

# **Prozessüberwachung funktionskritischer Oberflächen in der Lagerindustrie**

## Anwendungen und Möglichkeiten der Streulichtmesstechnik

Boris Brodmann, OptoSurf GmbH, Ettlingen

Dominik Helfrich, Steinbeis Transferzentrum Wälzlagertechnik, Herzogenaurach

Prof. Dr. Stephan Sommer, Hochschule Würzburg-Schweinfurt, Schweinfurt

### Abstract:

Die Anforderungen an die Qualität der Laufbahnflächen von Gleit- und Wälzlagern sind in den letzten 10 Jahren erheblich gestiegen und erfordern Toleranzen, deren Überwachung hochpräzise Messgeräte für den Nanometerbereich notwendig macht. Gleichzeitig sorgt der internationale Wettbewerb für einen hohen Kostendruck, der einer zeitintensiven Qualitätssicherung entgegensteht. Es besteht also die Notwendigkeit, diese Messungen so nah wie möglich an die Fertigungsprozesse heranzuführen. Der folgende Beitrag stellt eine innovative Messtechnik vor, die in den letzten 10 Jahren viele Lösungen in diesem Bereich ermöglicht hat. Die realisierten Anwendungen reichen von der 100%-Bauteilmessung der Laufbahnwelligkeit mittels Fast Fourier Transformation, bis zur vollflächigen Analyse der Oberflächenmikrostrukturen von Kugelumlaufspindeln. Die aus der Streulichtmesstechnik ermittelten Kenngrößen der Form und Welligkeit zeigen dabei eine hohe Korrelation zu den etablierten taktilen Messmethoden. Die aus der Streuindikatrix abgeleitete Information über die Oberflächenmikrostruktur ist gleich dem tribologisch bedeutsamen Hybridparameter  $R\Delta q$  aus der DIN EN4287 dessen traditionelle Messung mittels Tastschnittverfahren gerätebedingt zu großen Messwertstreuungen führen kann. Unter Laborbedingungen sind beide Verfahren jedoch sehr gut zu vergleichen, so dass neben den realisierten Anwendungen auch umfangreiche Untersuchungen an einer großen Zahl von Komponenten der Lagerindustrie präsentiert werden können.

## **1. Grundlagen der Oberflächenmessung mittels statistischer Kenngrößen**

Die Auswahl geeigneter Kenngrößen zur Beschreibung technischer Oberflächen gehört bei der Konstruktion von Hochleistungsbauteilen wie Gleit- und Wälzlagern zu den häufig vernachlässigten Herausforderungen. Durch den statistischen Charakter der Oberflächenmikrostrukturen, die Vielzahl der möglichen Fertigungsprozesse, den unterschiedlichen Aufgaben der zu beschreibenden Funktionen und der Fülle an physikalischen Messverfahren, ist es schwierig mit wenigen Kenngrößen eine hinreichend zuverlässige Charakterisierung zu realisieren.

Gerade die internationale Normung hat in den letzten 30 Jahren eine große Anzahl von neuen Parametern kreiert, die jedoch in der überwiegenden Mehrzahl keinen Einzug in Fertigungszeichnungen gefunden haben. Hier dominieren weiterhin die einfachen, an ein bestimmtes Fertigungsverfahren gebundenen Parameter der ISO4287,  $R_a$ ,  $R_z$  und  $R_{max}$  [1].

Doch gerade in der Wälzlagerindustrie spielen Hochleistungsflächen eine herausragende Rolle und benötigen eine präzise Beschreibung. Insbesondere die aufkommende Elektrifizierung der Mobilität lässt die Anforderungen an die Oberflächen der Wälzlagerkomponenten weiter steigen. Dabei kommt der Reduzierung von Geräuschen und der Verringerung der Reibung eine immer größer werdende Bedeutung zu.

Für die eindeutige Beschreibung akustisch unauffälliger und reibungsarmer Wälzlager müssen also mehrere Oberflächeneigenschaften definiert und toleriert werden. Die Bandbreite der Anforderungen reicht von der Oberflächenmikrogeometrie, also der Rauheit, bis zu den langwelligeren Abweichungen der Idealgeometrie, die mittels Fourier Analyse [2] aus dem Formprofil abgeleitet werden.

Bei der Beschreibung der Rauheit sind die Kenngrößen der Amplitudendichteverteilung des Rauheitsprofils von großer praktischer Bedeutung. Der offensichtlichste Parameter wäre die sogenannte rms-Rauheit, die mit

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_{i=1}^l z(x)^2 dx} \quad (1)$$

als der quadratische Mittelwert des Rauprofils definiert ist. Aus historischen Gründen hat sich in der industriellen Anwendung der Gleichrichtwert des Signals der Höhen durchgesetzt, der als Ra-Wert in vielen technischen Zeichnungen zu finden ist.

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx \quad (2)$$

Beide sind aber nicht dazu geeignet, Aussagen über die genaue Verteilung der Höhen zu machen. Diese Information bietet das dritte statistische Moment der Amplitudendichte, die so genannte Schiefe oder skewness, die mit dem Rsk

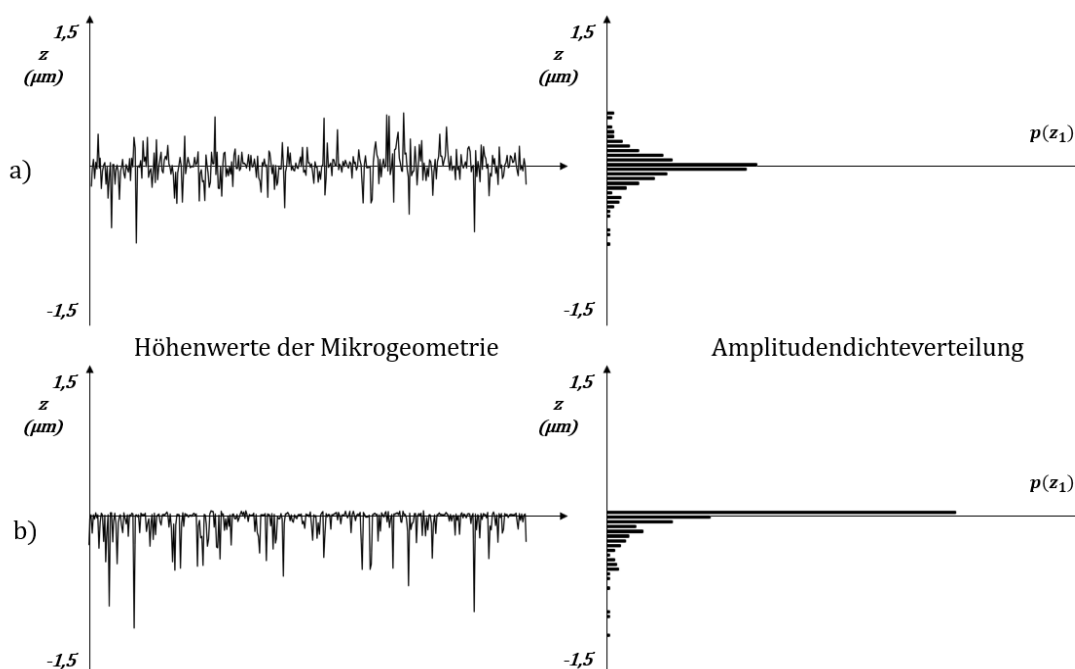


Abbildung 1: a) Oberfläche mit  $Rq = 0,17\mu\text{m}$  und  $Rsk = -0,47$

b) Oberfläche mit  $Rq = 0,17\mu\text{m}$  und  $Rsk = -3,08$

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \int_0^l z(x)^3 dx \quad (3)$$

eine Entsprechung in der ISO4287 hat und in der Wälzlagerindustrie zunehmend Verbreitung findet [4].

In Abbildung 1 sind die Rauheitsprofile und die dazugehörige Amplitudendichtehistogramme von zwei verschiedenen Oberflächen zu sehen. Beide besitzen identische Rq-Werte, unterscheiden sich jedoch sehr deutlich in ihrer Schiefe.

Um eine für Gleit- und Wälzlager günstige Rauheit zu erzeugen muss sichergestellt sein, dass die Endbearbeitung der Lagerflächen eine plateauartige Oberflächenstruktur erzeugt. Dabei definiert die Nulllinie des Rauheitsprofils die ideale geometrische Oberfläche. In das Material hineinragende Riefen werden als Reservoirs für Schmierstoffe und abrasive Partikel verstanden, während sich aus dem Profil herausragende „Profilspitzen“ negativ für den Aufbau eines dünnen Schmierfilms auswirken [3].

Eine günstige Verteilung der Rauheitsabweichungen für Gleit- und Wälzlager sollte also aus wenigen, kleinen Abweichungen der Höhen in den positiven und größeren Abweichungen in den negativen Bereich des Rauheitsprofils, bei gleichzeitiger Häufung der Höhenwerte um die Referenzlinie bestehen. Ein kleiner Rq/Ra-Wert kennzeichnet die geringe Streuung der Höhenwerte und ein negativer Rsk-Wert deutet auf einen plateauartigen Charakter der Oberfläche hin der ein günstiges Einlaufverhalten ermöglicht [5].

Dabei hinterlassen Schleifprozesse eher gaußförmige Amplitudendichteverteilungen (Abbildung 1a) mit geringer Schiefe, während Oberflächenfinish in Form eines Honprozesses eine linksschiefe Verteilung mit negativen Rsk-Werten erzeugt (1b). Da bei Gleit- und Wälzlagern der Wunsch nach einer Oberfläche mit flacher und plateauartiger Struktur im Kontaktbereich besteht, kann die Qualität der Feinbearbeitung  $\eta$  also durch die Einhaltung kleiner Rq und stark negativer Rsk Werte bewertet werden.

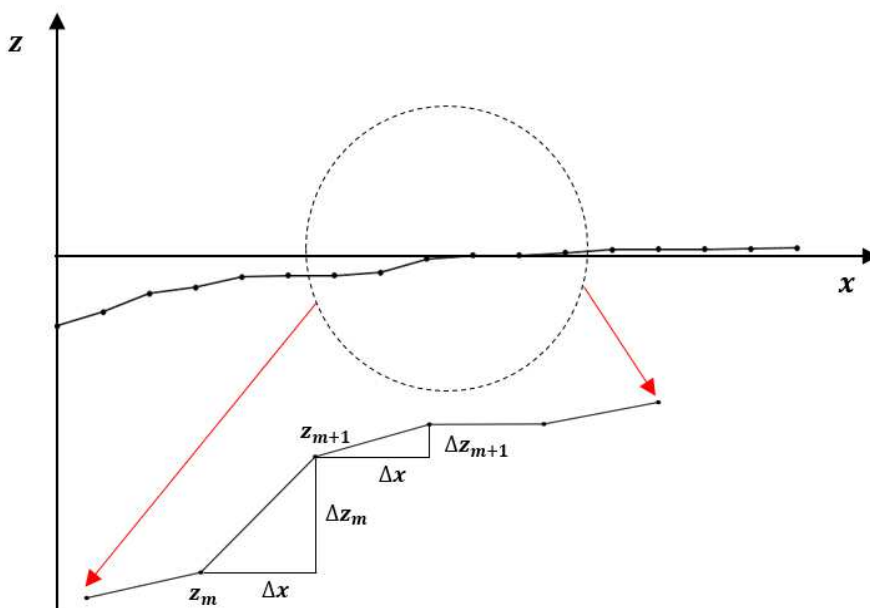


Abbildung 2: Vergrößerung des abgetasteten Profils

der abgetasteten Höhenwerte  $z_i$  zu sehen. Zur Berechnung der Steigung wird der Quotient aus der Höhendifferenz und der Schrittweite gebildet.

Eine Alternative zu den bereits beschriebenen Parametern bilden hybride Kenngrößen, die einerseits tribologisch wichtige Informationen über die Oberflächen liefern [3], andererseits zur Prozessüberwachung der Honprozesse eingesetzt werden können.

Hybride Parameter bewerten nicht die Höhenverteilung der Oberfläche, sondern deren Steigungsverteilung.

In Abbildung 2 ist ein vergrößerter Ausschnitt des Profilschnitts und

$$\frac{\Delta z_m}{\Delta x} = \frac{z_{m+1} - z_m}{x_{m+1} - x_m} \quad (4)$$

Mit diesen Werten können aus den Profildaten analog zu den statistischen Kenngrößen der Amplitudendichteverteilung  $R_q$ ,  $R_{sk}$ , etc. weitere Parameter abgeleitet werden, die zusätzliche laterale Informationen beinhalten. Der quadratische Mittelwert der Profilsteigung berechnet sich aus der numerischen Ableitung des Profils mit

$$R\Delta q = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left( \frac{\Delta z_m}{\Delta x} \right)^2} \quad (5)$$

Man kann die Steigungen des Oberflächenprofils analog zu den Höhen als Verteilung darstellen und daraus statistische Kenngrößen ableiten. In Abbildung 3 sind die typischen Histogramme der Steigungen einer geschliffenen und einer gehonten Oberfläche zu sehen. Bei der gehonten Oberfläche ist eine deutliche Zunahme der Häufung flacher Profilsteigungen erkennbar, was auf den zunehmend plateauartigen Charakter der Oberfläche zurückzuführen ist.

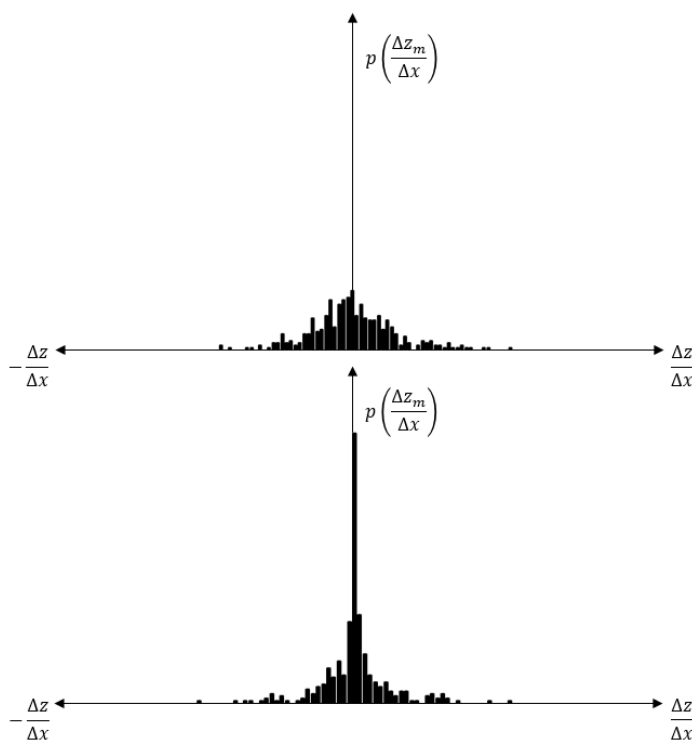


Abbildung 3) Histogramm einer (a) geschliffenen und (b) gehonten Oberfläche

Mit der Kenngröße  $R\Delta q$  ist also prinzipiell eine Unterscheidung von Schleif- und Honprozessen möglich, insbesondere dann, wenn aus gaußverteilten Ausgangsoberflächen solche gefertigt werden, die über eine ausgeprägte negative Schiefe verfügen.

Abbildung 4 zeigt drei Beispiele aus der Praxis. Untersucht wurden drei Zylinderrollen, die mit unterschiedlichen Prozessen endbearbeitet wurden. In der Konfokalmikroskop-Messung sind die verschiedenen Texturen der Prozesse zu erkennen. Schleifen zeichnet sich durch eine ausgeprägte parallel orientierte Riefenstruktur aus, während das einfache Honen einen deutlichen Kreuzschliff zeigt. Die optimierte Oberfläche des mehrstufigen Honens weist nur noch wenige, vom Plateau ins Material hineinragende Riefen auf. Im Profilschnitt ist die ebenfalls deutlich abnehmende Rautiefe bei zunehmendem Plateau zu sehen. Die Kennwerte der vorgestellten Kenngrößen dieser verschiedenen Oberflächen ist Tabelle 1 zu entnehmen. Auffällig ist, dass die Größenordnungen der Oberflächenkenngrößen bereits im Nanometerbereich liegen. So

die verschiedenen Texturen der Prozesse zu erkennen. Schleifen zeichnet sich durch eine ausgeprägte parallel orientierte Riefenstruktur aus, während das einfache Honen einen deutlichen Kreuzschliff zeigt. Die optimierte Oberfläche des mehrstufigen Honens weist nur noch wenige, vom Plateau ins Material hineinragende Riefen auf. Im Profilschnitt ist die ebenfalls deutlich abnehmende Rautiefe bei zunehmendem Plateau zu sehen. Die Kennwerte der vorgestellten Kenngrößen dieser verschiedenen Oberflächen ist Tabelle 1 zu entnehmen. Auffällig ist, dass die Größenordnungen der Oberflächenkenngrößen bereits im Nanometerbereich liegen. So

	geschliffen	gehont	2x gehont
$R_a(\mu\text{m})$	0,35	0,08	0,01
$R_z(\mu\text{m})$	2,1	0,57	0,15
$R_{sk}(-)$	-0,86	-1,32	-3,23
$R_{dq}(^\circ)$	13,7	4,3	0,9

Tabelle 1

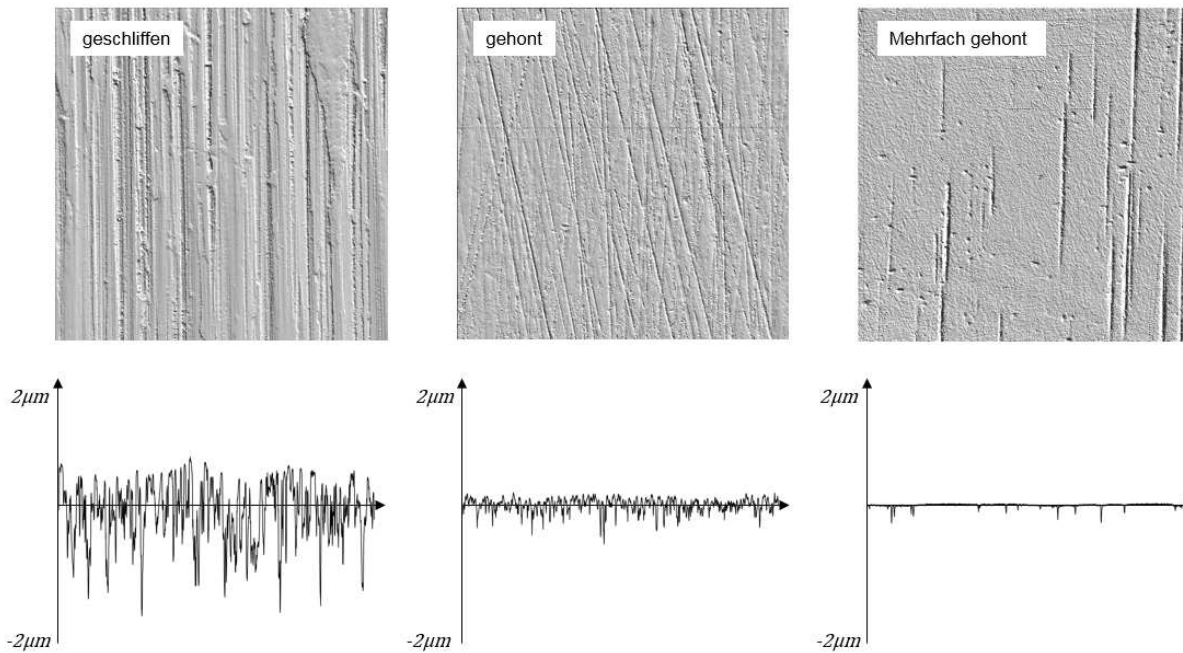


Abbildung 4. Mikroskop Aufnahmen und Profilschnitte von:

a) geschliffener  
Oberfläche

b) einfach gehonter

c) mehrfach gehonter

unterscheidet sich die mittlere Rautiefe  $R_z$  von einfach und mehrfach gehonten Flächen nur noch um  $0,4 \mu\text{m}$ . Um hier eine trennscharfe, fähige Messung mit der traditionellen taktilen Messtechnik zu gewährleisten, müssen die Messgeräte mit geeigneten Normalen einer regelmäßigen Prüfmittelkontrolle unterzogen werden, welche die Fähigkeit der Messtechnik in diesem feinen Bereich bestätigt [6]. Zusätzlich müssen äußere Störeinflüsse reduziert werden, so dass eine Messung in direkter Fertigungsumgebung deshalb nur unter sehr großem Aufwand möglich ist. Eine sichere Aussage über die Qualität der Prozesse ist nur im zentralen Feinmessraum bei idealen Laborbedingungen gewährleistet. Ist dies der Fall, trennt jede der in Tabelle 1 gezeigten Parameter die unterschiedlichen Prozessschritte deutlich voneinander.

## 2. Fourieranalyse des Formprofils zur Beurteilung akustischer Eigenschaften

Zur Vorhersage von Geräuscheigenschaften, die durch harmonische Anregung des Lagers verursacht werden, eignet sich die Untersuchung des Formprofils mittels Fourieranalyse. Grundidee ist, dass das Überrollen von Oberflächenstrukturen das Lager zum Schwingen anregt. Es wird zwischen einer breitbandigen und einer harmonischen Anregung des Lagers unterschieden. Dabei wird das Zweitere als deutlich unangenehmer empfunden, da durch die Anregung einer einzelnen Frequenz das Lager einen einzelnen Ton erzeugt, der zusätzlich durch Modulation an- und abschwellen kann [2].

In der industriellen Praxis der Wälzlagerindustrie werden Form und Welligkeit in der Regel im Feinmessraum unter idealen Bedingungen auf einem Formtester gemessen. Ein Einsatz in Produktionsumgebung empfiehlt sich nicht, da sich Umgebungsschwingungen auf die Messung übertragen und sehr leicht zu kostenintensiven Fehlinterpretationen führen können. In Abbildung 5 wird das Formprofil eines geschliffenen Innenrings gezeigt, der eine maximale Rundheitsabweichung von  $1,88 \mu\text{m}$  besitzt. Dabei tragen vor allen Dingen die langwelligen Anteile zu dieser Formabweichung bei. Für eine Bestimmung der Rundheit oder des  $\Delta r$  wird

in der Regel ein Tiefpassfilter eingesetzt, der die hohen Frequenzanteile, also die Welligkeit und Rauheit eliminiert.

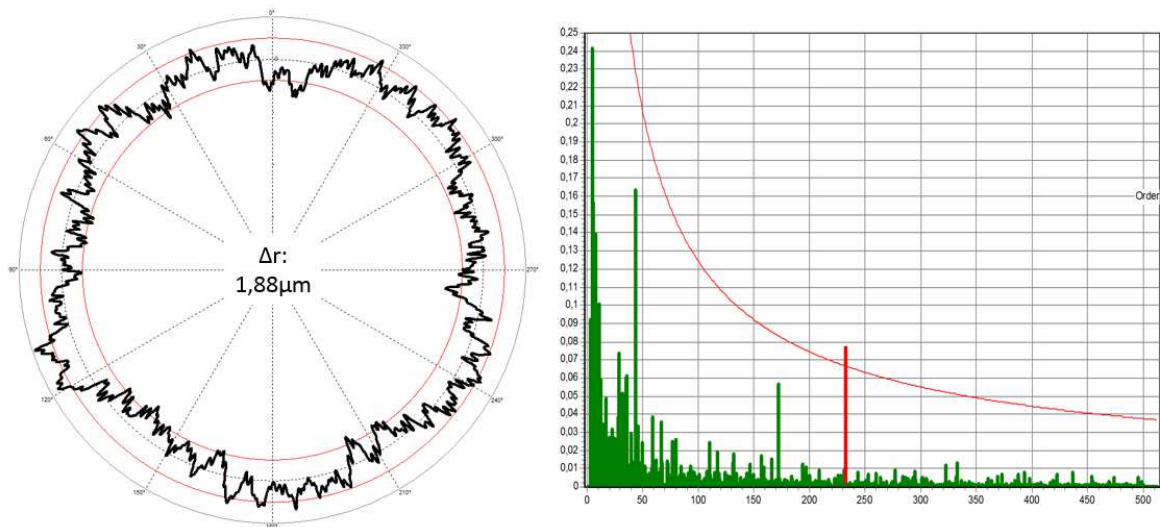


Abbildung 5. Polardiagramm und Amplitudenspektrum eines geschliffenen Innenrings

Zur Bewertung der hohen Frequenzanteile wird das Formprofil mit Hilfe der FFT (fast fourier transform) einer Fourieranalyse unterzogen. Hier werden weitere dominierende Welligkeitsbestandteile des Oberflächenprofils dargestellt. Bezüglich der einzuhaltenden Toleranzen wird der Tatsache Rechnung getragen, dass kürzere Wellenlängen „energiereicher“ sind und bereits bei niedrigen Amplituden für Auffälligkeiten sorgen können. Grenzwerte sind nicht linear, sondern exponentiell abfallend, was sehr schnell zu Toleranzen im zweistelligen Nanometerbereich führt.

In Abbildung 5 ist deutlich ein Peak mit der Wellenzahl 233 (d.h. 233 Wellen / Umfang) zu erkennen, der in seiner absoluten Amplitude nur  $0,075\mu\text{m}$  hat, jedoch zur akustischen Auffälligkeit des Lagers führt. Diese Frequenzanteile, besonders im mittleren und hohen Frequenzbereich ( $> 25$  Wellen / Umfang) sind häufige Ursache von Reklamationen auf Grund von Geräuschen [2].

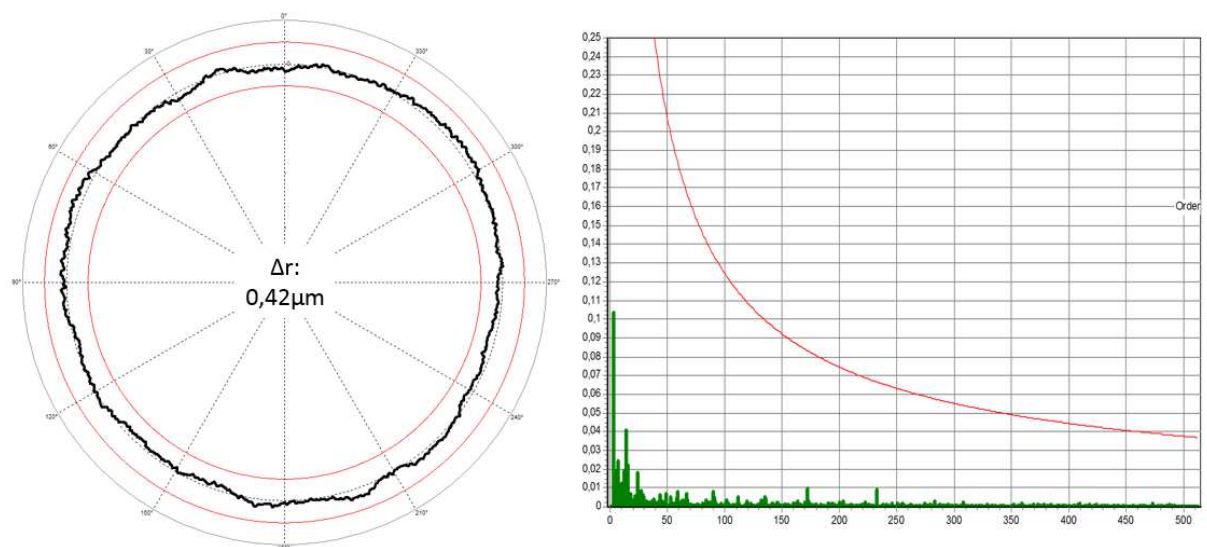


Abbildung 6. Polardiagramm und Amplitudenspektrum eines geschliffenen Innenrings

Werden nach dem Schleifen Honverfahren wie Finishen [7] zur Optimierung der Oberfläche angewendet, führen diese neben einer feineren Rauheit und einer Verbesserung der absoluten Formabweichung zu einer Reduzierung der Amplitudenhöhen im Frequenzspektrum, wie in Abbildung 6 zu sehen ist. Die Fourieranalyse des Formprofils gehört deshalb zu den Standardverfahren der Qualitätssicherung.

### 3. Grundlagen der Streulichtmesstechnik

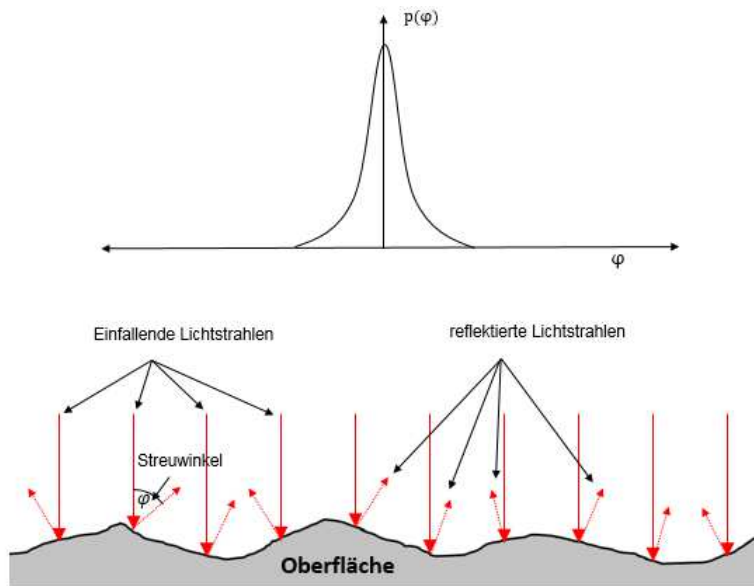


Abbildung 7. Winkelverteilung und Mikroprofilwinkel einer rauhen Oberfläche

Oberfläche einfallende Lichtstrahlen werden an den Mikroprofilwinkeln  $\varphi$  der Rauheit reflektiert [9]. Das so zurückgestreute Licht wird mit Hilfe einer Fourieroptik in deren Brennebene übertragen. Die hier durch einen Detektor erfasste Intensitätsverteilung entspricht der Häufigkeitsverteilung der Streuwinkel. Abbildung 8 zeigt die Verhältnisse einer einzelnen Spiegelfacetten. Trifft ein Lichtstrahlenbündel senkrecht auf die Oberfläche, dann werden die einzelnen Lichtstrahlen an den sehr feinen Facetten reflektiert. Die Geometrie einer Facette wird durch ihren Winkel  $\theta$  oder Gradienten  $dz/dx$  beschrieben. Die in Abbildung 3 dargestellten Steigungen der Oberfläche können demnach vereinfachend als Spiegelfacetten verstanden werden. Unter Verwendung der einfachen geometrischen Optik kann so das einfache Reflexionsgesetz wie in Abbildung 7 gezeigt angewendet werden. Für das gestreute Licht wird so eine einfache Beziehung zu den Mikrostrukturen der Oberfläche hergestellt. Da bei technischen Oberflächen in der Regel die Steigungen der Profilflanken keine großen Werte aufweisen, kann man annehmen, dass

$$\frac{\partial z}{\partial x} \approx \theta \quad (6)$$

Eine alternative Messmethode zur Erfassung der Mikrogeometrie feiner technischer Oberflächen bietet das in der VDA 2009 beschriebene winkelaufgelöste Streulichtverfahren. Es eignet sich besonders für Oberflächen, deren Funktion eine besonders glatte Struktur mit niedrigen Reibungswerten erfordert. [8] Das Messverfahren beruht auf dem Prinzip der Lichtstreuung und dem Modell der Spiegelfacetten. Abbildung 8 zeigt die zu Grunde liegende Idee. Senkrecht auf eine raue

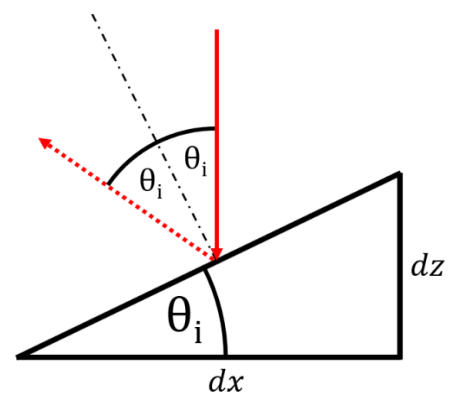


Abbildung 8. Spiegelfacetten



ist. Für den Streuwinkel  $\varphi$  gilt dann

$$\varphi = 2\theta \quad (7)$$

und die Varianz der in Abbildung 7 gezeigten Winkelverteilung berechnet sich als die in der VDA2009[9] beschriebene Kenngröße  $A_q$ .

$$A_q = k \cdot \sum_{i=1}^n (2\theta_i - 2\bar{\theta})^2 \cdot p(2\theta_i) \quad (8)$$

Dabei entspricht  $\bar{\theta}$  dem ersten statistischen Moment und damit dem mittleren Reflexionswinkel des Strahlenbündels und  $p(2\theta_i)$  der normierten Einzelwahrscheinlichkeit einer Winkelklasse. In Abbildung 9 sind die normierten Verteilungen der Oberflächen „gehont“ und „mehrfach gehont“ aus Abbildung 4 zu sehen. Obwohl die Messdaten des Konfokalmikroskops nur aus einem einzelnen Profilschnitt stammen, zeigt sich die große Übereinstimmung zur Streuwinkel-

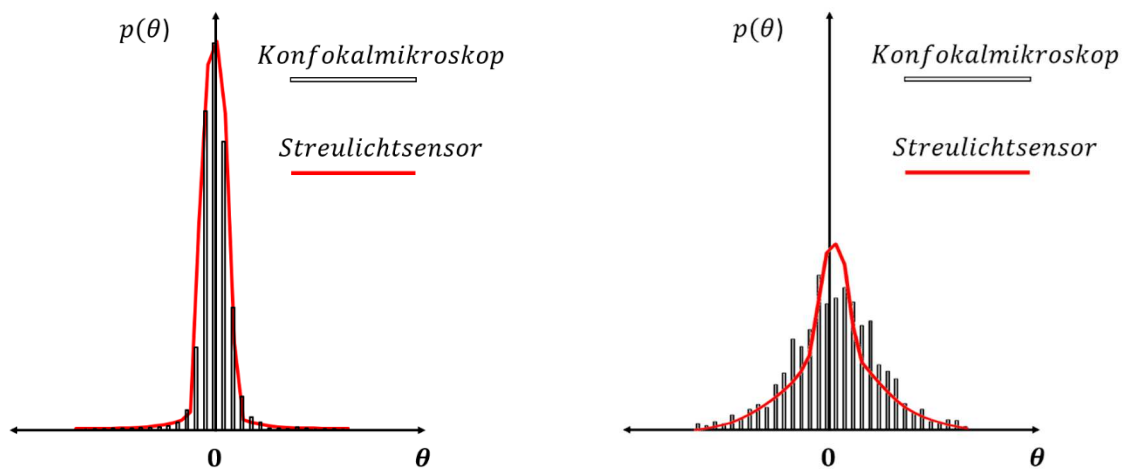


Abbildung 9. Vergleich Winkelverteilung optischer und taktiler Messung

verteilung. Verwendet man (8) zur Berechnung des  $A_q$ -Werts, so erhält man die Zahlenwerte aus Tabelle 2, die ein hohes Maß an Vergleichbarkeit zwischen konfokaler und optischer Messung zeigen. Zu beachten ist, dass bei der Berechnung der Steigungsverteilung des Rauprofils *zwingend* das  $\lambda_s$ -(Tiefpass-)Filter eingesetzt werden muss, da bei der numerischen Ableitung das Instrumenten- und Umgebungsrauschen stark in das Messergebnis einfließen. Außerdem muss die laterale Auflösung des Messgerätes bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.[3]

$A_q$	konfokal	ARS
geschliffen	59,94	62,40
gehont	25,86	30,33
mf gehont	3,96	3,80

Tabelle 1

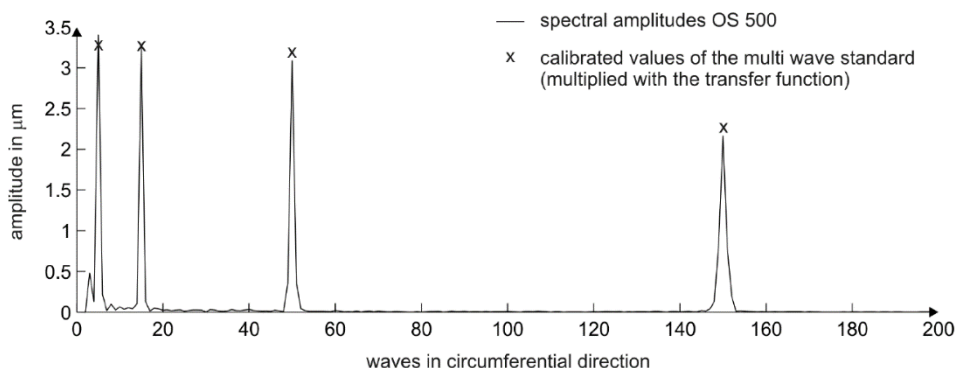


Abbildung 9. Vergleich Amplitudenspektrum optische und taktile Messung



Neben der Analyse von Mikrostrukturen der Oberfläche kann das Streulichtverfahren auch Aussagen über die Makrogeometrie der Oberfläche treffen. Dabei kann  $\bar{\theta}$  als lokale Steigung des Makroprofils und damit als Ableitung der Form interpretiert werden. Mit bekanntem Messpunktstand  $dx$  kann durch Integration die absolute Formabweichung des Prüflings ermittelt werden [10].

$$p(x) = \int_0^T \bar{\theta}(x) dx \quad (9)$$

Dieses Profil ist mit den Standardmessungen der taktilen Messtechnik vergleichbar, wie in Abbildung 10 am Beispiel eines Mehrwellennormals gezeigt. In Abbildung 9 ist das Amplitudenspektrum der Fourieranalyse von optischer und taktiler Referenzmessung zu sehen.[10]

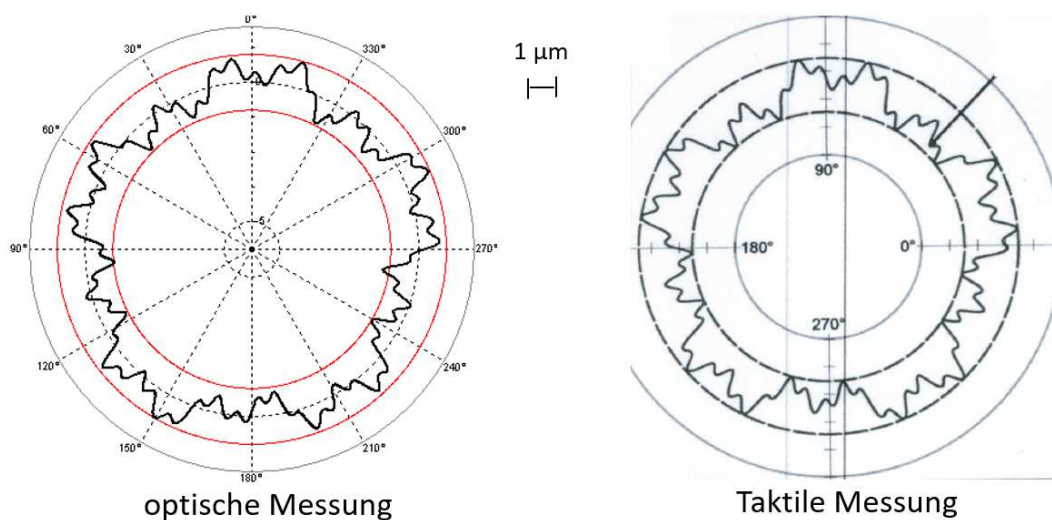


Abbildung 10. Vergleich optischer und taktiler Rundheitsmessung

#### 4. Anwendungen der Streulichttechnologie in der Gleit- und Wälzlagerindustrie

##### 4.1 Hundert Prozent Messung von Lagerringen

Die Qualitätssicherung der Produktion von Gleit- und Wälzlagern findet heute überwiegend in den Feinmessräumen der Unternehmen statt. Dabei steht die Einhaltung kleinster Toleranzen bei hohen Stückzahlen und kurzen Taktzeiten im Vordergrund. Wegen der langen Wege und der langen Messzeiten der traditionellen Messverfahren werden lediglich Stichproben entnommen, um die Stabilität der Fertigungsprozesse zu überwachen. Zeitlich begrenzte Störungen innerhalb des Prüfzyklus können dabei leicht übersehen werden. Hier wäre eine merkmalsbezogene Prozessüberwachung direkt in der Linie von großem Vorteil. Abbildung 11 zeigt den Streulichtsensor in einem linienintegrierten Prüfautomaten für die 100%-Überwachung der Laufbahn von Außenringen. Mit einer Periskopoptik wird die Laufbahn hinsichtlich



Abbildung 11. Messautomat mit Streulichtsensor

Auffälligkeiten der Form- als auch der Rauheit überwacht. Abbildung 12 zeigt typische Fehler, die in der Serienfertigung von Kugellagern auftreten können. Wird die Laufbahn nicht komplett ausgehont, so können lokal Bereiche auftreten, die im Kontaktbereich Kugel/Laufbahn Reste der Schleifstruktur aufweisen. Liegen diese Stellen im Kontaktbereich der Wälzkörper, besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit für ein geräuschauffälliges Lager. Bei Stichprobenkontrollen lassen sich

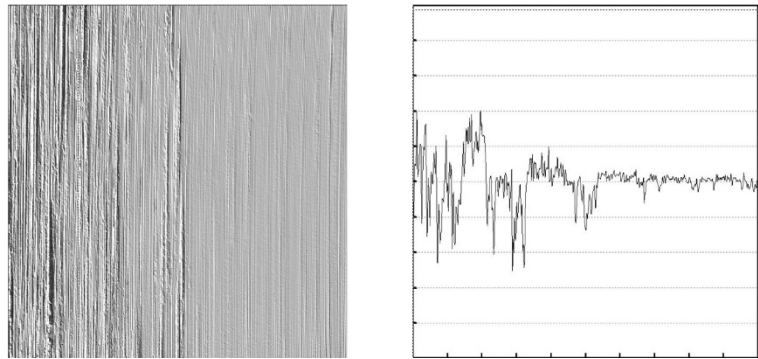


Abbildung 12. Messung einer nicht komplett gehonten Laufbahnstelle

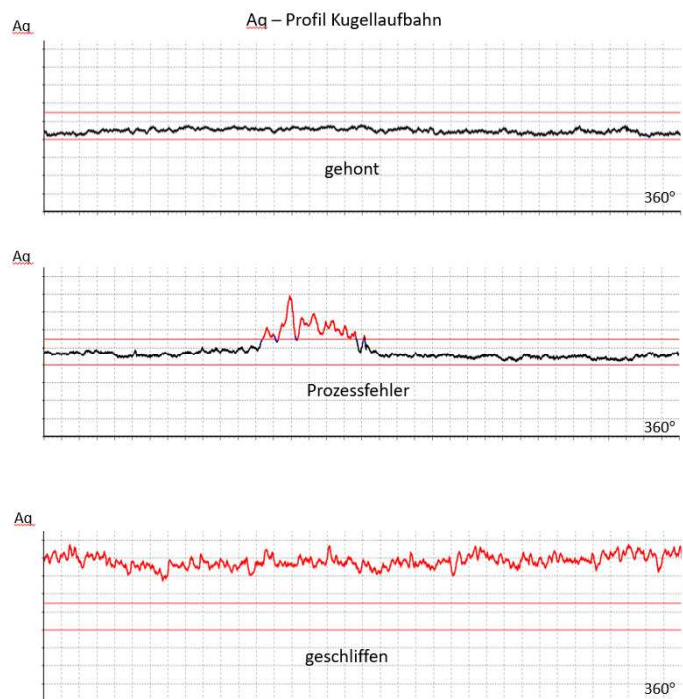


Abbildung 13. Messaufbau Innenring mit Streulichtsensor(links), Aq-Profile einer gehonten, nicht komplett gehonten und geschliffenen Laufbahnstelle

diese Fehler nur durch großen Zufall entdecken. Zum einen ist nicht jeder Ring betroffen, zum anderen tritt der Fehler lokal und nicht über den Umfang der Laufbahn auf. In Abbildung 13 ist der Messaufbau des Streulichtensors zu erkennen. Über den Umfang verteilt werden 1024 überlappende Streulichtmessungen durchgeführt. Die dabei ermittelten Aq-Werte sind in den Messdiagrammen der selben Abbildung zu sehen. Jeder Punkt repräsentiert eine einzelne Rauheitsmessung. Über den Umfang verteilt bilden sie das Aq-Profil. Bei gut gehonten Oberflächen liegen die Aq-Werte zwischen den beiden roten Toleranzgrenzen. Geschliffene Ringe weisen Aq-Werte auf, die deutlich darüber liegen. Treten lokal Stellen mit schlechter Honung auf, werden diese deutlich erkannt. Ähnliche Ergebnisse erhält man, wenn die Form des Rings ausgewertet wird. Abbildung 14 zeigt Rundheitsdiagramm und Amplitudenspektrum des Rundheitsprofils eines nicht durchgehonten Lagerrings. An der Position mit Restschleifstruktur erkennt man im Rundheitsprofil die lokale Welligkeit. Im Amplitudenspektrum macht sich dieser Fehler ebenfalls bemerkbar, so dass eine abfallende Toleranzkurve diesen Ring bei einer 100% Kontrolle als n.i.O. bewertet und ausgeschleust hätte. Der in Abbildung 11 gezeigte Messautomat benötigt für die Messung und Bewertung eines Lagerrings weniger als eine Sekunde. Grundvoraussetzung ist eine geeignet gereinigte

Oberfläche, die aber nicht zwingend durch einen Waschprozess erzeugt werden muss. Ein dünner, homogen über die Oberfläche verteilter Ölfilm stört die Messung nicht.

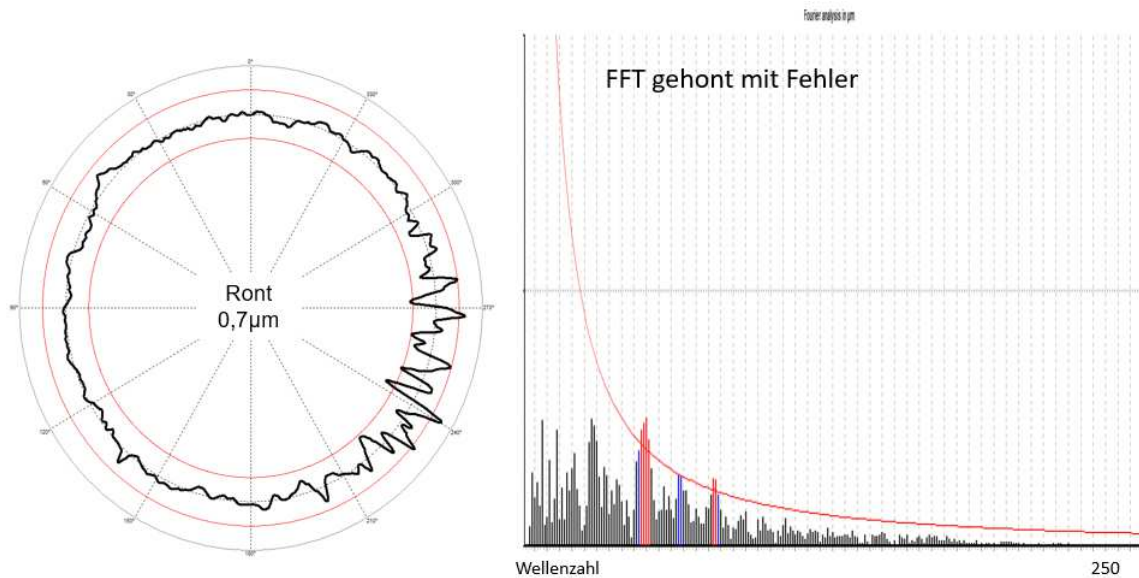


Abbildung 14. Rundheitsprofil und FFT eines nicht komplett gehonten Innenrings

#### 4.2 Welligkeitsmessung von Vierpunktlagern in Kugelgewindetriebe

In EPS-Servolenkungen werden heute in der Regel Kugelgewindetriebe verbaut. Dabei ist die Qualität der Laufbahnoberflächen mitentscheidend für das Geräuschverhalten der Lenkung. Von entscheidender Bedeutung ist neben der Geometrie auch die Welligkeit der Laufbahn um den Druckpunkt. Hier werden Finishprozesse eingesetzt, um die bei den Vorprozessen entstehenden Welligkeiten zu eliminieren. Eine große Herausforderung spielt dabei das unterschiedliche Verhalten des Lagers unter Last. Falls der Finishprozess nur einseitig stattgefunden hat, ist eine sinnvolle Beurteilung durch Koordinatenmesstechnik nicht mehr gegeben, da die Antastung in der Regel an beiden Flanken erfolgt. Die Streulichtmessung ist in der Lage, durch Schwenken des Sensors an beiden Flanken die Welligkeit eindeutig zuzuordnen. Abbildung 15 zeigt den Messaufbau für Kugelgewindetriebe.



Abbildung 15. Welligkeitsmessung an KGT

## 5. Zusammenfassung

Die hohen Anforderungen an Gleit- und Wälzlager durch die aufkommende Elektrifizierung der Mobilität stellt die Industrie vor große Herausforderungen. Toleranzen von Rauheit und Welligkeit bewegen sich im hundertstel Mikrometerbereich. Oberflächenrauheiten lassen sich sehr gut durch statistische Kenngrößen der Amplitudendichte- und der Winkelverteilung beschreiben, während anregende Welligkeiten im Amplitudenspektrum der Fourieranalyse des Formprofils zu finden sind. Streulichtmesstechnik liefert eine rückführbare Messtechnik, die eine statistische Rauheitskenngröße  $A_q$  ermittelt, mit der man sehr gut verschiedene Fertigungsverfahren trennen kann. Gleichzeitig wird über die Integration der Makrosteigung ein Formprofil erstellt, das zur Formanalyse wie Rundheit und Fourieranalyse eingesetzt werden kann. Die Technologie ist robust, schnell, berührungsfrei und kann in Fertigungslinien zur 100%-Überwachung der Produktion eingesetzt werden.

- [1] Seewig, J., Wiehr, C. u. Gröger, S.: Charakterisierung technischer Bauteiloberflächen. Stand der Oberflächenmesstechnik heute. Metrologie in der Mikro- und Nanotechnik 2011. Messprinzipien - Messgeräte - Anwendungen; 4. Fachtagung, Erlangen, 25. und 26. Oktober 2011. Düsseldorf: VDI-Verl. 2011, S. 159–171
- [2] Hutzler, M.: Anwendung der harmonischen Analyse in der Wälzlagerfertigung, VDI Wissensforum, 2016
- [3] Bodschinna, H.: Oberflächenmeßtechnik zur Beurteilung und Optimierung technischer Funktionsflächen, Aachen, Shaker Verlag, 2000
- [4] ISO4287
- [5] Stout, K.J. et al. :Analytical Techniques in Surface Topography and their application to a Running-In Experiment., Wear 43, 1977, S. 99-115
- [6] Bodschinna, H., Hillmann W., Oberflächenmeßtechnik mit Tastschnittgeräten in der industriellen Praxis, Berlin, Beuth-Kommentare 1992
- [7] Riedel, W. Kurbelwellenfinish mit engsten Lagerabständen, Velbert, Schleifen und Polieren 6/2017
- [8] Brodmann, R., Allgäuer, M.: Comparison of light scattering from rough surfaces with optical and mechanical profilometry in surface measurement and characterization. In: Proc. SPIE, vol. 1009, pp. 111–118 (1988)
- [9] VDA2009 Geometrische Produktspezifikation, Winkelaufgelöste Streulichtmethode,, Definition, Kenngrößen und Anwendung. 2010/01
- [10] Brodmann, B.: Optische Form und Welligkeitsmessung im Nanometerbereich, VDI Wissensforum, 2016