot dy, \quad S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \cdot \iint_A z(x,y)^2 \cdot dx \cdot dy}. \quad (1)$$

A gibt die auszuwertende Fläche der Rauheit $z(x,y)$ an. Eine direkte Übertragung der mittleren Rautiefe R_z ist nur eingeschränkt möglich. Philosophie der 2D – Auswertung ist die Mittelung von Einzelkennwerten zu einem statistisch sichereren mittleren Kennwert. Eine Messstrecke wird daher meist in 5 Einzelmessstrecken unterteilt und innerhalb einer jeden Einzelmessstrecke wird jeweils ein Kennwert berechnet. Anschließend erfolgt dann eine Mittelung über alle 5 Einzelmessstrecken. Für integrale Kenngrößen wie S_a und S_q ist der Vorgang der Mittelung nicht relevant. Für die Berechnung der 3D-Rautiefe S_z ergibt sich jedoch das Problem, Einzelmessflächen zu definieren. Da für eine sinnvolle Festlegung von Einzelmessflächen keinerlei Erfahrung vorliegt sieht der Normenentwurf zunächst vor, S_z als Spitzenwert des gesamten Messfeldes zu betrachten. S_z ergibt sich aus der Addition der höchsten Spitze S_p und des tiefsten Tales S_v zu:

$$S_p = \text{Max}_{x,y}(z(x,y)), \quad S_v = \text{Min}_{x,y}(z(x,y)), \quad S_z = S_p + S_v \quad \text{mit } (x,y) \in A. \quad (2)$$

Durch zusätzliche Einführung der Kenngröße S_{5z} wird eine „Robustifizierung“ von S_z erreicht. S_{5z} ist definiert als Addition des Mittelwertes der 5 größten Spitzen und des Mittelwertes der 5 größten Täler innerhalb der Messfläche A .

Dass S_a , S_q und S_z für eine funktionsgerechte Beurteilung der Oberfläche nur eingeschränkt anwendbar sind, zeigt sich am Beispiel einer spitzkämmigen Oberflächentopographie: Durch Invertieren in eine rundkämmige Topographie wird deren funktionsverhalten in Hinblick einer erhöhten Flächenbelastbarkeit zwar erheblich verändert, die Kennwerte S_a , S_q und S_z bleiben jedoch unverändert. Erst durch die Verhältnisbildung S_p/S_z und S_v/S_z könnte man auf die unterschiedliche Orientierung der Oberfläche schließen. Da es sich aber um Spitzenwerte handelt und kleinste Störungen auf der Oberfläche die Verhältnisse deutlich beeinflussen, ist eine sichere Bewertung der Oberflächentopographie praktisch nicht möglich. Für eine sinnvolle Kennzeichnung derartiger Oberflächen sei auf 3.4 verwiesen.

Ebenfalls aus ISO 4287 direkt übertragen wurde die Schiefe und Kurtosis, die die Form der Amplitudendichteverteilung einer Oberfläche beschreiben. Es handelt sich um integrale Kenngrößen, bezogen auf die gesamte Messfläche A :

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \cdot \frac{1}{A} \cdot \iint_A z(x,y)^3 \cdot dx \cdot dy, \quad S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \cdot \frac{1}{A} \cdot \iint_A z(x,y)^4 \cdot dx \cdot dy. \quad (3)$$

Die Schiefe kennzeichnet die Symmetrie der Amplitudendichteverteilung. Ein negativer Wert für S_{sk} weist beispielsweise auf einen Plateaucharakter hin. Ein positiver Wert der Schiefe ergibt sich z. B. bei spitzenbehafteten Oberflächen, wie z.B. moderne AISi Oberflächen (siehe Kapitel 4). Die Kurtosis kennzeichnet die Steilheit der Amplitudendichteverteilung und wird meist in Relation zu normalverteilten Messdaten mit $S_{ku}=3$ gesetzt.

Oberflächen mit abgeflachten Strukturen haben eine Kurtosis < 3 . Bei Oberflächen mit einzelnen Spitzen und Tälern ist die Kurtosis > 3 .

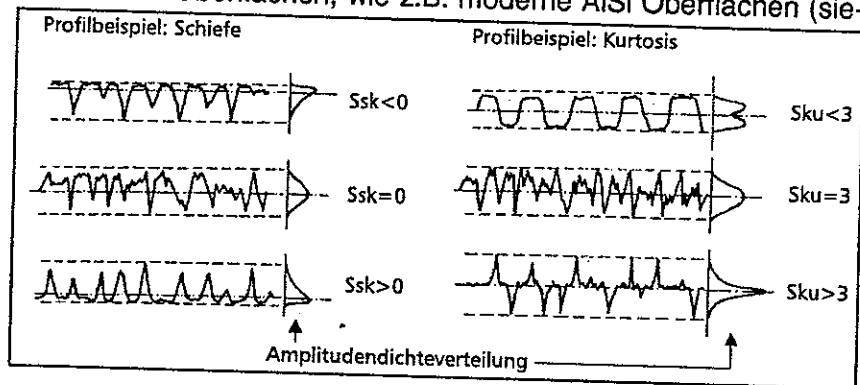


Bild 6: Schiefe und Kurtosis für Profile mit unterschiedlichen Amplitudendichteverteilungen.

Bild 6 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Oberflächencharakter und Form der Amplitudendichteverteilung am Beispiel von Profilschnitten.

3.2 Räumliche Kenngrößen / Autokorrelationsfunktion

Eine sehr einfache Kenngröße für die räumliche Beschreibung einer Oberfläche ist durch das Verhältnis der Anzahl der Spitzen zur Messfläche gegeben (Dichte der Spitzen in $1/\text{mm}^2$):

$$S_{ds} = \frac{\text{Anzahl der Spitzen}}{A} \quad (4)$$

Eine Spitze ist gleich einem lokalen Maximum auf der betrachteten Oberfläche. Um nicht jede Unebenheit der Oberfläche als Spitze zu identifizieren, ist eine Mindesthöhe von 5% des S_z -wertes vorgeschrieben.

Wesentlich anspruchsvoller in Bezug auf Anschauung, Interpretierbarkeit und numerischen Aufwand sind Kenngrößen, die aus der Autokorrelationsfunktion der Oberfläche abgeleitet werden. Der Autokorrelationsfunktion liegt der Gedanke zu Grunde, die Oberfläche nicht direkt durch ihre lokalen geometrischen Eigenschaften zu beschreiben, sondern ganz allge-

mein Strukturmuster identifizieren und quantifizieren zu wollen. Im Wesentlichen begründet sich dieser Ansatz darauf, dass eine geschlossene mathematische Beschreibung der Mikro- oder Nanostruktur einer Oberfläche nahezu unmöglich ist. Die Oberfläche muss vielmehr als Kombination zufälliger und wohl definierter Strukturmuster gesehen werden.

Die Autokorrelationsfunktion, kurz *AKF*, ist definiert als Mittelwert der mit sich selbst multiplizierten gegeneinander verschobenen Rauheitswerte (siehe Bild 7). Für ein Messfeld mit der Fläche $A = l_x \cdot l_y$ gilt formal:

$$AKF(\tau_x, \tau_y) = \frac{1}{Sq^2} \cdot \frac{1}{(l_x - \tau_x) \cdot (l_y - \tau_y)} \int_{x=0}^{l_x - \tau_x} \int_{y=0}^{l_y - \tau_y} z(x, y) \cdot z(x + \tau_x, y + \tau_y) \cdot dx \cdot dy. \quad (5)$$

τ_x und τ_y repräsentieren die Verschiebewege des Messfeldes. Die Normierung durch die mittlere Leistung Sq^2 bewirkt, dass die *AKF* in ihrem Ursprung für $(\tau_x, \tau_y) = (0, 0)$ identisch 1 ist. Darüber hinaus ist die *AKF* symmetrisch bezüglich ihres Ursprungs. Es gilt $AKF(\tau_x, \tau_y) = AKF(-\tau_x, -\tau_y)$.

Wie sich die *AKF* in Abhängigkeit unterschiedlicher Oberflächentypen verhält, soll anhand zweier Beispiele verdeutlicht werden: Zunächst wird eine gestrahlte Oberfläche betrachtet (Bild 8 links). Auf grund des Herstellungsprozesses ist davon auszugehen, dass die resultierende Oberflächenstruktur einen rein zufälligen Charakter aufweist. Ihr Erscheinungsbild ist isotrop, ohne Vorzugsrichtung. Gemäß Gleichung (5) ist der Wert der *AKF* in ihrem Ursprung gleich 1. Werden die Messdaten um nur wenige Abtastwerte gegeneinander verschoben, so liegen die Strukturen immer noch näherungsweise deckungsgleich übereinander. Der Wert der *AKF* in der Umgebung des Ursprungs liegt daher immer noch nahe 1.

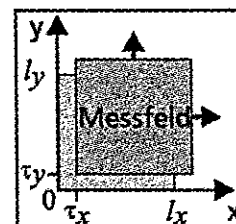


Bild 7: Zur Definition der *AKF*.

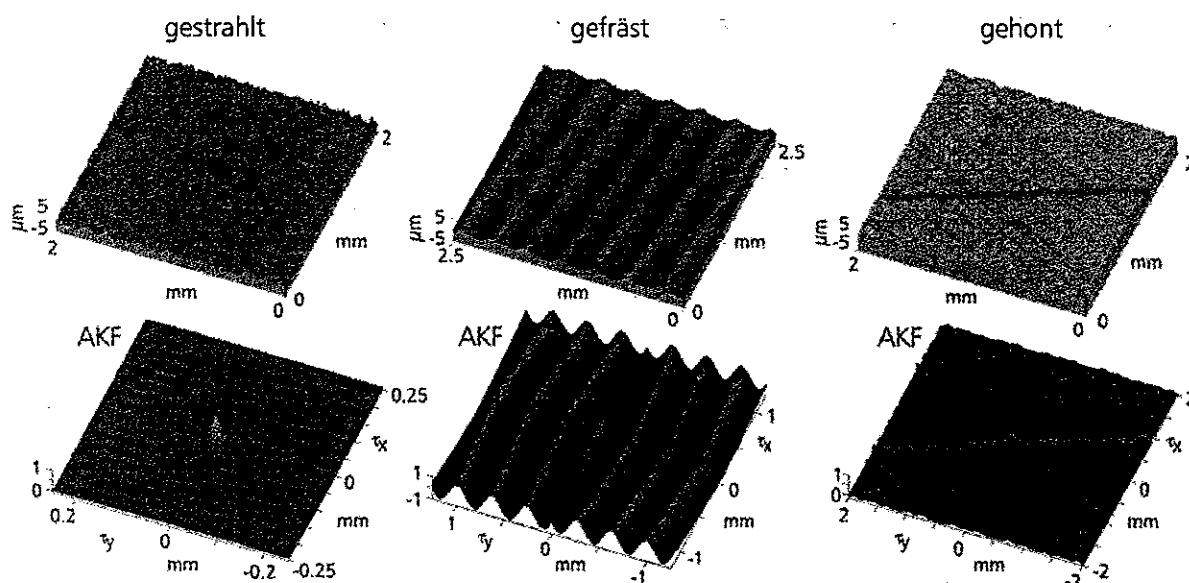


Bild 8: Oberflächentopographien (oben) und ihre zugehörigen Autokorrelationsfunktionen (unten).

Je stärker die Messdaten gegeneinander verschoben werden, desto geringer ist auf grund ihrer Zufälligkeit die Übereinstimmung der sich überdeckenden Strukturen. Die Einzelprodukte aus Gleichung (5) werden daher mal positiv ein andermal negativ sein. Die anschließende Mittelwertbildung sorgt nun dafür, dass sich die Einzelprodukte weitestgehend ausgleichen;

die AKF strebt mit größer werdender Verschiebung gegen Null! Bei isotropen Oberflächen fällt die AKF mit zunehmendem Verschiebeweg (τ_x, τ_y) also monoton gegen den Wert Null ab. Als nächstes Beispiel wird eine gefräste Oberfläche betrachtet (Bild 8 mitte). Eine derartige Oberfläche weist entsprechend der Vorschubgeschwindigkeit eine durch das Werkzeug hervorgerufene periodisch riefige Feinstruktur auf. Ihr Erscheinungsbild ist also anisotrop, mit einer Vorzugsrichtung. Berechnet man die zugehörige AKF ausgehend vom Ursprung in Richtung der Riefen, so ändern sich die Verhältnisse der sich überdeckenden Strukturen nur wenig. Die AKF bleibt in Richtung der Riefen nahezu konstant. Anders verhält es sich hingegen, wenn die Messdaten senkrecht zu den Riefen verschoben werden. Beispielsweise überdecken sich die Strukturen wiederkehrend immer dann, wenn die Messdaten um ein Vielfaches der Riefenbreite verschoben werden. Die AKF verläuft in dieser Richtung gleich der Oberfläche periodisch.

Eine geschliffene Oberfläche verhält sich ganz ähnlich. Obwohl die Schleifriefen nicht streng periodisch sind, bildet sich eine quasi Periodizität in der AKF aus, die genutzt werden kann, um auf eine mittlere Riefenbreite zu schließen [14].

Ergebnis der Betrachtung ist, dass eine isotrope Oberfläche eine bezüglich des Ursprungs symmetrische AKF aufweist, die mit zunehmender Verschiebung schnell auf Null abfällt. Eine anisotrope Oberfläche ist demgegenüber durch eine ihrer Topographie entsprechenden asymmetrischen AKF gekennzeichnet. Dieses Verhalten der AKF wird genutzt, um ein Maß für die Ausprägung einer Vorzugsrichtung anzugeben. Dazu wird ein Kreis mit dem Radius $\sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2}$ um den Ursprung der AKF gelegt und das Verhältnis des kleinsten Kreisradius zum größten Kreisradius gebildet, bei dem die AKF jeweils auf den Wert 0.2 abgefallen ist. Das sogenannte „Textur Aspekt Verhältnis“ ist definiert als:

$$Str = \frac{\text{Min}_{\tau_x, \tau_y \in R} \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2}}{\text{Max}_{\tau_x, \tau_y \in R} \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2}}, \quad \text{mit } R = \{(\tau_x, \tau_y) : AKF(\tau_x, \tau_y) \leq 0.2\}. \quad (6)$$

Im Bereich $0 \leq Str \leq 0.5$ liegt eine anisotrope Oberfläche mit Richtungscharakter und im Bereich $0.5 \leq Str \leq 1$ eine isotrope Oberfläche ohne Richtungscharakter vor. Der Zählerausdruck in Gleichung (6) wird als „Autokorrelationslänge des schnellsten Abfalls“ bezeichnet:

$$Sal = \text{Min}_{\tau_x, \tau_y \in R} \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2}, \quad \text{mit } R = \{(\tau_x, \tau_y) : AKF(\tau_x, \tau_y) \leq 0.2\}. \quad (7)$$

Sal ist ein Maß für die Horizontaleigenschaft einer Struktur. Beispielsweise ist die Korrelationslänge einer periodischen Struktur größer als die einer rein zufälligen Struktur. Eine wesentliche Bedeutung erlangt die AKF auch zur Richtungserkennung von überlagerten Riefenstrukturen (z.B. Bestimmung des Honwinkels). Beide Vorzugsrichtungen zeichnen sich deutlich in der AKF ab (Bild 8 rechts).

Die Fouriertransformierte der AKF führt auf das Leistungsdichtespektrum der Oberfläche. Man gewinnt durch diesen Schritt zwar keine neuen Informationen hinzu, jedoch ist die Kennzeichnung typischer Charakteristika (wie z.B. die Detektion einer Vorzugsrichtung) einfacher als bei einer direkten Auswertung der AKF. Für die gehonte Oberfläche ergibt sich beispielsweise die größte Leistungsdichte in Richtung der Honstruktur selbst. Wird nun das Leistungsdichtespektrum ausgehend vom Ursprung in radialer Richtung integriert und die kumulierte Leistung in Abhängigkeit des Umfangswinkels um den Ursprung aufgetragen

(man spricht dann vom winkelabhängigen Leistungsdichtespektrum), so bilden sich exakt unter den Honwinkeln Leistungsspitzen aus, die problemlos detektiert werden können [12].

3.3 Hybride Kenngrößen

Hybride Kenngrößen erfassen sowohl die räumliche als auch vertikale Ausprägung einer Oberflächentopographie. Hybride Kenngrößen werden zur Charakterisierung des kontaktverhaltens bis hin zum optischen Verhalten einer Oberfläche eingesetzt [1], [2]. Hybride Kenngrößen basieren auf Differentialoperatoren zur Bestimmung der 1. oder 2. Ableitung. Aus der Systemtheorie ist bekannt, dass die Differentiation insbesondere hochfrequenter Störsignale, also auch Anteile des Messgeräterauschens, verstärkt werden und statistisch unsichere Kennwerte die Folge sind. Nicht unerheblich ist auch der Einfluss der lateralen Auflösung bei der Messdatenaufnahme, die als Quotient in die Berechnung eingeht. Um die genannten Einflüsse zumindest zu reduzieren, ist eine Bandbegrenzung des Messsignals unerlässlich! Anderenfalls ergibt die Auswertung durch hybride Kenngrößen keinen Sinn.

Im Normenentwurf vorgeschlagen werden drei Kenngrößen. S_{sc} ist der Mittelwert der Krümmungen aller auf der Oberfläche detektierten Kuppen (n = Anzahl der Kuppen). Zur Identifizierung einer Kuppe ist wieder eine Mindesthöhe von 5% des S_z -Wertes vorgeschrieben. Die Kuppe selbst ist ein lokales Maximum auf der betrachteten Oberfläche:

$$S_{sc} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial^2 z(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z(x,y)}{\partial y^2} \right). \quad (8)$$

Die quadratische mittlere Oberflächensteigung ist definiert als

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{A} \cdot \iint_A \left(\left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2 \right) \cdot dx \cdot dy} \quad (9)$$

und ist Äquivalent zur mittleren quadratischen Profilneigung R_{dq} , wie sie in ISO 4287 zu finden ist [7]. Das relative Flächenverhältnis von wahrer Oberfläche zur projizierten Grundfläche (also der Messfläche) ergibt sich zu

$$S_{dr} = \frac{1}{A} \cdot \iint_A \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2} - 1 \right) \cdot dx \cdot dy. \quad (10)$$

S_{dr} ist ein Maß für die Rauigkeit einer Oberfläche. Im Grenzfall einer ideal glatten Oberfläche strebt S_{dr} gegen Null, da in diesem Fall die Differentiation der Oberfläche in x- und y-Richtung der Messung identisch Null ist.

3.4 3D – Abbottkurve

Alle bisher betrachteten Kenngrößen bewerten die Oberflächentopographie in ihrer gesamten vertikalen und/oder horizontalen Ausdehnung. Im Hinblick einer funktionsgerechten Beschreibung der Topographie ist aber gerade eine differenzierte Auswertung der Kuppen, des mittleren Kernbereiches und der Riefen von außerordentlicher Bedeutung. Dies wird wieder deutlich am Beispiel einer Zylinderlaufbahn für Verbrennungskraftmaschinen: Der Spitzenbereich beeinflusst in Kombination mit dem Kolbenring in erheblichem Maße das Einlaufverhalten der Oberfläche. Der mittlere Kernbereich muss eine hohe mechanische Belastbarkeit gewährleisten. Für die Schmierstoffaufnahme sind demgegenüber die freien Riefenräume entscheidend.

Zur Beschreibung der genannten Funktionsbereiche steht für den Fall der zweidimensiona-

len Profilauswertung seit geraumer Zeit ein Kenngrößensatz zur Verfügung, der in ISO 13565, Teil 2 (ehemals DIN 4776) genormt ist und mit großem Erfolg Anwendung in der industriellen Messpraxis findet. Basis des Kenngrößensatzes bildet die Abbott-Kurve, die den Materialanteil in Abhängigkeit einer das Profil schneidenden Schnittlinie beschreibt. Die Übertragung dieser vielversprechenden Auswertemethode in den 3D - Bereich soll mit Hilfe von Bild 9 veranschaulicht werden: Ausgehend von der höchsten Spitze wird eine gedachte Schnittfläche bis zur tiefsten Riefe durch die Topographie geführt. Zu jeder Schnittflächenlage c wird die Fläche der abgeschnittenen Kuppen bestimmt und auf der Abszisse als prozentualer Anteil der Gesamtmessfläche abgetragen.

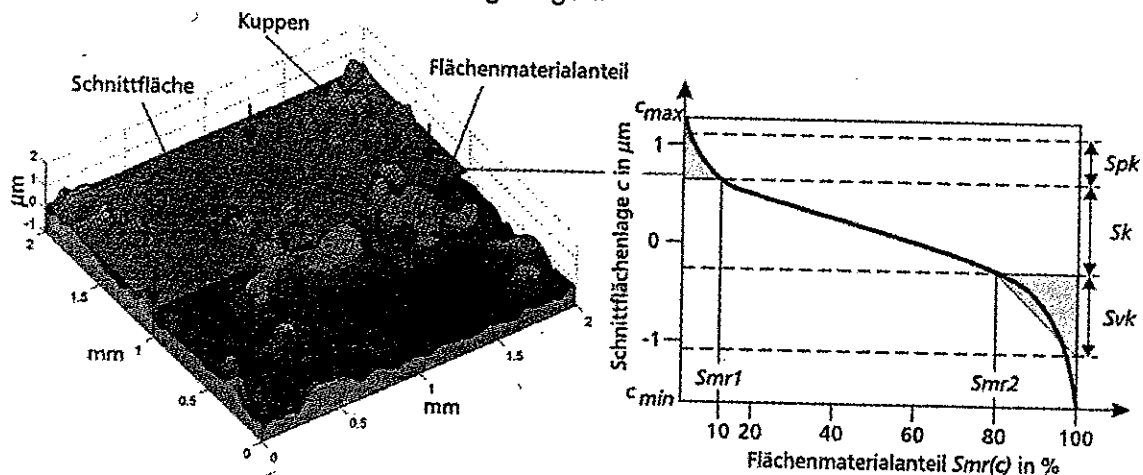


Bild 9: Flächenmaterialanteilkurve einer Oberfläche und daraus abgeleitete Kenngrößen zur Charakterisierung des Spitzen-, Kern- und Riefenbereichs.

Ergebnis ist die Flächenmaterialanteilkurve:

$$S_{mr}(c) = \frac{100\%}{A} \cdot \iint_{x,y \in R} dx \cdot dy, \quad \text{mit } R = \{(x,y) : z(x,y) \geq c\}. \quad (11)$$

Der flach verlaufende Bereich der Flächenmaterialanteilkurve kennzeichnet den größten Materialzuwachs. Er kann als Kernbereich interpretiert werden und ist eingegrenzt durch die Flächenmaterialanteile S_{mr1} und S_{mr2} . Die beiden Flächenmaterialanteile werden nicht wie in ISO 13565 vorgesehen durch ein automatisiertes Verfahren bestimmt, sondern vom Konstrukteur vorgegeben. Als Richtwert gilt $S_{mr1}=10\%$ und $S_{mr2}=80\%$.

S_k heißt Kernrauheit und gibt an, innerhalb welcher Schnittflächenlagenänderung der Flächenmaterialanteil um den Betrag $S_{mr2}-S_{mr1}$ zunimmt. Je kleiner S_k ist, desto mechanisch belastbarer ist die Oberfläche in ihrem Kernbereich. Das Gebiet herausragender Spitzen (oberhalb S_k 's) wird durch die reduzierte Spitzenhöhe S_{pk} gekennzeichnet. S_{pk} ist die Höhe des Dreiecks mit der Grundseite S_{mr1} , welches flächengleich zum äquivalenten Volumen der durch S_{mr1} begrenzten Spitzen ist. Riefen, die unterhalb des Kernbereichs in das Material eindringen, werden durch die reduzierte Riefentiefe S_{vk} berücksichtigt. S_{vk} resultiert aus der Höhe des Dreiecks mit der Grundseite $100\%-S_{mr2}$, welches flächengleich zum materialfreien Volumen unterhalb der Schnittflächenlage für S_{mr2} ist. Die absolute Größe von S_k und die ins Verhältnis gesetzten Spitzen- und Riefenanteile S_{pk} und S_{vk} bestimmen dabei maßgeblich die Funktionseigenschaft der Oberfläche. Durch eine gezielte Vorgabe dieser Größen bzw. Größenverhältnisse ist ein Oberflächendesign im Sinne eines gewünschten Funktionsverhaltens möglich. Eine vertiefende Beschreibung der Kenngrößen liefert [11] und

[15]. Die Integration der Flächenmaterialanteilkurve führt auf eine volumetrische Charakterisierung der Topographie in Abhängigkeit der Schnittflächenlage c . Für das Materialvolumen $Vm(c)$ bzw. das materialfreie Volumen $Vv(c)$ pro Flächeneinheit gilt nämlich:

$$Vm(c) = \frac{1}{100\%} \cdot \int_{c_{\min}}^c Smr(c) \cdot dc, \quad Vv(c) = (c - c_{\min}) - (Vm(c_{\min}) - Vm(c)). \quad (12)$$

Die Einheit der Kenngrößen ergibt sich aus der Einheit der Ordinate und der Einheit des Messfeldes. Für den mit Material erfüllten Raum werden zwei Kenngrößen eingeführt: Vmp für das Spitzenvolumen oberhalb der Schnittflächenlage zu $Smr1$ und Vmc für das Materialkernvolumen im mittleren Kernbereich. Der materialfreie Raum ist ebenfalls durch zwei Kenngrößen beschrieben: Vvc für das materialfreie Kernvolumen im mittleren Bereich und schließlich Vvv für das Riefenvolumen unterhalb der Schnittflächenlage zu $Smr2$.

3.5 Gegenüberstellung der 3D - und 2D Rauheitskenngrößen

Tabelle 1 gibt einen vollständigen Überblick über die vorgestellten 3D Kenngrößen und ihre Anbindung an die normgerechte 2D Profilauswertung.

| | 3D | 3D - Bezeichnung | 2D | 2D-Norm |
|-------------|------|--|-----|-------------|
| Amplitude | Sa | Arithmetischer Mittenrauwert | Ra | ISO 4287 |
| | Sq | Quadratischer Mittenrauwert | Rq | ISO 4287 |
| | Sz | Maximale Höhe der Oberflächentextur | Rz | ISO 4287 |
| | Ssk | Schiefe | Rsk | ISO 4287 |
| | Sku | Kurtosis | Rku | ISO 4287 |
| Räumlich | Sds | Dichte der Oberflächenspitzen | - | - |
| | Str | Textur Aspekt Verhältnis | - | - |
| | Sal | Autokorrelationslänge des schnellsten Abfalls | - | - |
| | Ssc | Arithmetischer Mittelwert der Kuppenkrümmungen | - | - |
| | Sdq | Mittlere quadratische Oberflächensteigung | Rdq | ISO 4287 |
| | Sdr | Relatives Flächenverhältnis von Istoberfläche zur Messfläche | - | - |
| 3D - Abbott | Sk | Kernrautiefe | Rk | ISO 13565-2 |
| | Spk | Reduzierte Spitzenhöhe | Rpk | ISO 13565-2 |
| | Svk | Reduzierte Riefentiefe | Rvk | ISO 13565-2 |
| | Smr1 | Flächenmaterialanteil | Mr1 | ISO 13565-2 |
| | Smr2 | Flächenmaterialanteil | Mr2 | ISO 13565-2 |
| | Vmc | Materialkernvolumen | - | - |
| | Vmp | Spitzenvolumen | A1 | ISO 13565-2 |
| | Vvc | Materialfreies Kernvolumen | - | - |
| | Vvv | Riefenvolumen | A2 | ISO 13565-2 |

Tabelle 1: Zusammenstellung der 3D – Kenngrößen und ihre Anbindung an die 2D - Profilauswertung.

4 Strukturorientierte Auswertung von Oberflächen am Beispiel einer Partikeloberfläche

In 3.4 wurde deutlich, dass die Untergliederung der Topographie einer Funktionsfläche in einen Spitzen-, Kern- und Riefenbereich sinnvoll ist. Erreicht wurde dies durch Bestimmung einer integralen Kennfunktion, dem Flächenmaterialanteil, und durch die aus der Kennfunktion abgeleiteten Kenngrößen. Obwohl die vorgestellte Methode eine weitgehend funktionsgerechte Bewertung der Topographie ermöglicht, ist auf grund ihres integralen Charakters eine differenzierte Beurteilung der Oberfläche hinsichtlich der lokalen Ausprägung der geometrischen Strukturen nicht möglich. Am Beispiel einer modernen Zylinderlauffläche wird aber schon deutlich, dass eine verfeinerte Auswertung der Oberflächenfeinstruktur zur Charakte-

risierung ihres tribologischen Verhaltens zwingend notwendig wird. Derartige Oberflächen bestehen z.B. aus einer AISi Legierung. Ihre Feinstruktur erhält die Oberfläche durch einen chemischen Freilegungsprozess, bei dem die Aluminiummatrix gegenüber den sehr harten Siliziumkristallen leicht zurückgesetzt wird. Die Freilegungstiefe der Siliziumpartikel liegt bei ca. 500-2000nm. Die Partikelköpfe der Si-Kristalle dienen als Reibpartner für die Kolbenringe. Durch das Zurücksetzen der Al-Matrix gegenüber den Si-Partikeln wird der Zwischenraum für das funktionswichtige Schmiermittel gebildet.

Es hat sich gezeigt, dass eine funktionsgerechte Beurteilung dieser Partikeloberfläche praktisch nur durch eine strukturorientierte Analyse möglich ist, die die einzelnen Partikel geometrisch von der umgebenden Grundmatrix trennt. So können die extrahierten Partikel z.B. auf Ausbrüche an den Kopfflächen hin untersucht werden. Ebenfalls möglich ist die Berechnung eines mittleren Abstandes oder einer Vorzugsrichtung der Partikel zueinander. Aber auch der chemische Freilegungsprozess kann durch „Monitoring“ der mittleren Partikelfreilegung kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert werden. Beispielsweise darf die Freilegung der Partikel nicht dazu führen, dass Si-Kristalle unter Belastung aus der Al-Matrix herausbrechen.

Festzustellen ist, dass die bisher vorgestellten Charakterisierungsverfahren den Prüfaufgaben einer modernen Zylinderlaufbahn bei weitem nicht genügen. Im Institut für Mess- und Regelungstechnik der Universität Hannover wurde in Zusammenarbeit mit dem Arbeitskreis 3D – Rauheitsmesstechnik ein auf morphologische Operatoren beruhendes neuartiges Auswerteverfahren entwickelt, das eine gezielte Segmentierung und geometrische Beschreibung der in der Zylinderlaufbahn eingebetteten Partikel ermöglicht. Eine Erweiterung der Strukturanalyse auf Poren und Riefen ist in Vorbereitung. Denkbar ist aber auch eine Adaption der Algorithmen auf andere Strukturen, so dass sich ein breites Anwendungsfeld erschließt.

Das Verfahren lässt sich wie folgt beschreiben: Zunächst werden regionale Maxima bestimmt, die alle möglichen Partikel kennzeichnen. Die Segmentierung erfolgt durch Identifizierung der steilsten Kanten der zuvor detektierten Maxima. Hierzu werden die Gradienten der Topographie mittels Wasserscheidentransformation ausgewertet. Durch einen abschließenden Plausibilitätstest werden alle funktionsrelevanten Partikel extrahiert. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens liefert [13].

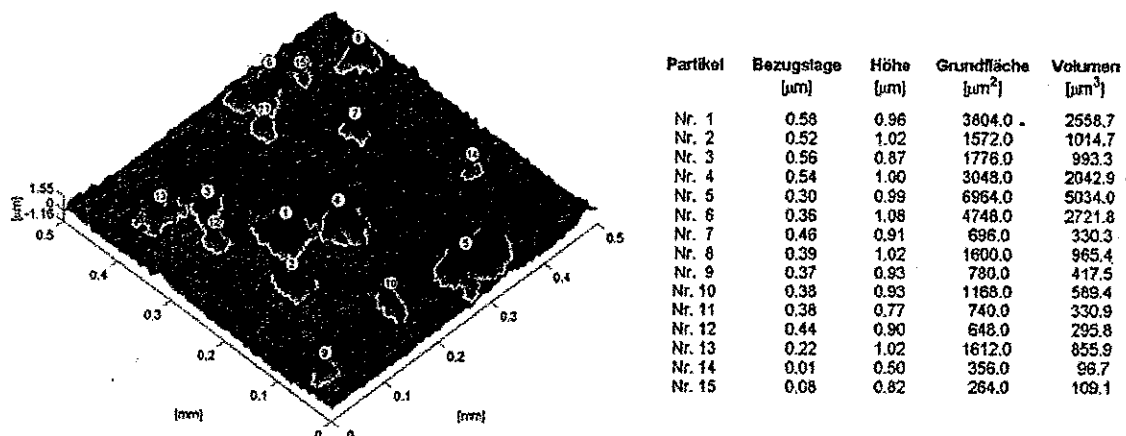


Bild 10: Ergebnis einer Partikeldetektion am Beispiel einer modernen AISi-Zylinderlaufbahnfläche.

Bild 10 zeigt eine typische Auswertung einer AISi Zylinderlauffläche auf Basis der Partikeldektion. Für alle detektierten Partikel wurden einige wichtige geometrischen Daten bestimmt: Die Bezugslage des Partikels, die Partikelhöhe, die Partikelgrundfläche und das Partikelvolumen. Die Abtrennung des Partikels gegenüber der Al-Matrix ist im Bild 10 durch einen weißen Rand verdeutlicht.

5 Schrifttum

- [1] 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.
- [2] Whitehouse, D. J.: Handbook of Surface Metrology. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1994. ISBN 0-7503-0039-6.
- [3] Seewig, J.: Praxisgerechte Signalverarbeitung zur Trennung der Gestaltabweichungen technischer Oberflächen. Berichte aus dem Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Hannover, 2000, Shaker-Verlag. ISBN 3-8265-8229-2.
- [4] Krystek, M.: Trennung der Gestaltabweichungen durch Filter nach der Reihe E DIN ISO/TS 16610. DIN-Tagung "GPS'02 - Geometrische Produktspezifikation in Entwicklung und Konstruktion", ISBN 3-410-15501-5.
- [5] Brinkmann, S.: Accessing roughness in three-dimensions using Gaussian regression filtering. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 41, Nr. 13-14, p. 2153-2161, 2001.
- [6] ISO 3274 (1996): Geometrical Product Specification (GPS) – Surface Texture: Profile method – Nominal characteristics of contact (stylus) instruments.
- [7] ISO 4287 (1997): Geometrical Product Specification (GPS) – Surface Texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters.
- [8] ISO 4288 (1997): Geometrical Product Specification (GPS) – Surface Texture: Profile method – Rules and procedures for the assessment of surface texture.
- [9] ISO 11562 (1996): Geometrical Product Specification (GPS) – Surface Texture: Profile method – Metrological characteristics of phase correct filters.
- [10] ISO 13565 Part 1/ Part 2 (1996): Geometrical Product Specification (GPS) – Surface Texture: Profile method – Surfaces having stratified functional properties.
- [11] Bodschwinn, H.: Oberflächenmesstechnik zur Beurteilung und Optimierung technischer Funktionsflächen. Shaker-Verlag. ISBN 3-8265-7484-2.
- [12] Mainsah, E. et. Al.: Metrology and Properties of Engineering Surfaces. Kluwer Academic Publishers. ISBN 0-412-80640-1.
- [13] Lemke, H.-W.: Silizium Partikel in Aluminium. QZ, Jahrg. 47 (2002) 12, S. 1273-1277. Carl Hanser Verlag, München.
- [14] Kersten, G.: Optische und antastende Prüfung der Gegenlauffläche von Radial Wellendichtringen. VDI - Verlag, 1992. ISBN 3-18-148102-5.
- [15] Lemke, H.-W.: Kenngrößen der Abbott-Kurve zur Beurteilung gemessener Zylinderlaufflächen. Erscheint in MTZ, Motortechnische Zeitschrift, Ausgabe 5 / 2003.