



VERSCHLEISSERMITTLUNG AN ZYLINDERLAUFBAHNEN MIT OPTISCHER 3D-MESSTECHNIK

Die Optimierung mikro- und nanostrukturierter Funktionsoberflächen hinsichtlich Verschleißfestigkeit und Reibungsminderung spielt eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung energieeffizienter Motoren. Einer der relevanten Aspekte für die Beurteilung der Tribologie im Antriebsstrang ist die präzise Verschleißmessung an Zylinderlaufbahnen. Die Volkswagen AG setzt für die Analyse des Verschleißverhaltens von Zylindern ein optisch-konfokales Messsystem der NanoFocus AG ein.

AUTOREN



DIPL.-ING. STEFAN RUBACH
arbeitet im Bereich Technische Entwicklung, Messtechnik, bei der Volkswagen AG in Wolfsburg.



B. ENG. TOM RIEMER
ist Beschaffungssachbearbeiter, Konzernbeschaffung, Interieur, bei der Volkswagen AG in Wolfsburg.



DIPL.-PHYS. JÜRGEN VALENTIN
ist Vorstand Technologie bei der NanoFocus AG in Oberhausen.



CLAUDIA DELTO M.A.
arbeitet im Bereich Unternehmenskommunikation bei der NanoFocus AG in Oberhausen.

OPTIMIERUNG VON MOTORISCHEN REIBUNGSZUSTÄNDEN

Steigende Anforderungen an einen modernen Motor, wie geringerer CO₂-Ausstoß und damit verminderter Kraftstoff- sowie Ölverbrauch bei gleichzeitig höherer motorischer Leistung, resultieren in der Forderung, Reibungsverluste zu reduzieren. Bei einem Verbrennungsmotor entstehen etwa 40 % der Verluste zwischen den Reibungspartnern Kolben, Kolbenringe und Zylinderlaufbahn. Ein Merkmal für die Beurteilung des Tribosystems ist der Verschleiß der Zylinderlaufbahn.

Bei Volkswagen werden in der Abteilung Messtechnik 3D-Rauheitsmessdaten genutzt, um den Verschleiß visuell zu beurteilen, in Berechnungssimulationen zu verwenden oder mit Volumenkenngrößen aus der DIN EN ISO 25178 zu beschreiben. Es zeigt sich, dass mithilfe optimierter mikrostrukturierter Oberflächen die Reibung und somit der Energieverbrauch deutlich reduziert werden können.

VERSCHLEISSVERHALTEN VON ZYLINDERLAUFBAHNEN

Bei der Entwicklung von Diesel- und Ottomotoren führt Volkswagen zur Beurteilung des Verschleißverhaltens geometrische Messungen an den Motorkomponenten durch. Um den Verschleiß von Zylinderlaufbahnen beurteilen zu können, werden Messungen an verschiedenen, genau definierten und begrenzten Stellen innerhalb der Zylinderbohrung von Dauerlaufmotoren durchgeführt, jeweils vor und nach dem Versuch. Anhand der Gegenüberstellung der Messdaten erfolgt daraufhin die Auswertung des Einlaufverhaltens. Dabei werden Änderungen von Laufspielen, Form- und Lageabweichungen, Mikro- und Makrogeometrien sowie Rauheiten und Topografien der Zylinderlaufbahnoberfläche analysiert. Vermessen werden Graugusszylinder und Aluminiumgehäuse ebenso wie plasmabeschichtete Zylinder.

EINSATZ OPTISCH-KONFOKALER 3D-MESSTECHNIK

Im Versuchsaufbau ist eine Verschleißbeurteilung der Zylinderlaufbahnfläche nur möglich, wenn der Ist-Zustand einer Messposition vor dem Versuch mit dem nach dem Versuch, das heißt mit gelaufe-

ner Zylinderlaufbahn, verglichen werden kann. Daraus ergibt sich eine entscheidende Bedingung für das eingesetzte Messsystem: Es muss eine zerstörungsfreie Messung der Zylinderlaufbahnen ermöglichen. Aber auch die Flexibilität, unterschiedlichste Aggregatentypen (Drei- bis Zwölfzylindermotoren) vermessen zu können, ist eine wichtige Voraussetzung. Darüber hinaus bestehen für eine aussagekräftige Auswertung weitere Anforderungen wie die Darstellung von 3D-Topografien mit Höhen- und Tiefeninformationen, eine visuelle Darstellung vergleichbar mit der Rasterelektronenmikroskopie sowie die Ermittlung von Kennwerten für das Ölrückhaltevolumen.

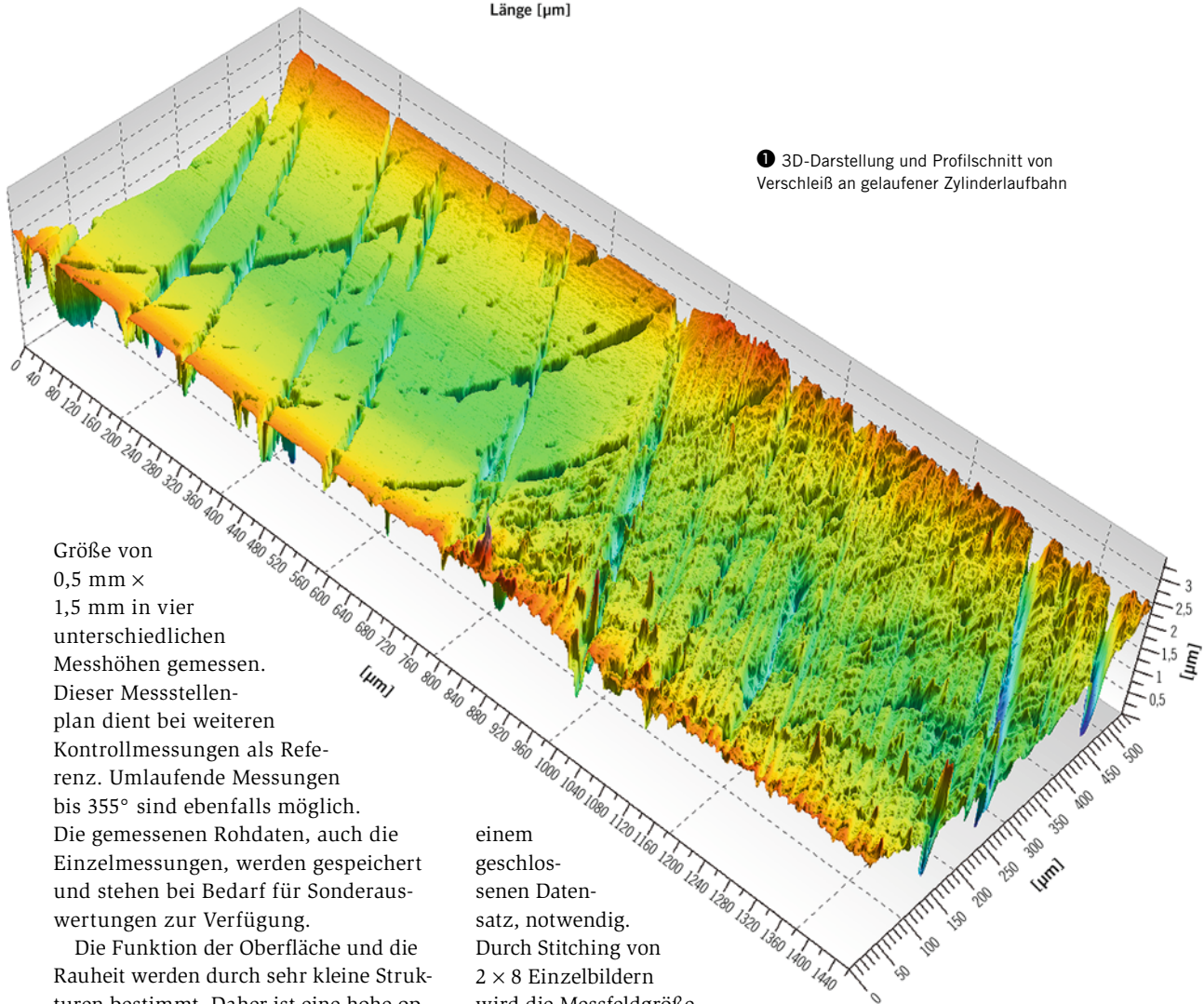
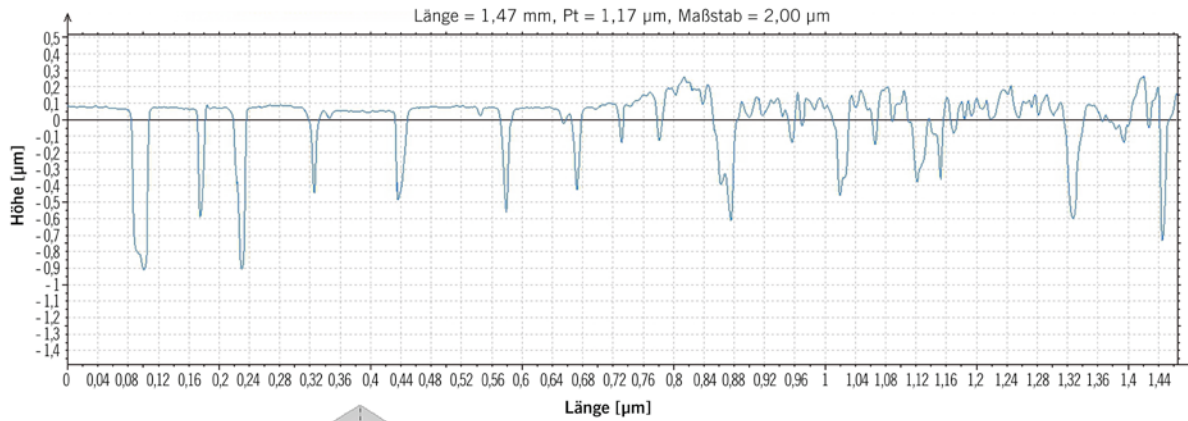
Zum Einsatz kommt bei Volkswagen ein optisch-konfokales 3D-Oberflächenmesssystem der NanoFocus AG mit der Bezeichnung µsurf cylinder, ein spezialisiertes Mess- und Prüfmittel zur Zylinderlaufbahnanalyse. Das System besitzt eine an die Geometrie des Zylinders angepasste vollmotorisierte Tauchführung mit gewinkelter Optik, mit der jede beliebige Messposition innerhalb der Zylinderbohrung radial und axial erreicht wird. Ausgestattet ist das Messsystem im Versuchsaufbau bei Volkswagen mit einem 250-µm-Piezopositionierer und erreicht Auflösungen von <10 nm in Z-Richtung und 0,95 µm beziehungsweise 0,38 µm in X- und Y-Richtung.

Um ein hohes Maß an Flexibilität zu gewährleisten, wird auf eine Automatisierung bei der versuchsbegleitenden Messung verzichtet. Das System kann manuell mit wenigen Adapterplatten auf eine Vielzahl unterschiedlicher Zylinderkurbelgehäuse aufgesetzt werden. Der Automatisierungsgrad wird bei Messsystemen erhöht, die fertigungsnah eingesetzt werden, sodass komplette Zylinderkurbelgehäuse in einem Aufbau vollautomatisch gemessen werden können. Ausgestattet mit einer auf das Kurbelgehäuse aufsetzbaren sogenannten Linewalking-Verfahrschiene, kann der Messkopf definierte Messpositionen ohne manuelles Versetzen anfahren. Der komplette Messablauf, das heißt die Auswahl der zu messenden Zylinder oder die Messpositionen, ist im Vorfeld programmierbar.

3D-TOPOGRAFIEN IM DAUEREINSATZ ERFASSEN

Für eine Standardmessung werden pro Zylinder vier Messfelder mit einer

ENTWICKLUNG ZYLINDERKURBELGEHÄUSE



1 3D-Darstellung und Profilschnitt von Verschleiß an gelaufener Zylinderlaufbahn

Größe von
0,5 mm ×
1,5 mm in vier
unterschiedlichen
Messhöhen gemessen.
Dieser Messstellen-
plan dient bei weiteren
Kontrollmessungen als Referenz.
Umlaufende Messungen
bis 355° sind ebenfalls möglich.

Die gemessenen Rohdaten, auch die Einzelmessungen, werden gespeichert und stehen bei Bedarf für Sonderauswertungen zur Verfügung.

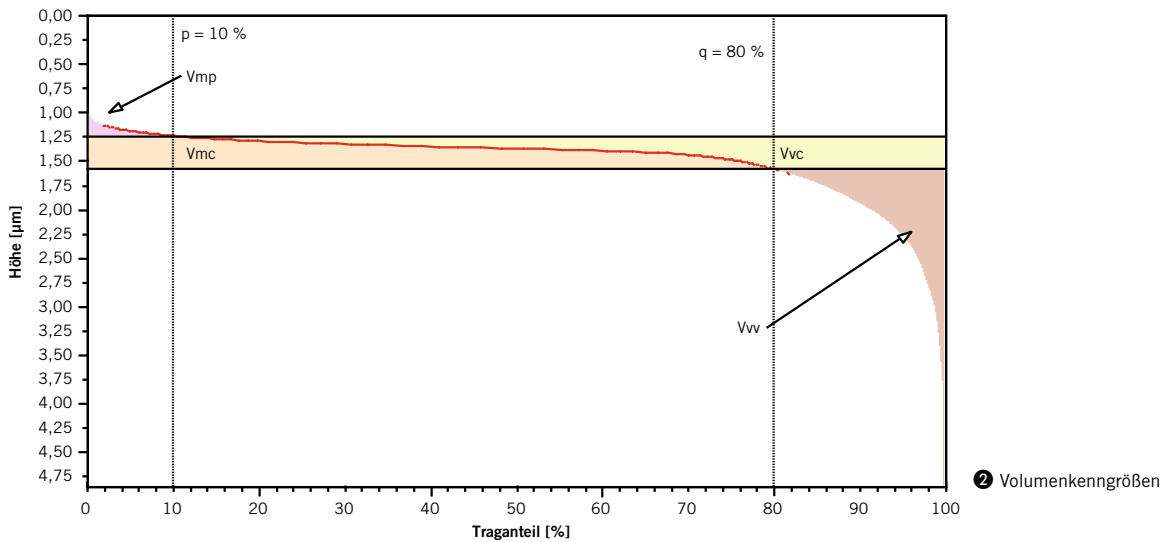
Die Funktion der Oberfläche und die Rauheit werden durch sehr kleine Strukturen bestimmt. Daher ist eine hohe optische Auflösung erforderlich, die durch die Messungen mit einem Objektiv mit 50-facher Vergrößerung (0,25 mm × 0,25 mm) gewährleistet ist. Bei strukturierten Oberflächen ist dieses Messfeld in der Regel zu klein, um ausreichend viele Strukturmerkmale zu erfassen und eine statistische Sicherheit zu erreichen. Daher ist eine schnelle und robuste Stitching-Messung, das heißt eine Verknüpfung benachbarter Messfelder zu

einem geschlossenen Datensatz, notwendig. Durch Stitching von 2 × 8 Einzelbildern wird die Messfeldgröße auf 0,5 mm × 1,5 mm erweitert.

FLÄCHEN- UND VOLUMENKENNGRÖSSEN NACH DIN EN ISO 25178-2

Die Messergebnisse können sowohl in Anlehnung an die üblichen 2D-Rauheitsnormen, wie die ISO 4287, als auch anhand von 3D-Kennwerten ausgewertet werden. Es kann eine Vielzahl funkti-

onaler 3D-Parameter berechnet und dargestellt werden. Dazu gehören Winkel und Tiefen von Honriefen und Traganteile ebenso wie Tiefen, Größen und Verteilung von Partikeln. Neben der quantitativen Auswertung bietet die 3D-Darstellung die Möglichkeit, visuell Unregelmäßigkeiten und Fehler schnell zu erkennen, wie Risse, Ausbrüche, Inhomogenitäten



$V_{mp} = 0,00692 \text{ ml/m}^2$ (Spitzenmaterialvolumen, das im Bereich oberhalb von p berechnet wird)
 $V_{vc} = 0,158 \text{ ml/m}^2$ (Kernluftvolumen, das im Bereich zwischen p und q berechnet wird)
 $V_{mc} = 0,182 \text{ ml/m}^2$ (Kernmaterialvolumen, das im Bereich zwischen p und q berechnet wird)
 $V_v = 0,0986 \text{ ml/m}^2$ (Muldenluftvolumen, das im Bereich unterhalb von q berechnet wird)

oder Verschleiß, ①. Die Übergabe der Messdaten an externe Statistik- oder Auswertesoftware (zum Beispiel Qs-STAT) ist möglich.

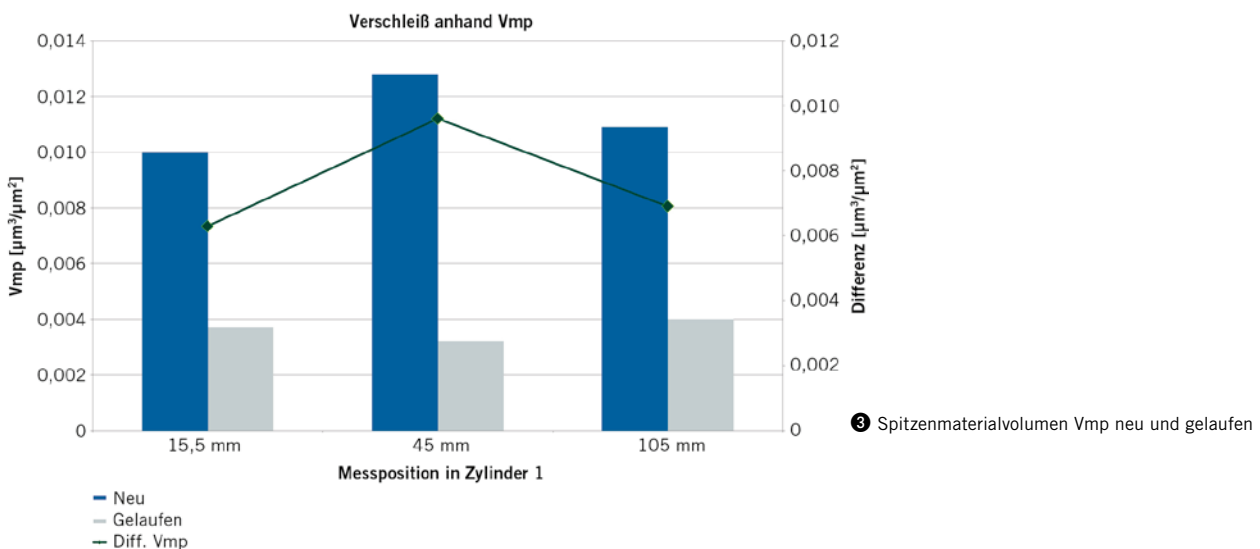
Bei der Bewertung der Honoberfläche, insbesondere bei der Verschleißbewertung, kommen 3D-Oberflächenkennwerte nach DIN EN ISO 25178-2 zum Einsatz. Neben den Höhenparametern S_a , S_z und S_q und den Funktionsparametern S_k , S_{pk} und S_{vk} werden auch die Volumenkenngößen V_{vv} , V_{mp} , V_{mc} , V_{vc} und V_v hinzugezogen. Volumenkenngößen sind für Zylinderlaufflächen interessant, da das Ölrückhaltevolumen

ein wichtiger Parameter bei Zylinderlaufbahnen ist. ② zeigt die Definition der Volumenkenngößen nach DIN EN ISO 25178. Die Volumenkenngößen stützen sich auf die Abbott-Kurve der Oberfläche. Zwei Traganteil-Schwellenwerte (p , q) müssen festgelegt werden, deren Standardeinstellung bei Traganteilen von $p=10\%$ und $q=80\%$ liegt. Das Spitzenmaterialvolumen (V_{mp}) eignet sich insbesondere als Verschleißkenngöße. Für die Beurteilung des Ölrückhaltevolumens wird die Summe aus Muldenluftvolumen (V_{vv}) und Kernluftvolumen (V_{vc}) verwendet. Diese Summe (V_{ges})

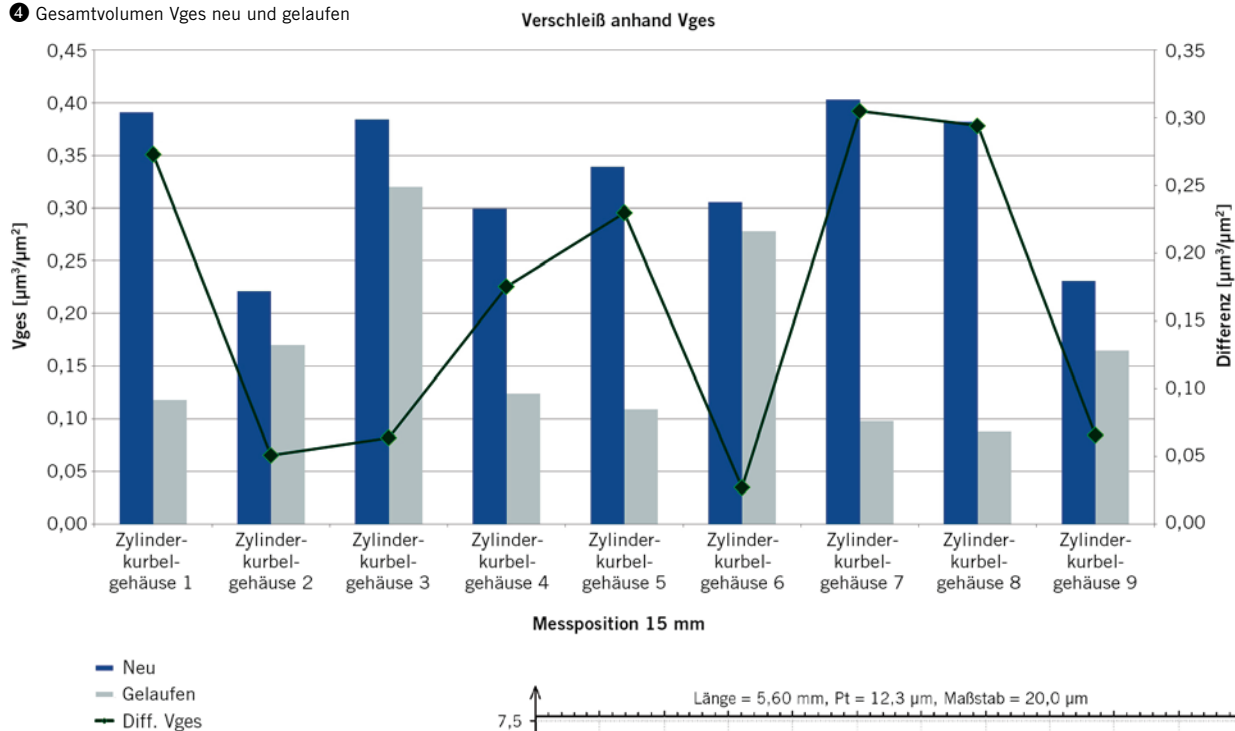
entspricht dem Kennwert $V_v(p=10\%)$ und kann direkt ausgegeben werden.

VERSCHLEISS ANHAND VON VOLUMENKENNGRÖSSEN BEWERTEN

Das Verschleißverhalten kann durch Gegenüberstellung der Volumenkenngöße V_{mp} (Spitzenmaterialvolumen) vor und nach der Testphase bestimmt werden, womit eine Aussage über das Abtragen der Materialspitzen gemacht werden kann. ③ zeigt die Verringerung von V_{mp} in einer Zylinderbohrung in

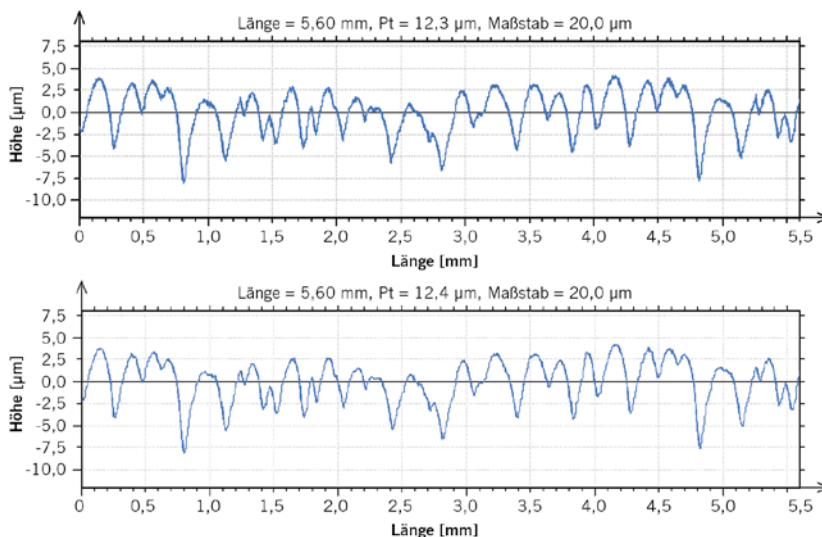


4 Gesamtvolumen V_{ges} neu und gelaufen



drei Messhöhen an einem Motor, der einen Versuch durchlaufen hat.

Auch mit dem Gesamtvolumen V_{ges} (V_v mit $p=10\%$) können Aussagen über den Verschleiß und das Ölrückhaltevolumen gemacht werden. 4 zeigt die Messergebnisse einer Anfangs- und Rückvermessung von neun gelaufenen Motoren. Beispielhaft wird jeweils ein Messfeld eines Zylinders dargestellt. Eine Abnahme des Gesamtvolumens nach jedem Versuch zeigt sich bei allen Messungen.



5 Vergleich der Messergebnisse: taktil gemessenes Profil (oben) und optisch gemessenes Profil (unten)

KOMPATIBILITÄT VON OPTISCHER UND TAKTILER MESSTECHNIK

In der Produktion und Entwicklung von Motoren sind taktile Rauheitsmessgeräte weit verbreitet. Durch den zusätzlichen Einsatz optischer Messtechnik in diesen Bereichen ist die Kompatibilität mit taktilen Vergleichsdaten ein wesentliches Kriterium. Die Vergleichbarkeit sollte sich

dabei aber nicht nur auf das Messprinzip beschränken, sondern um die Fragestellung ergänzt werden, wie vergleichbar flächenhafte und lineare Messungen sind.

Im Fall der konfokalen Messung mit usurf cylinder ist die optische Messung

flächenhaft. Bei einer taktilen Messung wird davon ausgegangen, dass ein Profilschnitt erzeugt wird. Die taktilen Profilmessung auf einer Zylinderlaufbahn wird mit einer Taststrecke von 17,5 mm und einer Grenzwellenlänge von 2,5 mm aus-

	Arithmetischer Mittenrauwert (Ra)	Gemittelte Rautiefe (Rz)	Maximale Rautiefe (Rmax)	Kernrautiefe (Rk)	Reduzierte Spitzenhöhe (Rpk)	Reduzierte Riefentiefe (Rvk)
TAKTIL [μm]	1,720	8,350	9,970	4,410	0,239	3,290
OPTISCH [μm]	1,680	8,140	9,820	4,390	0,233	3,330
DIFFERENZ [μm]	0,04	0,21	0,15	0,02	0,006	0,04

6 Kennwerte taktiler und optischer Messung im Vergleich

geführt. Bei einer optischen flächenhaften Messung beträgt das Messfeld $0,5 \text{ mm} \times 1,5 \text{ mm}$. Ein Filter mit einer Grenzwellenlänge von $2,5 \text{ mm}$ kann somit nicht zum Einsatz kommen. Eine direkte Vergleichbarkeit ist schon aufgrund unterschiedlicher Filter und verschiedener Messorte nicht möglich. Wird die Gegenüberstellung jedoch unter Berücksichtigung gleicher Randbedingungen durchgeführt (entsprechende Wahl von Messstrecke, Messort und Filtereinstellungen), werden auch vergleichbare Messergebnisse erzielt.

Als Beispiel dient eine Messung auf einem Raunormal, 5. Das obere Profil zeigt die taktile Messung, das untere das aus einer optischen Messung extrahierte Profil an gleicher Stelle. Es zeigt sich, dass die Profilverläufe nahezu identisch sind. Auch der direkte Vergleich der Kennwerte bestätigt diese Tatsache, 6. Es kommt zwar zu geringen Abweichungen, die allerdings auch bei Vergleichsmessungen zwischen taktilen Messsystemen auftreten. Sollen Messsysteme miteinander verglichen werden, so darf das nicht auf die Frage taktil/optisch beschränkt werden, da häufig andere Einflussfaktoren für unterschiedliche Messergebnisse verantwortlich sind. Der direkte Vergleich bei gleichen Randbedingungen ist möglich, aber nicht erforderlich. Eine flächenhafte Messung ist nicht dafür gedacht, 2D-Kennwerte zu ermitteln. Vielmehr liefern die flächenhaften, optischen Messsysteme zusätzliche, prozesstechnisch wertvolle Informationen über eine strukturierte Oberfläche.

FAZIT

Das optisch-konfokale 3D-Messsystem μ surf cylinder findet bei Volkswagen Einsatz an verschiedenen Stellen des Entwicklungs- und Produktionsprozesses. In der Qualitätssicherung kann es teilweise aufwendigere Messungen mit einem Rasterelektronenmikroskop ersetzen. Auch für die Überprüfung des Honprozesses ist eine Ergänzung durch ein 3D-Oberflächenmesssystem sinnvoll, da eine taktile 2D-Rauheitsmessung eine strukturierte Oberfläche nicht eindeutig beschreiben kann. Hier können durch fehlende Informationen Motoren mit fehlerhaften Zylinderoberflächen zur Endmontage gelangen.

Im Versuchsaufbau der Aggregatentwicklung dient das System der Verschleißbeurteilung und im Bereich der Forschung der Berechnung der Reibleistung. Anhand der 3D-Messdaten können mikro- und nanostrukturierte Oberflächen hinsichtlich Verschleißfestigkeit und Reibungsverluste optimiert und Bearbeitungsfehler sichtbar gemacht werden.



DOWNLOAD DES BEITRAGS
www.springerprofessional.de/MTZ

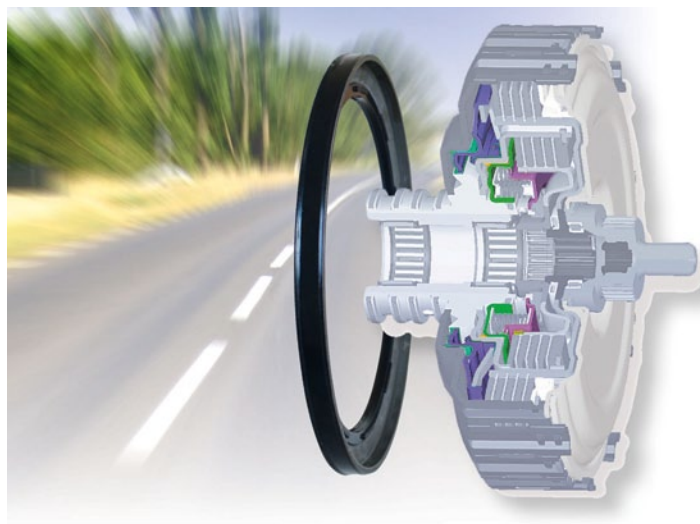


READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
order your test issue now:
springervieweg-service@springer.com



↗ Schalten mit Mehrwert

Optimale Schaltvorgänge und hohe Dauerfestigkeit



Höchste Druckbeständigkeit, gleichmäßig niedrige Reibung, optimale Hysterese – Schaltkolben von KACO bieten mehr als reine Dichtungs- und Lebensdauerfunktionen. Deutschlands größter Hersteller von Schaltkolben für Doppelkupplungen und moderne Automatikgetriebe liefert Lösungen mit Mehrwert. Ein Beispiel sind die millionenfach bewährten Verbundkolben aus AEM-Hochleistungselastomeren. Optimale Schaltvorgänge und eine hohe Dauerfestigkeit sind bei ihnen selbstverständlich.

Erfahren Sie mehr unter www.kaco.de

KACO GmbH + Co. KG

Rosenbergstraße 22
74072 Heilbronn/Germany
Telefon: +49 7131 636-334
Fax: +49 7131 636-418
vertrieb@kaco.de

