

# Silizium-Partikel in Aluminium

## Analyse von Zylinderlaufbahnoberflächen

Hinrich Wilhelm Lemke,  
Jörg Seewig, Horst Bodschwinn,  
Stefan Brinkmann

Ein zentraler Punkt ist neben der Senkung von Produktionskosten in der Motorenentwicklung die Gewichtsreduktion und eine möglichst kompakte Bauweise von Motorblöcken. Weiter zwingen immer strengere umweltpolitische Aspekte zum ständigen Optimieren der tribologischen Eigenschaften von mechanisch hoch beanspruchten Funktionsflächen, und hier insbesondere die der Zylinderlaufflächen in Paarung mit den Laufpartnern Kolben und Kolbenring.

Vor diesem Hintergrund ist eine verstärkte Substitution des klassischen Graugusses der Zylinderkurbelgehäuse von Ottomotoren durch Aluminiumlegierungen zu beobachten. Diese Entwicklung beinhaltet damit ebenfalls den Einsatz von speziellen Aluminiumlegierungen für den Bereich von Zylinderlaufbahnen. Neben eingegossenen Grauguss-Büchsen finden sich hier im Wesentlichen AlSi-Legierungen (z. B. Alusil, Lokasil oder Silitech). Den AlSi-Legierungen ist gemein, dass durch einen speziell abgestimmten mehrstufigen Honprozess oder auch in Verbindung mit einer so genannten chemischen Freilegung ein reliefartiges Höhenprofil er-

zeugt wird, bei dem die sehr harten Siliziumkristalle leicht erhaben aus der umgebenden weichen Aluminiummatrix hervorstehen (Bild 1). Moderne Zylinderlaufbahnen auf Basis von AlSi-Legierungen enthalten in der Al-Grundmatrix eingebettete Si-Partikel. Diese Partikel erfordern zur Funktionsbeurteilung der Lauffläche eine rein strukturorientierte Beschreibung. Mit Hilfe geometrischer Kenngrößen und eines Verfahrens auf Basis von morphologischen Operatoren aus der Bildverarbeitung lassen sich dreidimensional gemessene Partikelstrukturen analysieren.

Das komplexe tribologische Verhalten dieser so genannten Partikelstrukturen in Verbindung mit den Laufpartnern wird maßgeblich durch die sich ausprägende Mikrostruktur nach dem Frei-

reibung ein [1]. Die hier zusätzlich geforderten Notlaufeigenschaften ergeben sich im Wesentlichen aus der Freilegungshöhe der Partikel zu der umgebenden Matrix und dem Anteil an tragfähigen Si-Körnern in der Topographie. Weiter ist bekannt, dass zur Gewährleistung der nötigen Fresssicherheit die Si-Korngröße und die Härte der Matrix gewisser-

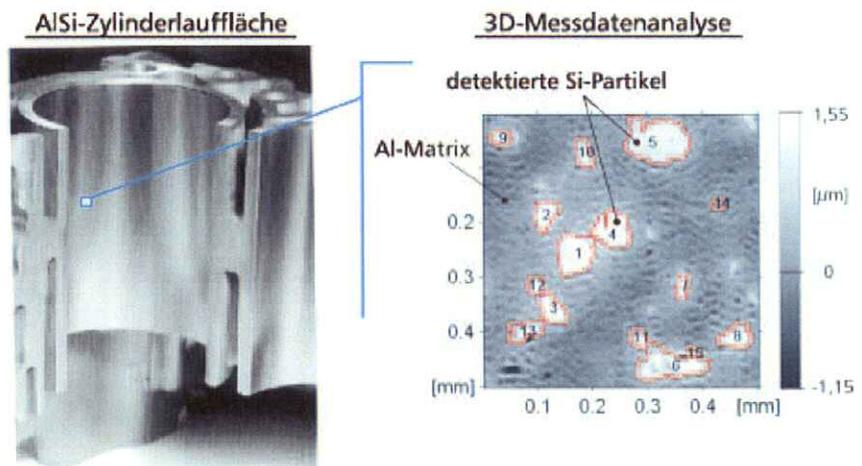


Bild 1. AlSi-Zylinderlauffläche (Lokasil) und Si-Partikel in der Al-Matrix

legungsprozess bestimmt. Die sehr harten Partikelköpfe der Si-Kristalle (HV ~ 1400) dienen in dieser Kombination als direkte Reibpartner für die Kolbenringe. Durch das Zurücksetzen der Al-Matrix gegenüber den Si-Partikeln (0,5 µm bis 2 µm, je nach Lauffächentyp) wird der Zwischenraum für das funktionswichtige Schmiermittel gebildet.

Besonders hohe Anforderungen an die Zylinderlauffläche bezüglich Verschleiß, Gasdichte etc. stellen sich naturgemäß im oberen Kolbenringumkehrpunkt (ZOT) durch das Auftreten von Misch-

maßen in einem umgekehrten Verhältnis zueinander stehen müssen [2]. Die Tatsache, dass es sich hier um einen echten Verbundwerkstoff handelt, impliziert nicht nur die Möglichkeit, in gewissen Grenzen direkt Einfluss auf den Si-Anteil und die Korngröße zu nehmen, sondern auch durch das verfahrensbedingte Freilegen der Partikel die Mikrostruktur geometrisch zu gestalten. Die mittlerweile in der Industrie gesammelten Erfahrungen zeigen den großen Einfluss der Mikrostruktur auf den (Kolbenring-) Verschleiß, HC-Emission und Ölverbrauch

1 Arbeitskreis 3D-Rauheitsmesstechnik:  
Audi AG: H. Lindner, C. Bauer; BMW AG:  
E. Kindlein, M. Stiebler; DaimlerChrysler  
AG: Dr. N. Rau, T. Hercke; Dr.-Ing. h.c. F.  
Porsche AG: B. Burger; Federal Mogul  
GmbH: F. Zwein, U. Lenhof; KS Alumi-  
nium Technologie AG: J. Niehues; Mahle  
GmbH, Dr. S. Spangenberg, Dr. U. Bischof-  
berger; Volkswagen AG: Dr. J. Strobel, H.  
Reißner; Institut für Mess- und Rege-  
lungstechnik, Uni-Hannover: Prof. Dr. H.  
Bodschwinn, H.-W. Lemke

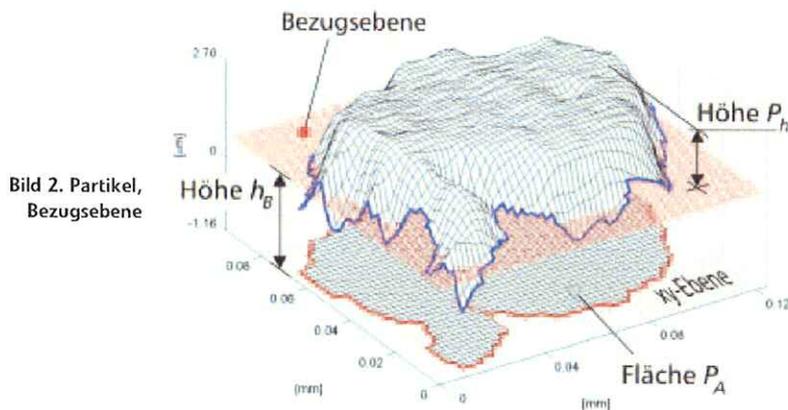


Bild 2. Partikel, Bezugsebene

auf. Die Anschauung des Arbeitskreises 3D-Rauheitsmesstechnik! „Die Oberfläche ist die Summe ihrer Strukturelemente“ verbindet zusätzlich diese Abhängigkeiten mit einzelnen geometrischen Merkmalen von Zylinderlaufbahnen. Ein Arbeitsschwerpunkt im ersten Berichtszeitraum war es, 3D-Messdaten von Partikeloberflächen in ihre funktionswichtigen Strukturelemente zu segmentieren und geometrisch zu beschreiben, um so eine sichere Basis für die derzeitigen Forschungstätigkeiten auf diesem Gebiet zu schaffen [3].

### Kenngrößen zur Partikelbeschreibung

Zur funktionsgerechten Beurteilung einer Partikeloberfläche ist eine strukturorientierte Analyse notwendig, die die einzelnen Hartstoff-Partikel geometrisch von der umgebenden Grundmatrix trennt. Entscheidend für solch eine funk-

tionsbezogene Analyse der Messdaten ist, dass nur Partikel bewertet werden, die einer Mindestgeometrie genügen bzw. als Partikel zu erkennen sind. Diese Überlegungen führen direkt auf die elementaren Kenngrößen zur Beschreibung einer Partikelgeometrie. Funktionswichtig ist eine gewisse Partikelhöhe  $P_h$  und die zugehörige Bezugslage  $h_B$  in der Matrix, das Partikelvolumen  $P_V$  (Bild 2). Zusätzlich wird ein theoretisches Partikelvolumen  $P_{V,th}$  als Produkt der projizierten Partikelgrundfläche  $P_A$  und der Partikelhöhe  $P_h$  eingeführt. Diese Kenngröße ermöglicht im Vergleich mit dem realen Partikelvolumen eine Beurteilung der „idealen“ Ausformung des Partikels.

Zur Berechnung dieser Kenngrößen spaltet das Verfahren der Partikeldetektion aus der Gesamtmenge aller 3D-Messdaten die Menge der Partikel ab. Der Mengenbegriff verdeutlicht in diesem Zusammenhang den morphologischen Charakter der Oberfläche, die sich

als eine Gesamtmenge aller Strukturelemente gewisser geometrischer Eigenschaften auffassen lässt. Strukturelemente sind hier neben den Si-Partikeln die Al-Matrix, Poren und eventuell vorhandene Riefen in der gesamten Mikrostruktur.

Voraussetzung für diese Art der Auswertung ist, dass die Mikrostruktur zunächst verzeichnungsfrei von den langwelligen Anteilen der Makrogeometrie getrennt wird. Dies wird durch den Einsatz einer 3D-Gaußfilterung bei geeigneter Grenzwellenlänge erreicht [4] [5]. Weiterhin bestimmt die Filterbezugsfläche die Höhenlage (0-Niveau) der Al-Matrix. Der Tiefenbereich unterhalb des 0-Niveaus ist demzufolge ausschließlich poren- und riefenförmigen Strukturen vorbehalten. Für die zu verarbeitende Datenmenge der Partikel ergibt sich somit, dass lediglich der Bereich oberhalb des 0-Niveaus betrachtet wird.

Auf Basis dieser Vorüberlegungen definiert sich die Eingangsmenge  $M$  für die morphologischen Operatoren der Partikeldetektion aus der linearen Konvertierung aller 3D-Messdaten (Geometriedaten eines 3D-Oberflächenmessgeräts, taktil oder optisch) in ein Grauwertbild (Bild 1, rechts) mit 256 Klassen (8 Bit Unsigned Integer), wobei 0,05 % der Messdaten im oberen und unteren Datenbereich abzuschneiden sind. Diese Datenbescheidung empfiehlt der Arbeitskreis 3D-Rauheitsmesstechnik für eine Kontrastverstärkung der höhenkodierten Grauwertdarstellung aufgrund der schwachen Datenbesetzung in den Randklassen [3]. Zur unteren Höhengrenzung der Partikelausdehnung sind weiter alle Pixel  $x$  unterhalb des 0-

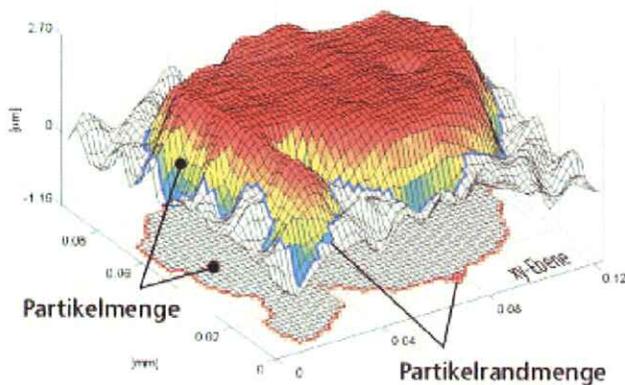


Bild 3. Partikel, Mengenbeschreibung

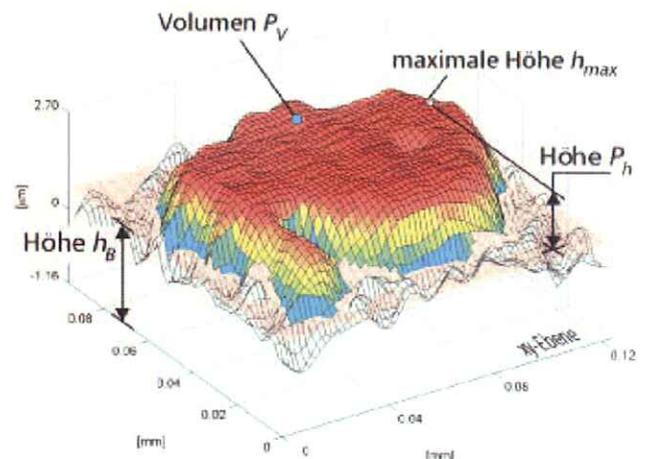


Bild 4. Partikel, Volumen und Höhe

Niveaus (Matrixlage) in dem Grauwertbild  $f$  auf den Wert des Null-Niveaus zu setzen. Aus der so definierten Eingangsmenge  $M$  aller Pixel  $x$  spaltet die Partikeldetektion jeweils die Partikelmenge  $M_P$  und die Menge aller zugehörigen Randpixel  $M_R$  ab. Für die Summe aller detektierten Partikel gilt somit:

$$M_P = \sum_{i=1}^n M_{P,i}$$

$$M_R = \sum_{i=1}^n M_{R,i}$$

In den Bildern ist dagegen stets derselbe exemplarisch ausgewählte Partikel dargestellt. Für diesen Partikel mit dem

Volumen und eine eigenständige Höhe berechnen zu können.

Die Bezugsebene ist demnach eine parallele Ebene im Abstand  $h_B$  zu der durch die Filterung gegebene XY-Ebene (Bild 4). Mit der maximalen Höhe  $h_{max}$  des größten Pixelwertes der Menge  $M_{P,i}$  und dem Skalierungsfaktor  $\Delta z$  (Klassenbreite der Grauwertskalierung) ist die Partikelhöhe definiert  $P_h$  durch:

$$P_h = \Delta z \cdot (h_{max} - h_B)$$

Die Partikelhöhe  $P_h$  entspricht somit der maximalen Höhe des Partikels oberhalb der Bezugsebene. Die Elimination von Ausreißern ist hier durch eine Medianfil-

terung der Fläche  $P_A$  mit der Partikelhöhe  $P_h$  (Bild 5):

$$P_{V,th} = P_h \cdot P_A = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot (h_{max} - h_B)$$

$$\sum_{j=1}^m M_P(x_j)$$

Das in den Grenzen  $[0, h_{max}]$  maximal mögliche Volumen  $P_{V,th}$  ist die funktionsorientierte Idealisierung des Partikels hinsichtlich einer möglichst ebenen Kopfflächenausprägung bei einer fest vorgegebenen Grundfläche.

Als Maß zur Beurteilung dieser maximalen Formausfüllung ist der Formfüllungsgrad  $P_{Form}$ , als Verhältniswert zwischen dem theoretischen und dem gemessenen Partikelvolumen, definiert:

$$P_{Form} = \frac{P_V}{P_{V,th}}$$

Dieses Verhältnis ist neben der Partikelhöhe das wesentliche Geometrie-kriterium zur Beschreibung eines Partikels in Bezug zur plateauartigen Ausprägung des Partikelkopfes.

### Automatisierte Partikeldetektion

Zur Berechnung der vorgestellten Kenngrößen grenzt die automatisierte Partikeldetektion in der Oberfläche einzelne Partikel von der umgebenden Grundmatrix ab. Dazu werden morphologische Operatoren der Bildverarbeitung eingesetzt.

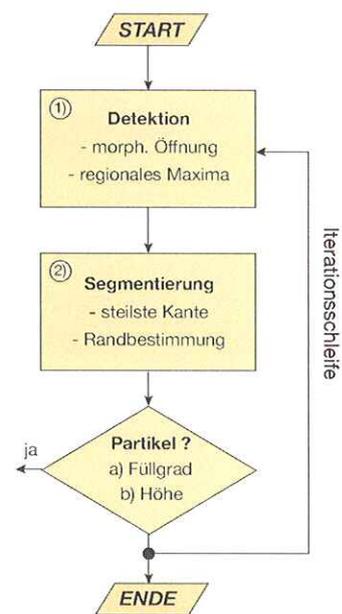


Bild 6. Partikeldetektion, Flussplan

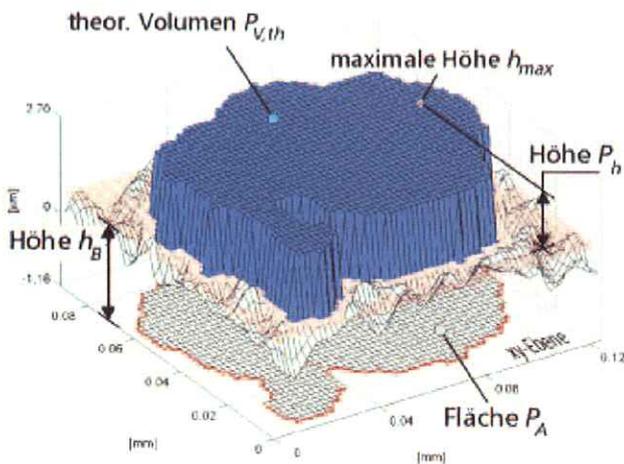


Bild 5. Partikel, theoretisches Volumen

Zähindex 1 ist die zugehörige farblich höhenkodierte Partikelmenge wiedergegeben (Bild 3). Zusätzlich ist die Partikelrandmenge in Blau eingezeichnet. In der XY-Ebene ist außerdem die Projektion der Partikelmenge Grau und die der Partikelrandmenge in Rot eingezeichnet.

Die Menge der Randpixel  $M_R$  dient zur Bezugslagenbestimmung der spezifischen Partikelkenngrößen. Hierzu wird eine zur XY-Ebene parallele Bezugsebene  $B$  auf Basis der dreidimensionalen Partikelrandmenge  $M_{R,i}$  (blau) berechnet (Bild 3).

Für eine robuste Bestimmung der Höhenlage  $h_B$  hat sich die Berechnung des Medians aus den Z-Höhen der Partikelrandmenge  $M_{R,i}$  bewährt (Bild 4). Eine aufwändigere Flächenbestimmung wie zum Beispiel die Einpassung eines 3D-Polynoms in die Partikelrandmenge  $M_{R,i}$  hat keine merklichen Genauigkeitssteigerungen erbracht. Aufgabe der Bezugsebene ist die untere Begrenzung des Partikels, um so ein partikelbezogenes

terung auf Basis einer  $3 \times 3$ -Filtermaske gewährleistet.

Durch die untere Begrenzung des Partikels ist das Partikelvolumen  $P_V$  auf den Bereich oberhalb der Bezugsebene begrenzt. Zur Verdeutlichung ist nur die gültige Partikelvolumenmenge  $M_V$  farblich höhenkodierte dargestellt (Bild 4). Wichtig ist, dass nur die Pixel ab der Bezugsebene in der Volumenberechnung Berücksichtigung finden. Somit bestimmt sich das Partikelvolumen  $P_V$  aus den Höhen aller Pixel  $x$  der Partikelvolumenmenge  $M_V$  mit den Skalierungsfaktoren  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  und  $\Delta z$  zu:

$$P_V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \sum_{j=1}^m M_V(x_j)$$

Eine weitere wichtige Partikelkenngröße ist das theoretische Volumen  $P_{V,th}$ , welches sich aus der Projektion der Partikelmenge (grau) auf die XY-Ebene und der Partikelhöhe  $P_h$  bestimmen lässt. Das theoretische Volumen  $P_{V,th}$  ist das Pro-

Das zugrunde liegende Prinzip beruht dabei auf einer Bestimmung von regionalen Maxima und dem von hier ausgehenden Suchen nach der steilsten Kantenausprägung des Partikels. Das Verfahren besteht dabei im Kern aus insgesamt drei Schritten (Bild 6).

Im ersten Schritt (Detektion) werden regionale Maxima in der Oberfläche gesucht, die einem Partikel entsprechen. Im zweiten Schritt erfolgt die Segmentierung, indem über die steilsten Kanten der zuvor detektierten regionalen Maxima ein Partikelrand in der Topographie bestimmt

teaus als Ort des approximierten Kopfes blau eingezeichnet.

Im zweiten Verfahrensschritt erfolgt die Segmentierung des Partikels nach dem Kriterium seiner steilsten Kantenausprägung. Das Merkmal „steile Kantenausprägung“ ist direkt auf die Bestimmung eines Gradienten zurückführbar. Nach Definition beschreibt der allgemeine Gradient jedoch die Steigung in Abhängigkeit seiner Richtung. Gesucht ist aber nur die maximale Änderung der lokalen Steigung innerhalb der Nachbarschaft des betrachteten Pixels. Dieses

Die Partikeldetektion nutzt das Prinzip der sich ausprägenden Wasserscheiden, um einen geschlossenen Rand für genau einen Partikel zu definieren. Hierzu wird die Topographie der Gradientenmenge jedoch nicht von oben mit Regenwasser beaufschlagt, sondern von unten aus diskreten Quellen (Bild 8, Partikelkeim und Matrixgrund) geflutet. Begrenzt man diesen Flutungsprozess genau an den Stellen, wo sich die unterschiedlichen Quellwasser treffen, durch Staudämme, so prägt sich die in Rot eingezeichnete Wasserscheide in der Topographie der Gradientenmenge aus. Rechnerisch umgesetzt wird diese Beobachtung durch eine hierfür modifizierte doppelte Wasserscheidentransformation (WS-Transformation) [6].

Um genau einen geschlossenen Rand auf der sich so ausprägenden Wasserscheide für einen Partikel definieren zu können, muss für die Flutungssimulation eine Quelle innerhalb der Partikelregion (Partikelkeim) und eine zweite außerhalb im Matrixgrund liegen. Die Lage der Partikelkeime ist durch die Mittelpunkte der regionalen Maxima (Plateaus) aus dem ersten Verfahrensschritt bekannt (vergleiche Bilder 7 und 8). Die Quellregion für den Matrixgrund lässt sich ebenfalls auf Basis einer Flutungssimulation bestimmen. Hierzu wird die negierte Partikelmenge (Bildkomplement) in der ersten Stufe der WS-Transformation aus den Quellen der Partikelkeime geflutet. Die Grenzlinien, wo sich die unterschiedlichen Quellwasser treffen, kennzeichnen den Matrixgrund.

In Bild 9 sind hierzu das Bildkomplement des Grauwertbildes aus Bild 1 und die Partikelkeime gelb abgebildet. Die sich aus der WS-Transformation ergebene

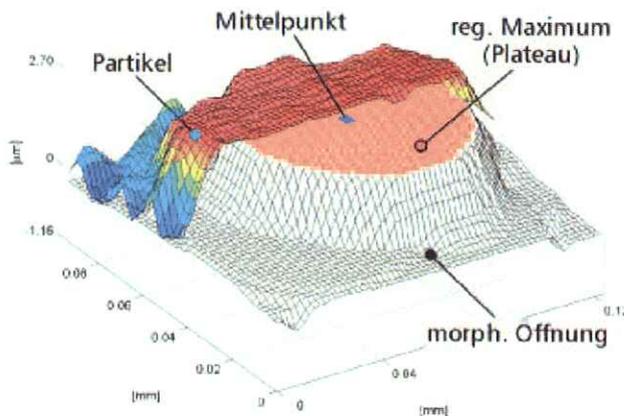


Bild 7. Partikel, morphologische Öffnung

wird. Die Verifizierung, ob es sich um einen Partikel handelt, erfolgt in einer übergeordneten Iterationsschleife. Initialisiert wird das Verfahren durch das Setzen einer Partikelmindesthöhe und einer unteren Grenze für den Formfüllungsgrad.

Ziel des ersten Verfahrensschritts ist die Detektion von regionalen Maxima, die möglichst direkt einem Partikel zugeordnet werden können. Ein regionales Maximum ist genau dort gegeben, wo kein höherer Wert in unmittelbarer Nachbarschaft zu finden ist. Ein Partikel weist jedoch eine Vielzahl von solchen lokalen Extremata (Peaks) auf. Abhilfe schafft hier die Approximation des Partikelkopfes mit einer Ebene. Hierzu wird aus der Bildverarbeitung die Methode der morphologischen Öffnung auf Basis einer Kreisscheibe eingesetzt.

Zur Illustration dieser Approximationsmethode ist die morphologische Öffnung des in der hinteren Hälfte halb angedeuteten Partikels beispielhaft eingezeichnet Bild 7. Deutlich ist die rot eingefärbte Kreisscheibe der morphologischen Öffnung als regionales Maximum erkennbar. In der Mitte ist zusätzlich der Mittelpunkt des sich ausprägenden Pla-

Kriterium wird von dem allgemeinen Beucher-Gradienten auf Basis der zuvor mit einer 3x3-Maske mediangefilterten Partikelmenge erfüllt [7].

Die sich ergebende Gradientenmenge des exemplarisch behandelten Partikels ist grau dargestellt (Bild 7). Deutlich ist der Partikelrand, näherungsweise als Höhenzug (rote Kammlinie, Wasserscheide), zu erkennen. Der Begriff „Wasserscheide“ entstammt der realen Welt und beschreibt die Grenzlinie, wo sich das Regenwasser auf einer Topographie teilt.

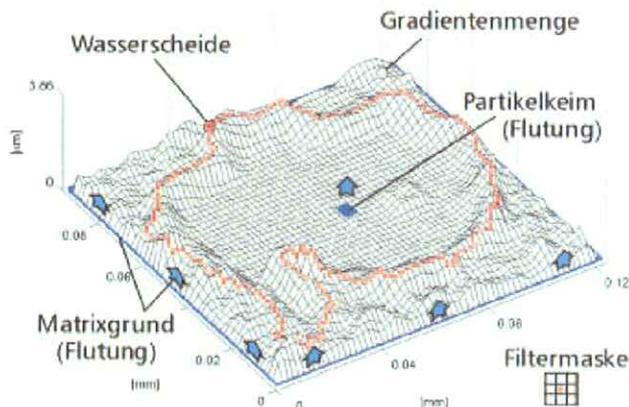
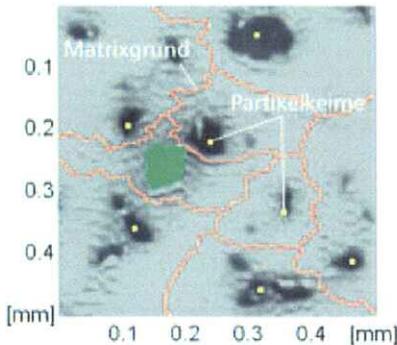


Bild 8. Partikel, Beucher-Gradient und detektierte Wasserscheide



**Bild 9. Wasserscheiden-Transformation, Matrixgrund**

de Quellregion (Matrixgrund) ist als rotes Netzwerk zu erkennen. Zusätzlich kennzeichnet die grüne Region einen ausgeblendetem Bereich für einen in der Iteration vorher bereits segmentierten Partikel.

In der zweiten Stufe der WS-Transformation erfolgt die eigentliche Segmentierung der Partikel. Hierzu wird die Gradientenmenge durch die Quellen der Partikelkeime und des Matrixgrundes geflutet. Das Ergebnis sind die blau eingezeichneten Partikelregionen, zusätzlich ist ein roter Rand um diese Regionen zu erkennen (Bild 10). Da die Wasserscheide auf Basis einer Gradientenmenge bestimmt wird, liegt demzufolge auch der so bestimmte Partikelrand auf der Höhe des größten Gradienten.

Für die Praxis bedeutet dies jedoch, dass der Partikelrand somit auch nicht auf der Matrix zu liegen kommt, sondern etwa in der Mitte der Partikelhöhe.

Zur Höhenkorrektur wird die blaue Partikelregion durch Dilatation um 1 erweitert (roter Rand). Damit wird erreicht, dass der Partikelrand nahezu auf der Matrix zu liegen kommt.

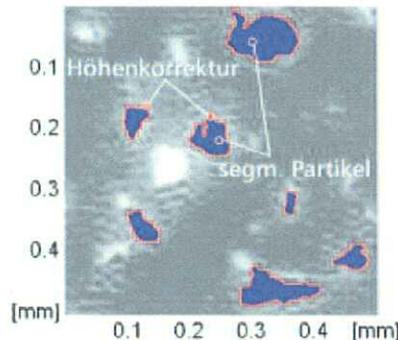
An die Kernoperationen „Detektion“ und „Segmentierung“ des Verfahrens der Partikeldetektion schließt sich die Abfrage an, ob die segmentierten Partikeln den vom Anwender gesetzten Kriterien „Höhe“ und „Formfüllung“ genügen.

Eingebettet sind diese Schritte in eine übergeordnete Iterationsschleife. Aufgabe der Iterationsschleife ist es, die Kopfflächenapproximation der Partikel schrittweise pro Schleifendurchlauf zu reduzieren. Dadurch wird erreicht, dass ausgehend von dem Partikel mit der größten Kopffläche nach und nach Partikel ausgesiebt werden, bis hin zu dem mit der kleinsten Kopffläche. Die Kopfflächenapproximation erfolgt auf Basis der

erläuterten morphologischen Öffnung eines höhenkodierten Grauwertbildes mit einem scheibenförmigen Strukturelement. Iterationsargument ist der Durchmesser des strukturierenden Element, der ausgehend von einem Startwert bis zur kleinstmöglichen Größe reduziert wird. Ergebnis sind die pro Iterationsschleife gespeicherten Partikel und deren Kennwerte.

### Beispielhafte Anwendung

Das Verfahren der Partikeldetektion spaltet die gemessene Oberfläche in Untermengen auf, um so eine eindeutige Abgrenzung einzelner Partikel von der Grundmatrix zu ermöglichen. Dies ist die Voraussetzung, um jeden detektierten Partikel mit den vorgestellten Kenngrößen geometrisch zu klassifizieren. Funk-



**Bild 10. Wasserscheiden-Transformation, Segmentierung**

tionswichtig ist, dass die Partikel einer bekannten Mindestgeometrie genügen müssen.

Für die in diesem Beispiel vorgestellte partikelorientierte Analyse der Messdaten wurde gefordert, dass die zu klassifizierenden Partikel eine Mindesthöhe von  $\geq 0,5 \mu\text{m}$  haben und einem Formfüllgrad von  $\geq 50\%$  genügen müssen. Insgesamt erfüllen dies 15 Partikel, wobei randberührende Partikel in der Analyse keine Berücksichtigung finden. Aus den Einzeldaten der detektierten Partikel ergibt sich eine mittlere Partikelhöhe von  $P_h = 0,91 \mu\text{m}$  und eine zugehörige mittlere Bezugslage von  $h_B = 0,37 \mu\text{m}$  zur Al-Matrix. Insgesamt nehmen die detektierten Partikel ein Volumen von  $P_V = 1223,8 \mu\text{m}^3$  auf einer Grundfläche  $P_A = 1985,1 \mu\text{m}^2$  des gesamten Messfeldes ein.

In den laufenden Forschungsarbeiten wird die strukturorientierte Analyse um

weitere Strukturelemente wie z. B. Poren und Riefen erweitert und in der Praxis erprobt.

### Literatur

- 1 Köhler, E.; Ludescher, F.; Niehues, J.; Peppinghaus, D.: Lokasil, Zylinderlaufflächen, Integrierte lokale Verbundwerkstofflösung für Aluminium-Zylinderkurbelgehäuse, Firmenschrift KS Aluminium-Technologie AG, 1999
- 2 Habig, K. H.: Die Bedeutung von Werkstoffeingenschaften für das tribologische Verhalten von Bauteilen, VDI-Bericht Nr. 852, 1991
- 3 Lemke, H.-W.; Bodschinna, H.; Brinkmann, S.: Dreidimensionales Messen und Auswerten von Zylinderlaufbahnen, Abschlussbericht, 1. Periode, Arbeitskreis 3D-Rauheitsmesstechnik, 1998–2001
- 4 Brinkmann, S.; Bodschinna, H.; Lemke, H.-W.: Development of a robust Gaussian regression filter for three dimensional surface analysis, X. International Colloquium on Surfaces, Chemnitz 31.1–2.2.2000
- 5 Brinkmann, S.; Bodschinna, H.; Lemke, H.-W.: Accessing roughness in three dimensions using Gaussian regression filtering; Metrology and Properties of Engineering Surfaces, University of Huddersfield, 26.–28.4.2000
- 6 Beucher, S.: Watersheds of Functions and Picture Segmentation, IEEE International Conference on Acoustic Speech and Signal Processing, Paris 1982
- 7 Rivest, J. F.; Soille, P.; Beucher, S.: Morphological gradients, Journal of Electronic Imaging 2 (4), 1993

### Die Autoren dieses Beitrags

**Dipl.-Ing. Hinrich Wilhelm Lemke**, geb. 1968, studierte Maschinenbau an der Universität Hannover und ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Fertigungsmess- und Prüftechnik am Institut für Mess- und Regelungstechnik an der Universität Hannover.

**Dr.-Ing. Jörg Seewig**, geb. 1965, absolvierte ein Elektrotechnik-Studium an der Universität Hannover und arbeitet in dem Unternehmen Signalverarbeitung & Softwareentwicklung Messtechnik, Hannover.

**Prof. Dr.-Ing. Horst Bodschinna**, geb. 1943, studierte Maschinenbau an der Universität Hannover und leitet die Arbeitsgruppe Fertigungsmess- und Prüftechnik am Institut für Mess- und Regelungstechnik an der Universität Hannover.

**Dipl.-Ing. Stefan Brinkmann**, geb. 1972, studierte Maschinenbau an der Universität Hannover und ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Fertigungsmess- und Prüftechnik am Institut für Mess- und Regelungstechnik an der Universität Hannover.