

Detektion von Verschleißbereichen mittels orts aufgelöster 3D-Rauheitsanalyse

Detection of Worn Areas by Space-Resolved 3D-Roughness Analysis

Alexander Leis, Markus Kästner, Eduard Reithmeier, Leibniz Universität Hannover

Zusammenfassung In der Tribologie ist es oft notwendig, die Verschleißbereiche auf der Kontaktoberfläche zu finden und quantitativ zu beschreiben. Innovative optische Messmethoden ermöglichen eine flächenhafte Erfassung der Oberflächentopografie mit hoher Auflösung, jedoch können Bereiche mit niedrigem Verschleißgrad häufig nicht zuverlässig gemessen werden. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird eine neue Methode zur orts aufgelösten Analyse der 3D-Oberflächenrauheitsparameter vorgestellt, mit der insbesondere auch die Detektion

von Bereichen mit sehr niedrigem Verschleißgrad ermöglicht wird. ▶▶▶ **Summary** The analysis of tribological behaviour often requires the detection of worn areas on contact surfaces. Innovative optical methods allow to measure the surface topography in-plane with high resolution. Worn areas with low degree of wear, however, cannot be detected directly. This paper presents a new method for space-resolved 3D-roughness analysis that enables the detection of areas with very low degree of wear.

Schlagwörter Optische Rauheitsmesstechnik, Tribologie, Verschleiß ▶▶▶ **Keywords** Optical roughness measurements, tribology, wear

1 Einführung

Die Tribologie umfasst mehrere Themengebiete wie Reibung, Verschleiß und Schmierung. Bei der Untersuchung eines tribologischen Systems ist es oft notwendig, die Verschleißbereiche auf den Funktionsoberflächen bestimmen zu können. Taktile Messmethoden, die dem jetzigen Stand der Technik entsprechen, sind aufgrund langer Messzeiten und der zu geringen Auflösung dafür nicht geeignet. Innovative optische Messmethoden ermöglichen eine flächenhafte Erfassung der Oberflächentopografie mit hoher Auflösung. Allerdings sind die Bereiche mit niedrigem Verschleißgrad auch mit optischen Messtechniken nicht direkt erfassbar. Deswegen sind neue Methoden zur Detektion von Verschleißbereichen auf Oberflächen notwendig.

Radialwellendichtringe beispielweise, im Folgenden mit RWDR abgekürzt, spielen heutzutage eine wichtige Rolle in der Dichtungstechnik (siehe Bild 1). Diese werden zur Dichtung von drucklos gefluteten oder bespritzten Wellendurchtrittsstellen in vielen Anwendungen eingesetzt. Typische Beispiele hierfür sind die Dichtungen der Kurbelwellendurchführung in ölgefüllten Motorgehäusen und der Antriebswellen in Getriebegehäusen. Um einen sicheren Dichtungsgrad mit RWDRs zu erreichen, ist es notwendig, die einzelnen Komponenten des tribologischen Systems, bestehend aus einem Dichtring, abdichtendem Medium und einer Gegenauflfläche, aufeinander abzustimmen. Bei unterschiedlichen Untersuchungen und Forschungsarbeiten mit RWDRs ist es oft unerlässlich, die Verschleißspuren auf der Wel-

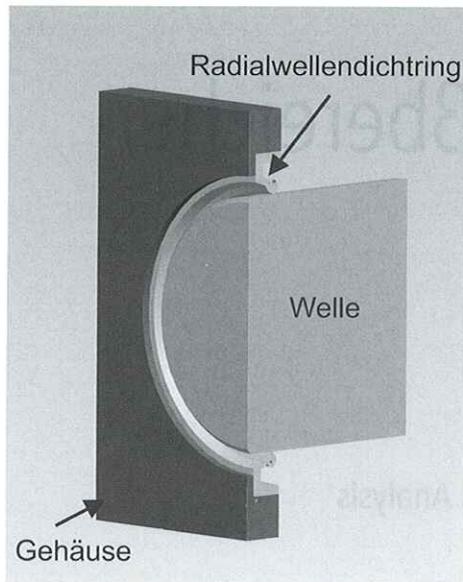


Bild 1 Eingebauter Radialwellendichtring (Querschnitt).

lengegenläufige Fläche zu detektieren. Erst dadurch wird es möglich, das ganze tribologische System zu beurteilen.

Generell betrachtet, wird die Wellenoberfläche durch die RWDR-Dichtkante poliert. Wenn die Reibungskontaktzeit zwischen RWDR-Dichtkante und deren Gegenläufige Fläche relativ lang ist (mehrere 100 Stunden), entstehen auf der Gegenläufige Fläche dementsprechend große Verschleißspuren. Bei sauberem Öl entstehen nach 1000 Stunden Laufzeit 10 µm tiefe und 0,25–0,40 mm breite Verschleißspuren [1]. In der modernen Messtechnik ist die Detektion solcher RWDR-Spuren kein großes Problem. Bei einer niedrigen Laufzeit (weniger als 100 Stunden) des tribologischen Systems stellt die Detektion der RWDR-Spuren mit niedrigem Verschleißgrad

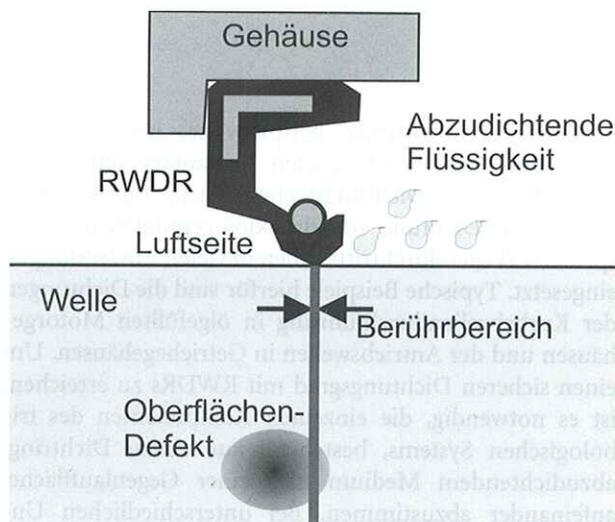


Bild 2 Kontaktfläche zwischen RWDR-Dichtkante und Wellenoberfläche.

sogar für moderne optische Messmethoden eine Herausforderung dar [2].

Im Rahmen des AiF-Projektes „Stochastische Strukturen“ wurden die Auswirkungen stochastischer Defekte auf die Funktion von RWDRs untersucht. Die unterschiedlichen Oberflächendefekte wurden gezielt künstlich auf der Wellenoberfläche nachgebildet und deren Auswirkungen auf die Funktion von RWDRs untersucht. In der Versuchsreihe beträgt die Laufzeit des tribologischen Systems, bestehend aus einem RWDR, einer beschädigten Wellenoberfläche und Öl, in der Regel 48 Stunden. Die messtechnische Erfassung der Verschleißspuren nach dem Lauf ist ein Ziel des Projektes. Die genaue Position, an der die RWDR-Dichtkante den Oberflächendefekt getroffen hat, wurde ermittelt (Bild 2). Daraufhin können die Auswirkungen der nachgebildeten Defekte auf die RWDR-Funktionalität erst richtig ausgewertet und beurteilt werden.

2 Detektion der RWDR-Spuren

2.1 Erfassung der Oberflächentopografie mittels konfokaler Weißlichtmikroskopie

Die Erfassung der Oberflächentopografie wurde mit Hilfe eines konfokalen Weißlichtmikroskops unter Ausnutzung des konfokalen Prinzips durchgeführt [3]. Dabei wird der Messkopf des Mikroskops entlang der optischen Achse (Z-Richtung) verschoben und die Intensität für jede Z-Position erfasst. Entsprechende Algorithmen bestimmen dann den Fokuspunkt. In Kombination mit

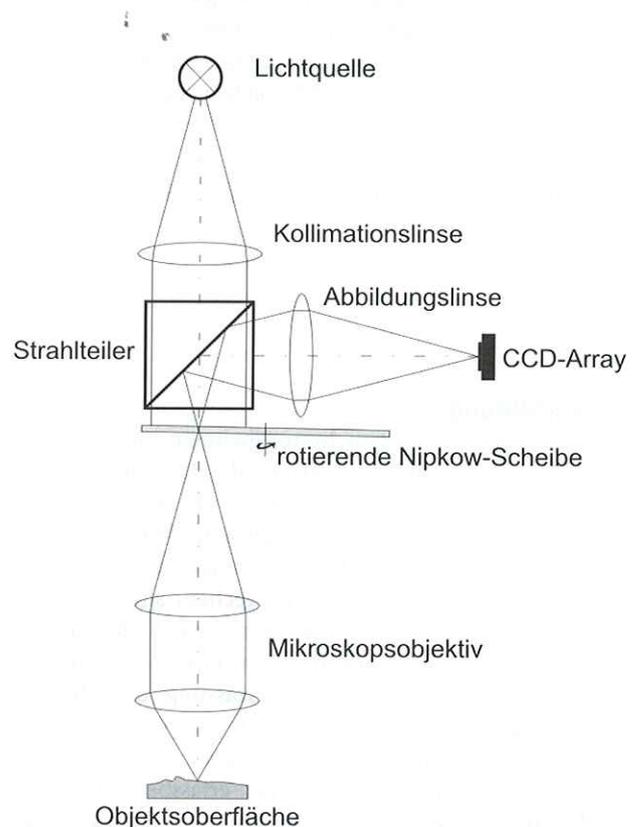


Bild 3 Messprinzip des konfokalen Weißlichtmikroskops.

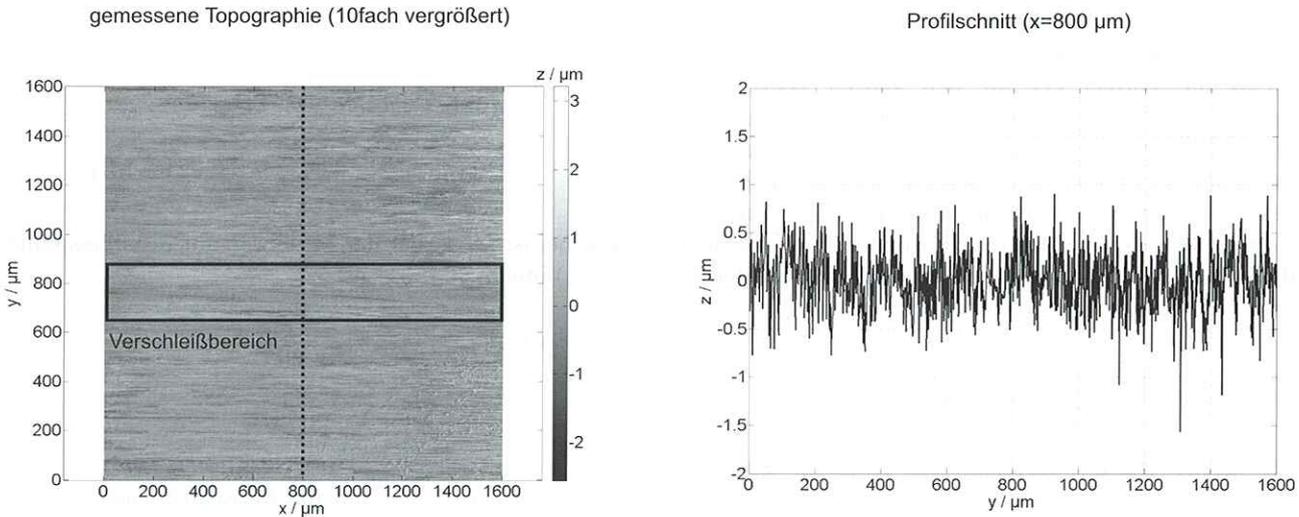


Bild 4 Mit einem konfokalen Weißlichtmikroskop gemessene Topografie einer Wellenoberfläche (links) und deren Profilschnitt, $x = 800 \mu\text{m}$ (rechts), mit der Verschleißspur im Zentrum.

einer Nipkow-Scheibe kann mit dem Mikroskop eine flächenhafte Messung im Bereich von mehreren Millimetern durchgeführt und in einer Messung erfasst werden (Bild 3).

Als Messergebnis wird eine Matrix der Größe $[N \times M]$ mit Höheninformationen $z(x_i, y_j)$ für jeden Punkt (x_i, y_j) des Rasters ermittelt, wobei M die Anzahl der Messpunkte des Rasters in X-Richtung und N die Anzahl der Messpunkte des Rasters in Y-Richtung sind.

Die Oberflächentopografie, die mit dem konfokalen Weißlichtmikroskop gemessen wird, stellt eine Überlagerung der innerhalb des Messbereiches erfassten Anteile von Form, Welligkeit und Rauheit dar. Formabweichungen, Welligkeit und Rauheit werden nach DIN 4760 [4] als Gestaltabweichungen verschiedener Ordnungen bezeichnet und können durch eine entsprechende Filterung voneinander getrennt werden. Formabweichungen bzw. die Form selbst lassen sich auch durch die Anpassung eines idealen Ersatzformelementes bestimmen. Im Fall einer Welle ist die zylindrische Form durch die Anpassung auf ein Polynom zweiten Grades von den Messdaten abtrennbar. Im Bild 4 ist das Ergebnis nach erfolgter Eliminierung der zylindrischen Form dargestellt.

Die Verschleißspur in Bild 4 ist nicht deutlich erkennbar. Im Zentrum des Profilschnittverlaufs gibt es einen Bereich, in dem die Rauheitsspitzen ein wenig kleiner sind als an den anderen Stellen. Daraus gewonnene Erkenntnisse zu RWDR-Verschleißspuren enthalten einen hohen Unsicherheitsgrad. Deswegen ist es notwendig, leistungsfähigere Methoden zur Detektion von Verschleißspuren zu entwickeln.

Die neue Methode basiert auf der Rauheitsmessung der Oberfläche. Im Arbeitsbereich der RWDR-Dichtkante zur Wellengegenauflächung entsteht eine Glättung der Oberfläche; dadurch ändert sich die Rauheit im Spurenbereich.

Diese Eigenschaft kann zur Spurendetektion ausgenutzt werden.

2.2 2D- und 3D-Rauheitsparameter

Typischerweise wird die Rauheit einer technischen Oberfläche mit den folgenden Rauheitsparametern charakterisiert: R_a (arithmetischer Mittenrauwert), R_z (gemittelte Rautiefe) und R_{max} (maximale Rautiefe) [5]. Diese Rauheitskenngrößen sind auf eine Messstrecke bezogen und besonders für die Ermittlung der Rauheit mit mechanisch-elektrischen Tastschnittgeräten geeignet.

Da die klassischen 2D-Rauheitsparameter wesentliche Einschränkungen gegenüber den neuartigen 3D-Rauheitsparametern aufweisen [6], wurden neue internationale Normen für die flächenhafte Oberflächenmesstechnik DIN EN ISO 25178-2 [7] entwickelt. Nach den neuen Normen ist der 3D-arithmetische Mittenrauwert S_a wie folgt definiert ([7], Punkt 4.1.7):

$$S_a = \frac{1}{A} \int_A |z(x, y)| \cdot dx \cdot dy, \tag{1}$$

wobei A der Messbereich ist.

Oder für eine diskrete Anzahl von Messpunkten:

$$S_a \approx \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |z(x_i, y_j) - \langle z \rangle|, \tag{2}$$

hier sind M und N die Anzahl der Messpunkte in X- und Y-Richtung, $z(x_i, y_j)$ ist die Topografiehöhe für den Punkt (x_i, y_j) des Messrasters und $\langle z \rangle$ ist die mittlere Höhe innerhalb des Messbereiches:

$$\langle z \rangle = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N z(x_i, y_j). \tag{3}$$

**2.3 Ortsaufgelöste Analyse
des arithmetischen Mittenrauwertes**

Wenn die Formel (2) für den ganzen gemessenen Bereich (siehe Bild 4) verwendet wird, entsteht ein durchschnittlicher Mittenrauhwert S_a des ganzen gemessenen Bereiches (in diesem Fall [1600 μm , 1600 μm]), jedoch keine Informationen über den Spurenbereich. Um den Verschleißbereich detektieren zu können, wird deshalb die Formel (2) ortsaufgelöst verwendet. Das bedeutet, es wird ein symmetrisches rechteckiges Fenster

$$F_{i,j} := \left\{ (x_k, y_l) \left| \begin{array}{l} i - M_F \leq k \leq i + M_F, \\ j - N_F \leq l \leq j + N_F \end{array} \right. \right\}$$

der Größe $[(2M_F + 1), (2N_F + 1)]$ festgelegt und der arithmetische Mittenrauhwert $S_a(x_i, y_j)$ ortsaufgelöst nur innerhalb dieses Bereiches berechnet. M_F zeigt, wie groß der Abstand zwischen dem Referenz-Pixel (x_i, y_j) und der Fenstergrenze in X-Richtung ist. N_F stellt die Grenze des Fensters in Y-Richtung dar (siehe Bild 5).

Dabei gilt:

$$\begin{aligned} 0 \leq M_F &\leq \frac{(M-1)}{2}, \\ 0 \leq N_F &\leq \frac{(N-1)}{2}. \end{aligned} \tag{4}$$

	(i-M _F)	(i-1)	i	(i+1)	(i+M _F)				
	9,9	10,1	10,2	10,0	10,0	10,0	9,4	10,1	11,0
	10,0	10,1	10,1	10,1	10,1	10,2	9,8	9,8	10,9
(j-N _F)	9,7	9,8	10,0	10,0	10,0	10,2	9,9	9,5	10,4
j	9,8	9,7	9,8	9,9	9,9	10,1	10,0	9,5	10,0
(j+N _F)	9,9	9,7	10,1	10,1	10,1	10,2	10,3	10,4	9,9
	9,9	9,9	9,9	10,1	10,1	10,0	10,2	10,2	10,1
	10,0	10,2	10,1	10,1	10,3	10,4	10,4	10,6	10,4
	10,1	10,3	10,2	10,2	10,4	10,6	10,7	10,7	10,4
	10,1	10,1	9,9	10,0	10,2	10,3	10,3	10,4	10,5
	10,1	10,0	10,0	10,0	10,2	10,3	10,3	10,6	10,6

Bild 5 Festlegung des rechteckigen Fensters mit $M_F = 3, N_F = 1$.

Dann gilt für jeden Messpunkt (x_i, y_j) :

$$S_a(x_i, y_j) = \frac{1}{(2M_F + 1)(2N_F + 1)} \times \sum_{k=-M_F}^{M_F} \sum_{l=-N_F}^{N_F} |z(x_{i-k}, y_{j-l}) - \langle z_F(x_i, y_j) \rangle|. \tag{5}$$

Hierbei ist $\langle z_F(x_i, y_j) \rangle$ der Mittelwert für den Messpunkt (x_i, y_j) innerhalb des Fensters:

$$\langle z_F(x_i, y_j) \rangle = \frac{1}{(2M_F + 1)(2N_F + 1)} \times \sum_{k=-M_F}^{M_F} \sum_{l=-N_F}^{N_F} z(x_{i-k}, y_{j-l}). \tag{6}$$

Formel (5) wird jetzt auf die Messdaten (siehe Bild 4) angewendet. Da Bild 4 die Größe von [1024 Pixel, 1024 Pixel] hat, bleiben die Bedingungen (4) erhalten. Als Beispiel werden die Bedingungen des Fensters $M_F = 356, N_F = 16$ ausgewählt. Im Bild 6 ist das Ergebnis dargestellt.

Im Bild 6 sind die Grenzwerte für die X-Achse von $(1 + M_F)$ bis $(M - M_F)$ und für die Y-Achse von $(1 + N_F)$ bis $(N - N_F)$ definiert. Unter solchen Bedingungen wird eine Verzerrung der Ergebnisse am Bildrand vermieden.

Der Kontaktbereich mit niedrigem arithmetischem Mittenrauhwert S_a ist hier deutlich erkennbar. Nach

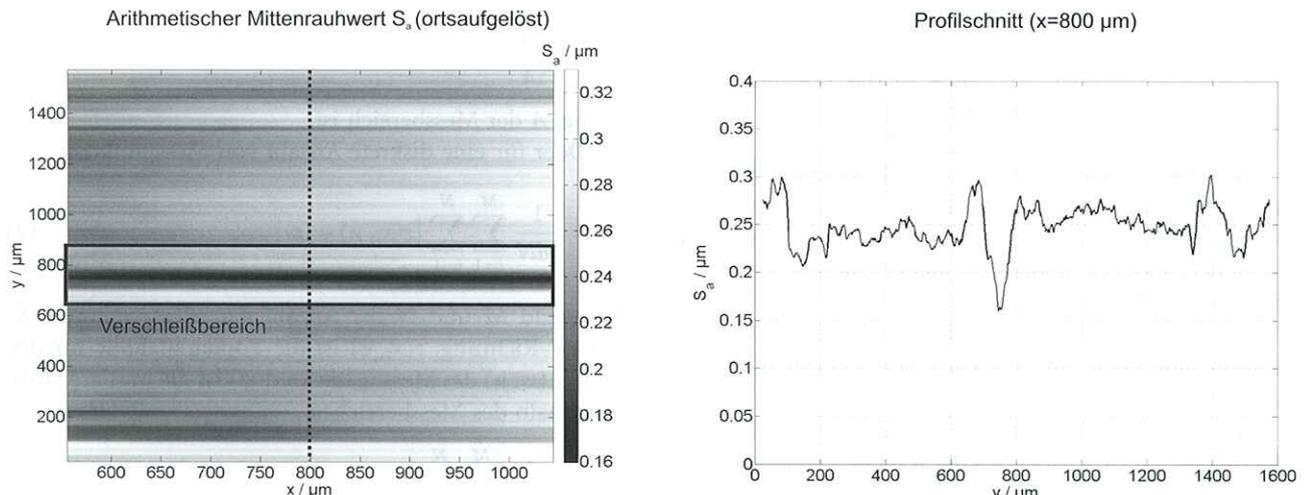


Bild 6 Ortsaufgelöster arithmetischer Mittenrauhwert S_a (Fenstergröße $M_F = 356, N_F = 16$) mit Profilschnitt: $x = 800 \mu\text{m}$.

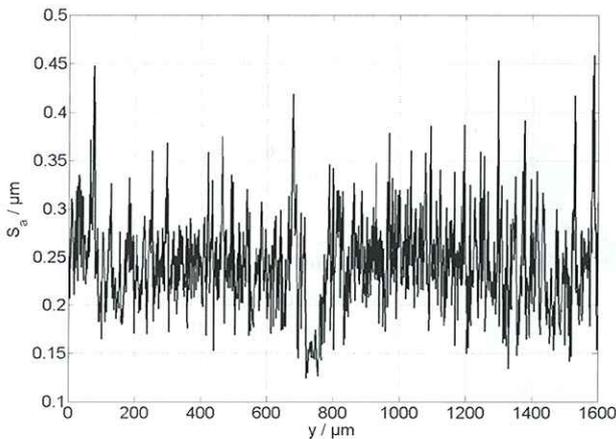


Bild 7 Ortsaufgelöster arithmetischer Mittenrauwert S_a mit den Fenstergrößen $M_F = 511$, $N_F = 0$.

DIN 3760 (Teil 7.2.1) [8] ist die Oberflächenrauheit einer Welle genormt und liegt im Intervall zwischen $0,2$ und $0,8 \mu\text{m}$. Das bedeutet, im zentralen Bereich des Bildes 7 (bei $y = 750 \mu\text{m}$) wurde die Wellenoberfläche zusätzlich durch die RWDR-Dichtkante poliert. Daraus entstand ein neuer arithmetischer Mittenrauwert im Verschleißbereich ($0,16 \mu\text{m}$) für die oben definierte Fenstergröße. Es ist auch möglich, die Breite der RWDR-Spur aus Bild 7 abzuschätzen. Die Breite der Verschleißspur beträgt ungefähr $100 \mu\text{m}$.

Nun ist zu überlegen, welches die optimalen Fenstergrößen für die Detektion der RWDR-Spuren sind. Die Verschleißspuren erstrecken sich parallel zur Radialrichtung, im vorliegenden Fall parallel zur X-Achse. Um bessere statistische Angaben für S_a zu bekommen, sollte M_F hoch gewählt werden. Gemäß Definition (4), wenn $M = 1024$ Pixel groß ist, kann für M_F maximal die Größe von 511 Pixel gewählt werden. Hierbei ist nicht zu vergessen, dass N_F möglichst klein sein muss, um die Auflösung in Y-Richtung verbessern zu können. Der kleinste mögliche Wert ist dabei $N_F = 0$. Das Ergebnis der Berechnung

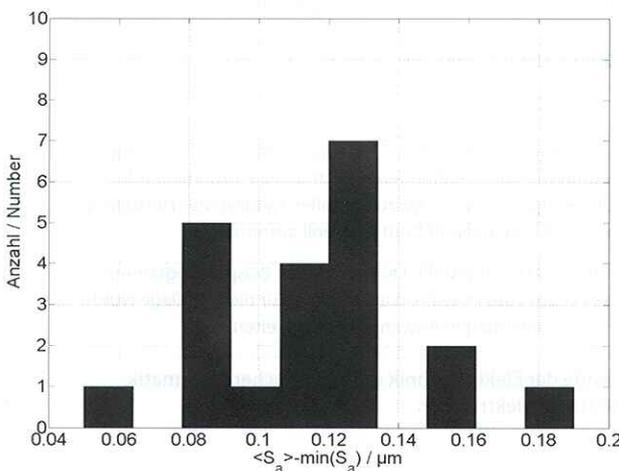


Bild 8 Änderung des arithmetischen Mittenrauwertes S_a der Wellengegenauflähe nach dem Polieren durch eine RWDR-Dichtkante (Laufzeit 48 Stunden).

des ortsaufgelösten arithmetischen Mittenrauwertes S_a mit den Fenstergrößen $M_F = 511$ und $N_F = 0$ wird in Bild 7 dargestellt.

Eine große Anzahl von Verschleißspuren von RWDRs wurde mit dem konfokalen Weißlichtmikroskop gemessen und analysiert. Es war vor allem interessant herauszufinden, um wie viel sich die Rauheit der Wellenoberflächen nach dem Reibkontakt mit einer RWDR-Dichtkante ändert. Hierbei betrug die Kontaktzeit immer 48 Stunden. Die arithmetischen Mittenrauwerte der zu untersuchenden Proben wurden vor und nach dem Lauf gemessen. Ferner blieb die Fenstergröße für die ortsaufgelöste Rauheitsanalyse für alle Auswertungen konstant. Die arithmetischen Mittenrauwerte der ungelauten Wellenoberflächen lagen für eine definierte Fenstergröße mit $M_F = 356$, $N_F = 16$ im Intervall zwischen $0,2$ und $0,4 \mu\text{m}$. Nach dem Lauf zeigen die arithmetischen Mittenrauwerte in den Verschleißbereichen eine Veränderung. In den meisten Fällen lag die Änderung in einem Bereich von $0,10$ bis zu $0,15 \mu\text{m}$ (siehe Histogramm, Bild 8).

3 Zusammenfassung

In der Praxis entsteht oft der Wunsch, die Verschleißspuren in einem tribologischen System schon nach einem kurzfristigen Reibungskontakt zu detektieren. Dies trifft vor allem in der Dichtungstechnik zu, z. B. wenn die Auswirkung unterschiedlicher Oberflächendefekte auf die Funktion von Radial-Wellendichtringen untersucht wird. Die Kontaktsuren der RWDRs sind auf der Wellengegenauflähe zu finden. Taktile Methoden sind aufgrund langer Messzeiten und der zu geringen Auflösung dafür nicht geeignet. Eine direkte Höhenmessung mit modernen optischen Messmethoden führt ebenfalls zur keiner sicheren Detektion von Verschleißspuren auf der Wellenoberfläche. Da die RWDR-Dichtkante während der Rotationsbewegung Reibarbeit verricht, wird gleichzeitig die Wellengegenauflähe poliert und die Rauheitsparameter der Oberfläche im Kontaktbereich ändern sich. Um die Spurenbereiche detektieren zu können, werden die Rauheitsparameter ortsaufgelöst analysiert. Das bedeutet, dass die statistischen Rauheitsparameter nicht für die ganze gemessene Oberfläche berechnet werden. Vielmehr wird für jeden Punkt der Oberfläche, bzw. nur innerhalb des vordefinierten Fensters, der Rauheitsparameter bestimmt. So werden die Verschleißspuren an der lokalen Änderung der Rauheit erkennbar. So wurde z. B. bei der Untersuchung der RWDR-Spuren festgestellt, dass schon nach 48 Stunden Laufzeit der arithmetische Mittenrauwert S_a im Kontaktbereich der Wellenoberfläche deutlich sinkt.

Danksagung

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens Nr. 15168 N/1 der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von

Guericke“ e. V. (AiF) durchgeführt, der wir für die Unterstützung danken.

Literatur

- [1] H. K. Müller, B. S. Nau: Wellendichtringe ohne Überblick. <http://www.fachwissen-dichtungstechnik.de/Kapitelseiten/Kapitel08.html>.
- [2] M. Rahlves, J. Seewig, G. Beichert, G. Berger, R. Gillhaus, M. Kästner, F. Körfer, D. Köllmann, D. Lyda, D. Püschmann: Optisches Messen technischer Oberflächen. Messprinzipien und Begriffe. Beuth Verlag, Berlin 2009.
- [3] H.-J. Jordan: Optische Mikropometrie und Rauheitsmessung an technischen Oberflächen. Dissertation, Universität Stuttgart 1996.
- [4] DIN 4760: Gestaltabweichungen – Begriffe, Ordnungssystem. Juni 1982.
- [5] DIN 4768: Ermittlung der Rauheitskenngrößen R_a , R_z , R_{max} mit elektrischen Tastschnittgeräten – Begriffe, Messbedingungen. Mai 1990.
- [6] F. Blateyron: 3D-Oberflächen-Messtechnik. In: QE – Quality Engineering (2007) Nr. 1–2, S. 40–41.
- [7] DIN EN ISO 25178-2: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen (ISO/DIS 25178-2:2008); Deutsche Fassung prEN ISO 25178-2: 2008.
- [8] DIN 3760: Radial-Wellendichtringe. September 1996.

Manuskripteingang: 12. Januar 2010, zur Veröffentlichung angenommen: 20. September 2010



Dipl.-Phys. Alexander Leis ist seit 2007 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mess- und Regelungstechnik der Leibniz Universität Hannover. Zu seinen Forschungsgebieten gehört u. a. die Untersuchung stochastischer Strukturen auf den Gegenauflflächen von Radialwellendichtringen und deren Messung und Charakterisierung.

Adresse: s. u.,
E-Mail: alexander.leis@imr.uni-hannover.de



Dr.-Ing. Markus Kästner ist Leiter der Arbeitsgruppe Fertigungsmess- und Prüftechnik des Instituts für Mess- und Regelungstechnik der Leibniz Universität Hannover.

Adresse: s. u.,
E-Mail: markus.kaestner@imr.uni-hannover.de



Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier ist Leiter des Instituts für Mess- und Regelungstechnik der Leibniz Universität Hannover.

Adresse: Leibniz Universität Hannover, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Nienburger Straße 17, 30167 Hannover,
E-Mail: eduard.reithmeier@imr.uni-hannover.de



Praxisnaher Leitfaden durch die komplexe Welt der PIC-Microcontroller



Günter Schmitt
PIC-Microcontroller

Programmierung in Assembler und C – Schaltungen und Anwendungsbeispiele für die Familien PIC 18, PIC 16, PIC 12, PIC 10

2., wesentlich erweiterte Auflage 2010 | 492 S. | Broschur | € 34,80
ISBN 978-3-486-59706-6

PIC-Microcontroller sind in Praxis und Lehre weit verbreitet. Dieses Buch bietet eine einmalige Zusammenstellung der nötigen Programme und Schaltungen. Es enthält eine grundlegende Einführung in die Funktionsweise der erfolgreichen PIC-Microcontroller-Familien des Herstellers Microchip – so können Anwender die Funktionen dieser Controller voll ausreizen.

Die Programmierung wird in Assembler und C vorgestellt. Die zahlreichen Beispielprogramme werden auch auf den Webseiten des Verlags zum Download angeboten. Für die 2. Auflage wurde das Buch um ein neues Kapitel mit vielen praxisnahen Anwendungen erweitert.

Das Buch richtet sich an Studierende der Elektrotechnik und Technischen Informatik, Entwickler in der Industrie sowie Hobbyelektroniker.

Bestellen Sie in Ihrer Fachbuchhandlung oder direkt bei uns:
Tel: 089/45051-248, Fax: 089/45051-333, verkauf@oldenbourg.de
www.oldenbourg-wissenschaftsverlag.de