

Optimale Rundlauf-Prüfungen mit Prismenlagern

Dr. Axel Rückert, 22.06.2020

1 Einleitung

Rundheit und Ebenheit sind wichtige Eigenschaften von Wellen für rotierende Maschinen. Unrundheit kann die Ursache für Unwucht sein oder ein Anstreifen am Stator verursachen. Daher sollten Rundlauf und Planlauf bei der Herstellung einer Welle und bei der Reparatur der Welle überprüft werden.

Idealerweise würde Rundlauf auf einer Koordinatenmessmaschine (KMM) überprüft werden. Dort würde der Rotor vertikal ausgerichtet und mit einem präzisen Sensorsystem abgetastet werden. Wenn die Rotoren jedoch größer werden oder Messungen im Feld durchgeführt werden müssen, kommen andere Messsysteme zum Einsatz. Alle diese Systeme weisen jedoch systematische Messfehler auf. Das bedeutet, dass das tatsächliche Rundlaufprofil einer axialen Rotorebene vom Messergebnis deutlich abweicht. Ein wichtiger Einfluss ist die Art und Weise, wie die Rotoren während einer Rundlaufmessung abgestützt werden. Auf einer Drehmaschine kann ein Rotor beispielsweise an einem Ende in einem Spannfutter gehalten und am anderen Ende auf einer Lünette gelagert werden. Ein weiteres häufig verwendetes Lager zur Durchführung von Rundlaufmessungen ist das Prisma. Aus der Literatur [1] und [2] sind Verfahren bekannt, die mehrere Abstandssensoren zur Kompensation von Zusatzeinflüssen verwenden.

Dieser Artikel befasst sich mit dem Einfluss von Prismen auf die Rundlaufmessung. Es wird dargestellt, wie einfache Prismenlager das reale Rundlaufprofil einer axialen Rotorebene verändern und wie diese Kenntnis für verbesserte Rundlaufmessungen genutzt werden kann. Die Qualität der verbesserten Messungen ist mit der auf KMM vergleichbar, aber bei deutlich reduzierten Kosten erreicht.

2 Modell

Die folgenden Überlegungen basieren auf dem in Abbildung 1 gezeigten Modell. Der Zapfen eines Rotors ist auf einem Prisma mit einem Öffnungswinkel von 2α gelagert. Die Ausrichtung des Prismas ist symmetrisch zur vertikalen y -Koordinate. Die Ausrichtung der x -Koordinate ist horizontal. Die Winkelkoordinate ist φ und der Zapfen dreht sich mit der konstanten Winkelgeschwindigkeit $\varphi' = \omega$. Ein Messtaster oder Abstandssensor

Hofmann Mess- und Auswuchttechnik GmbH & Co. KG
Werner-von Siemens-Str. 21 • D 64319 Pfungstadt
Tel. +49 (0) 6157-949-0 • germany@hofmann-global.com • www.hofmann-global.com

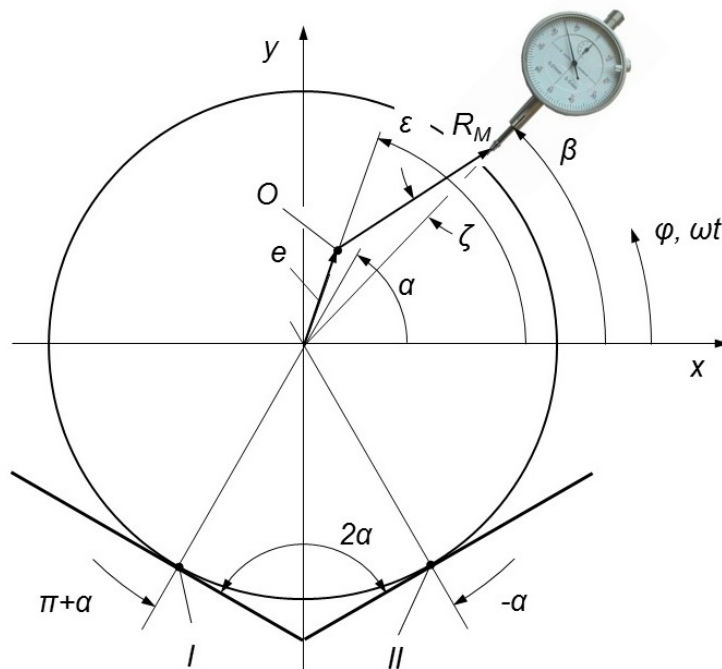


Abbildung 1: Wellenzapfen auf einem Prisma

zeigt auf die Rotoroberfläche unter dem Winkel β . I und II sind die Kontaktpunkte zwischen dem Prisma und dem Zapfen, die bei $\pi + \alpha$ bzw. $-\alpha$ liegen.

Das Rundlaufprofil eines Rotors ist ein periodisches Signal, d.h. es wiederholt sich nach einer Umdrehung. Damit kann dieses Profil in eine Fourierreihe entwickelt werden, die dann die Abweichung des Wellenradius für die einzelnen Ordnungen beschreibt. Da jedes Lager einen der Achspunkte einer Welle bestimmt, ist die Komponente erster Ordnung der Fourierreihe eines an einem Lager gemessenen Rundlaufprofils per Definition null. Daher beginnt die Reihe der Radiusabweichungen $R^{(n)}(\varphi)$ mit $n = 2$.

Der Punkt O ist der Mittelpunkt der Welle bezogen auf die Überlagerung ihres Nennradius und der Komponente erster Ordnung der Fourierreihe des Rundlaufprofils. Aufgrund des Rundlaufprofils bewegt sich der Wellenmittelpunkt mit $e(\varphi)$.

3 Messwert

Der unter dem Winkel β angeordnete Sensor zeigt einen Wert an, der vom Rundlaufprofil und der tatsächlichen Verlagerung des Zapfenmittelpunkts abhängt:

$$M(\beta, \omega t) = R(\beta - \omega t) \cdot \cos \zeta + e(\omega t) \cdot \cos(\epsilon - \beta) \quad (1)$$

Dies ist eine Projektion von R_M und e auf die Richtung mit dem Winkel β . Unter Anwendung der Sinus- und Cosinus-Additionstheoreme und der Tatsache, dass der Winkel

Hofmann Mess- und Auswuchttechnik GmbH & Co. KG

Werner-von Siemens-Str. 21 • D 64319 Pfungstadt

Tel. +49 (0) 6157-949-0 • germany@hofmann-global.com • www.hofmann-global.com

ζ sehr klein ist, kann man Gleichung (1) umschreiben:

$$\begin{aligned} M(\beta, \omega t) &= R(\beta - \omega t) + e(\omega t) \cdot (\cos \epsilon \cdot \cos \beta + \sin \epsilon \cdot \sin \beta) \\ &= R(\beta - \omega t) + e_x(\omega t) \cdot \cos \beta + e_y(\omega t) \cdot \sin \beta \end{aligned} \quad (2)$$

Befände sich der Sensor an den Kontaktpunkten *I* oder *II* bzw. an den Winkeln $\beta = \pi + \alpha$ oder $\beta = -\alpha$ wäre der Messwert null.

$$M(\pi + \alpha, \omega t) = M(-\alpha, \omega t) = 0 \quad (3)$$

Gleichung (3) kann nun verwendet werden, um die Bewegung $e(\varphi)$ des Zapfenmittelpunkts O zu eliminieren. Das Ergebnis ist:

$$e_x(\omega t) = \frac{1}{2 \cos \alpha} (R(\pi + \alpha - \omega t) - R(-\alpha - \omega t)) \quad (4)$$

$$e_y(\omega t) = \frac{1}{2 \sin \alpha} (R(\pi + \alpha - \omega t) + R(-\alpha - \omega t)) \quad (5)$$

Setzt man die Gleichungen (4) und (5) in Gleichung (2) ein, so erhält man eine Funktion für den Messwert des Sensors, die nur noch vom unbekannten Rundlaufprofil $R(\varphi)$ und den Messparametern α und β abhängt:

$$\begin{aligned} M(\omega t) &= R(\beta - \omega t) + \frac{1}{2} \left(\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} + \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \right) R(\pi + \alpha - \omega t) \\ &\quad - \frac{1}{2} \left(\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} - \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \right) R(-\alpha - \omega t) \end{aligned} \quad (6)$$

Wie bereits angeführt, ist das Rundlaufprofil eines Rotors ein periodisches Signal, das in eine Fourierreihe entwickelt werden kann. Das bedeutet:

$$\bar{R}(\varphi) = \sum_{n=2}^{\infty} (\bar{r}^{(n)} e^{in\varphi}). \quad (7)$$

$\bar{R}$ ist eine komplexe Zahl, die einen bestimmten Rundlaufwert an einem bestimmten Winkel φ darstellt. $\bar{r}^{(n)}$ ist ebenfalls eine komplexe Zahl und steht für den Betrag und Winkel der Komponente der n-ten Ordnung des Rundlaufprofils.

Wie Gleichung (7) kann auch die Messfunktion aus Gleichung (6) als Fourierreihe dargestellt werden. Die Komponente der n-ten Ordnung dieser Fourierreihe ist:

$$\begin{aligned} \bar{m}^{(n)} &= \bar{r}^{(n)} e^{in\beta} + \frac{1}{2} \left(\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} + \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \right) \bar{r}^{(n)} e^{in(\pi+\alpha)} \\ &\quad - \frac{1}{2} \left(\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} - \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \right) \bar{r}^{(n)} e^{-in\alpha} \end{aligned} \quad (8)$$

Hofmann Mess- und Auswuchttechnik GmbH & Co. KG

Werner-von Siemens-Str. 21 • D 64319 Pfungstadt

Tel. +49 (0) 6157-949-0 • germany@hofmann-global.com • www.hofmann-global.com

4 Detektionskoeffizienten

Für vorgegebene Winkel α und β kann Gleichung (8) durch $\bar{r}^{(n)}$ geteilt werden. Das Ergebnis wird als Detektionskoeffizient der n-ten Ordnung $\bar{d}^{(n)}(\beta)$ des gegebenen Messaufbaus bezeichnet:

$$\begin{aligned} \bar{d}^{(n)} = & \cos(n\beta) + \frac{1}{2}(-1)^n \left(\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} + \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \right) \cos(n\alpha) - \frac{1}{2} \left(\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} - \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \right) \cos(n\alpha) \\ & + i \left(\sin(n\beta) + \frac{1}{2}(-1)^n \left(\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} + \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \right) \sin(n\alpha) + \frac{1}{2} \left(\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} - \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \right) \sin(n\alpha) \right) \end{aligned} \quad (9)$$

Mit Hilfe von Gleichung (9) soll nun der Einfluss verschiedener Parameter β und α auf den Rundlaufmesswert untersucht werden.

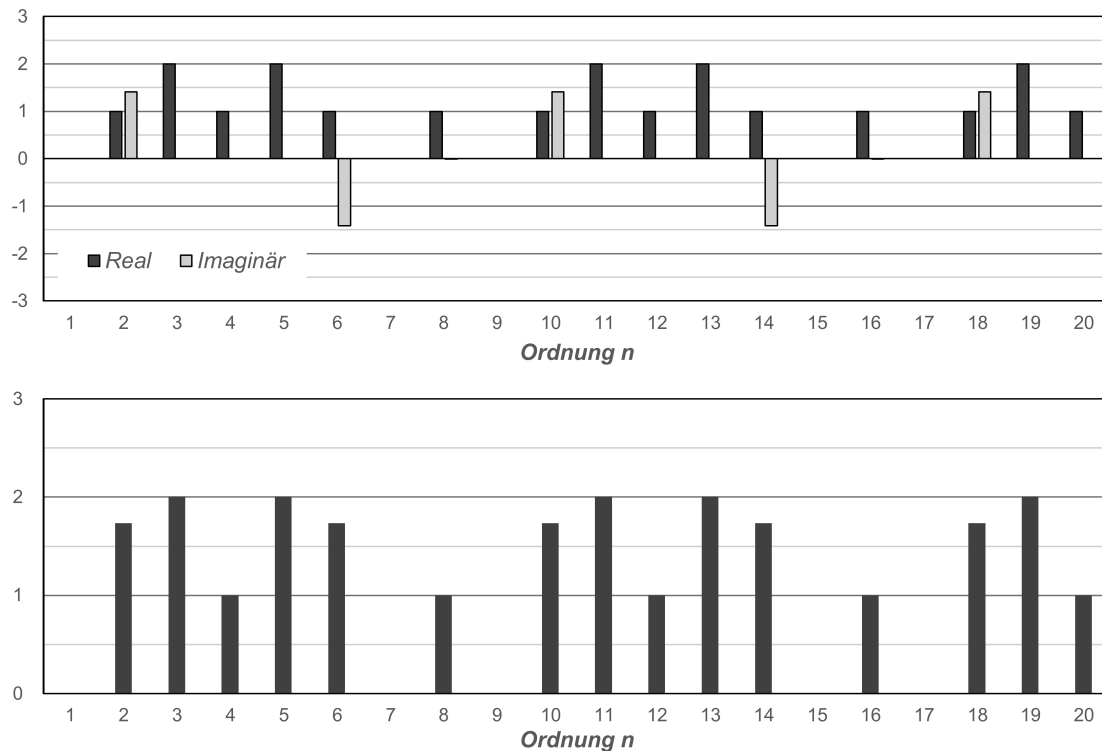


Abbildung 2: Detektionskoeffizienten für $\alpha = 45^\circ$ und $\beta = 0^\circ$ bis zur 20. Ordnung

Im oberen Diagramm der Abbildung 2 sind die Real- und Imaginärteile der Detektionskoeffizienten der ersten 20 Ordnungen für einen Zapfen auf einem Prisma mit einem Öffnungswinkel von 90° ($\alpha = 45^\circ$) und $\beta = 0^\circ$ dargestellt. Das untere Diagramm zeigt den Betrag der Koeffizienten. Die Beträge variieren mit der Ordnung bei einem maximalen Betrag von 2. Für einige Ordnungen (4, 8, 12, 16 und 20) betragen die Koeffizienten 1 und für andere Ordnungen (7, 9, 15 und 17) sind die Koeffizienten null. Für die letztgenannten Ordnungen kompensiert die Bewegung des Zapfenmittelpunkts den Rundlauf an

Hofmann Mess- und Auswuchttechnik GmbH & Co. KG

Werner-von Siemens-Str. 21 • D 64319 Pfungstadt

Tel. +49 (0) 6157-949-0 • germany@hofmann-global.com • www.hofmann-global.com

der Position des Sensors. Das heißt, wenn ein Rundlaufprofil aus Komponenten mit diesen Ordnungen besteht, können diese nicht erkannt werden, während andere Komponenten mit einer Verstärkung von 2 im Signal des Sensors enthalten sind.

Das Diagramm in Abbildung 3 zeigt die Beträge der Detektionskoeffizienten für verschiedene Messwinkel β . Es zeigt sich, dass ein Aufbau mit $\beta = 45^\circ$ der ungünstigste Fall ist. Es werden nur gerade Ordnungen erkannt, während die ungeraden Ordnungen unentdeckt bleiben. Messwinkel mit $\beta = 0^\circ$ oder 90° sind besser. Allerdings werden die Ordnungen 7, 9, 15 und 17 immer noch nicht erkannt.

Um eine günstigere Messanordnung zu finden, für die die Beträge alle Koeffizienten größer als Null sind und der kleinste Betrag in der Größenordnung von 0,5 liegt, wird β variiert. Ein guter Kompromiss wurde zum Beispiel für $\beta = 85^\circ$ gefunden. Aus dem Diagramm kann man sehen, dass dafür alle Koeffizienten von Null verschieden sind und der Betrag des kleinsten Koeffizienten etwa 0,6 ist. Ein solcher Messaufbau führt zu einem Messsignal, das die einzelnen Ordnungen mit einer hohen Erkennungsrate enthält.

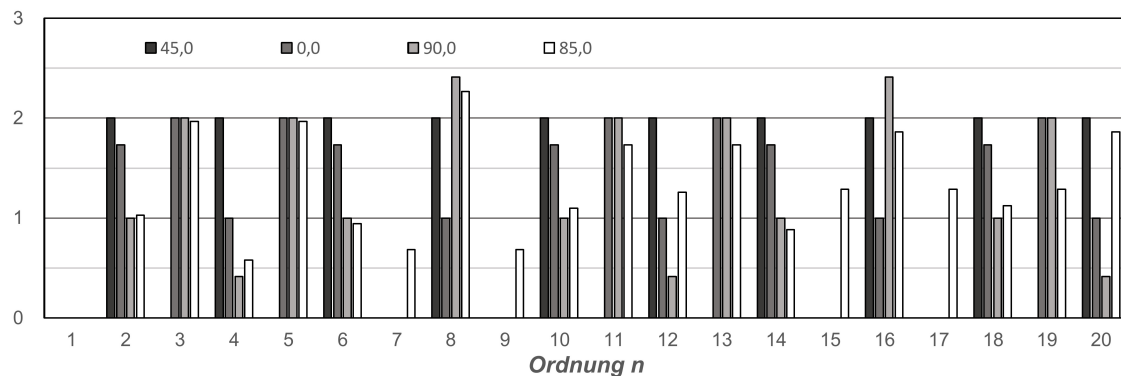


Abbildung 3: Detektionskoeffizienten für $\alpha = 45^\circ$ und verschiedenen β -Werten bis zur 20. Ordnung

Die Abbildung 4 zeigt Werte für ein Prisma mit einem Öffnungswinkel von 120° ($\alpha = 60^\circ$) und verschiedenen Messwinkeln β . Die Ergebnisse sind ähnlich wie im Fall von $\alpha = 45^\circ$. Hier wurde ein guter Kompromiss für einen Winkel $\beta = 15^\circ$ gefunden.

Die Untersuchungen in diesem Artikel decken Detektionskoeffizienten bis zu einer Größenordnung von 20 ab. Dies reicht bereits aus, um Rundlaufprofile von realen Wellen gut darzustellen, die keine Kratzer oder Riefen aufweisen.

Die Gleichungen dieses Artikels gelten auch für Rollenlager. In diesem Fall ist α der Winkel zwischen der Tangente am Nennradius des Zapfens an der Stelle des Kontaktpunkts zwischen Zapfen und Rolle und der vertikalen Richtung. Zur Messung des Rundlaufs sollten die Rollen eine relativ kleine Unrundheit aufweisen. Der maximal zulässige Rundlauf einer Rolle $R_{ro,perm}$ sollte dabei kleiner als der zu messende minimale Rundlauf R_{min} sein. Als Faustregel gilt $R_{ro,perm} < 0,1 \dots 0,2 \cdot R_{min}$.

Ein weiterer zu beachtender Sachverhalt ist das Verhältnis zwischen den Radien des Zapfens und der Rollen. Falls dieses Verhältnis keine natürliche Zahl ist, würde es ausreichen, die erfassten Messwerte über mehrere Umdrehungen des Zapfens zu mitteln, um

Hofmann Mess- und Auswuchttechnik GmbH & Co. KG

Werner-von Siemens-Str. 21 • D 64319 Pfungstadt

Tel. +49 (0) 6157-949-0 • germany@hofmann-global.com • www.hofmann-global.com

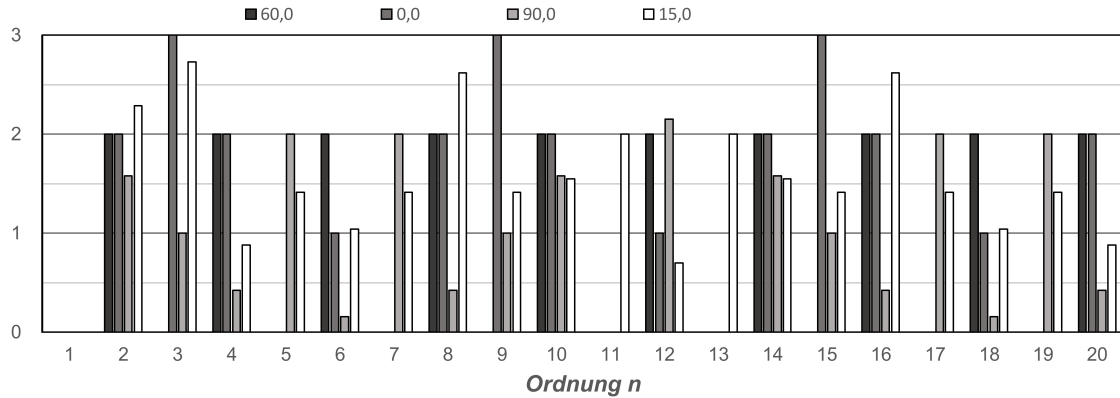


Abbildung 4: Detektionskoeffizienten für $\alpha = 60^\circ$ und verschiedenen β -Werten bis zur 20. Ordnung

den Einfluss des Rollenschlags zu eliminieren.

Bei Rundlaufmessungen an Wellen mit einem erheblichen statischen Durchhang und einer anisotropen Biegesteifigkeit wird empfohlen, den Sensor eher horizontal anzuordnen. Andernfalls würde die anisotrope Biegesteifigkeit eine scheinbare Unrundheit zweiter Ordnung erzeugen, die sich aus dem Drehwinkel abhängigen Wellendurchhang aufgrund der unterschiedlichen Biegesteifigkeiten ergibt.

5 Neues Rundlauf-Messprinzip

Die obigen Überlegungen können auf Rundlaufmessungen für Wellen auf Prismen (oder Rollenlagern) angewendet werden, um das wahre Rundlaufprofil mit nur einem Abstandssensor oder Taster zu messen. Das Verfahren wird auch als Drei-Punkt-Methode bezeichnet, weil man drei Messwerte gleichzeitig verarbeitet - den des Sensors und die beiden anderen an den Kontaktpunkten I und II , wo die Messwerte null sind.

Nach der Erfassung der Messdaten mit einer gegebenen Messanordnung (definiert durch die Winkel α und β) wird zunächst eine Ordnungsanalyse durchgeführt. Dann werden die Detektionskoeffizienten bis zu einer maximalen Ordnung der Ordnungsanalyse berechnet. Schließlich wird die Messwertkomponente der n -ten Ordnung durch den Detektionskoeffizienten der n -ten Ordnung geteilt, um die wahre Rundlaufkomponente der n -ten Ordnung für die zu untersuchende Welle zu erhalten:

$$\bar{r}^{(n)} = \frac{\bar{m}^{(n)}}{\bar{d}^{(n)}} \quad (10)$$

Das tatsächliche Rundlaufprofil wird schließlich durch die Überlagerung der Komponenten für die einzelnen Ordnungen bis zur betrachteten max. Ordnung n_{max} erhalten:

$$\bar{R}(\varphi) = \sum_{n=2}^{n_{max}} (\bar{r}^{(n)} e^{in\varphi}) \quad (11)$$

Hofmann Mess- und Auswuchttechnik GmbH & Co. KG
Werner-von Siemens-Str. 21 • D 64319 Pfungstadt

Tel. +49 (0) 6157-949-0 • germany@hofmann-global.com • www.hofmann-global.com

Mit der Kenntnis des Rundlaufprofils kann mit Hilfe der Gleichungen (4) und (5) die Bewegung des Zapfenmittelpunkts auf der Lagerstelle berechnet werden. Die Komponente der n-ten Ordnung ergibt sich zu:

$$\bar{e}_x^{(n)} = \bar{r}^{(n)} \left(\frac{1}{2 \cos \alpha} (e^{in(\pi+\alpha)} - e^{-(in\alpha)}) \right) \quad (12)$$

$$\bar{e}_y^{(n)} = \bar{r}^{(n)} \left(\frac{1}{2 \sin \alpha} (e^{in(\pi+\alpha)} + e^{-(in\alpha)}) \right) \quad (13)$$

Die Wellenbewegung zu kennen, ist unabdingbar, wenn das tatsächliche Rundlaufprofil von Wellenabschnitten gemessen werden soll, die direkt neben einer Lagerstelle liegen. In diesem Fall wird Gleichung (2) verwendet, um diese Bewegung zu kompensieren. Für eine bestimmte Ordnung ergibt sich

$$\bar{p}^{(n)} = (\bar{s}^{(n)} - \bar{e}_x^{(n)} \cos \beta - \bar{e}_y^{(n)} \sin \beta) e^{-(in\beta)}, \quad (14)$$

mit p dem Messwert und s der Komponente des Rundlaufprofils des anderen Wellenabschnitts.

Bei Rundlaufmessungen an längeren Wellen, die an zwei Lagerstellen abgestützt sind (Prismen oder Rollenlager), können die Bewegungen der Wellenzapfen an diesen Lagerstellen benutzt werden, um die Bewegung der Welle an beliebigen anderen axialen Wellenabschnitten zu berechnen. Dabei wird allerdings vorausgesetzt, dass die Welle sich wie ein starrer Körper verhält.

6 Nachweis durch Praktische Messungen

Um das hier beschriebene Rundlaufmessverfahren zu überprüfen und seine Praxistauglichkeit nachzuweisen, wurden Messungen an einer Modellwelle durchgeführt, die auf Prismen gelagert ist (siehe Abbildung 5).

Die Modellwelle wurde aus einer durchgehenden Welle mit einem Nenndurchmesser von 80 mm gefertigt und ist 300 mm lang. Sie ist auf Böcken mit austauschbaren Prismen gelagert und wird an einem Ende durch einen elektrischen Antrieb mit einer konstanten Drehzahl von ca. 2,0 1/min angetrieben. Am anderen Ende befinden sich drei Wellenabschnitte (an den Axialkoordinaten $z = 10 \text{ mm}$, 30 mm und 50 mm), in die durch Präzisionsschleifen ein überhöhtes Rundlaufprofil eingebracht wurde. Diese Profile zeigen hauptsächlich eine zweite, dritte und vierte Ordnung des Rundlaufs.

Die Abbildungen 6 und 7 zeigen Rundläufe (Polardiagramm und Ordnungsanalyse) gemessen auf einer KMM mit vertikaler Wellenanordnung für die axialen Ebenen mit überhöhtem Rundlauf und an zwei weiteren axialen Positionen (bei $z = 85 \text{ mm}$ bzw. 265 mm), wo die Welle praktisch zylindrisch ist. Während der übertriebene Rundlauf etwa $20 \mu\text{m}$ beträgt, weisen die zylindrischen Wellensegmente einen Rundlauf von weniger als etwa 10 % dieses Wertes auf.

Dann wurden Messungen mit der auf Prismen gelagerten Welle durchgeführt (ähnlich Abbildung 5). Dabei ist der Öffnungswinkel der Prismen 120° ($\alpha = 60^\circ$). Die Lagerstellen befinden sich bei $z = 85 \text{ mm}$ und 265 mm . Der taktile Messsensor ist unter einem Winkel

Hofmann Mess- und Auswuchttechnik GmbH & Co. KG

Werner-von Siemens-Str. 21 • D 64319 Pfungstadt

Tel. +49 (0) 6157-949-0 • germany@hofmann-global.com • www.hofmann-global.com

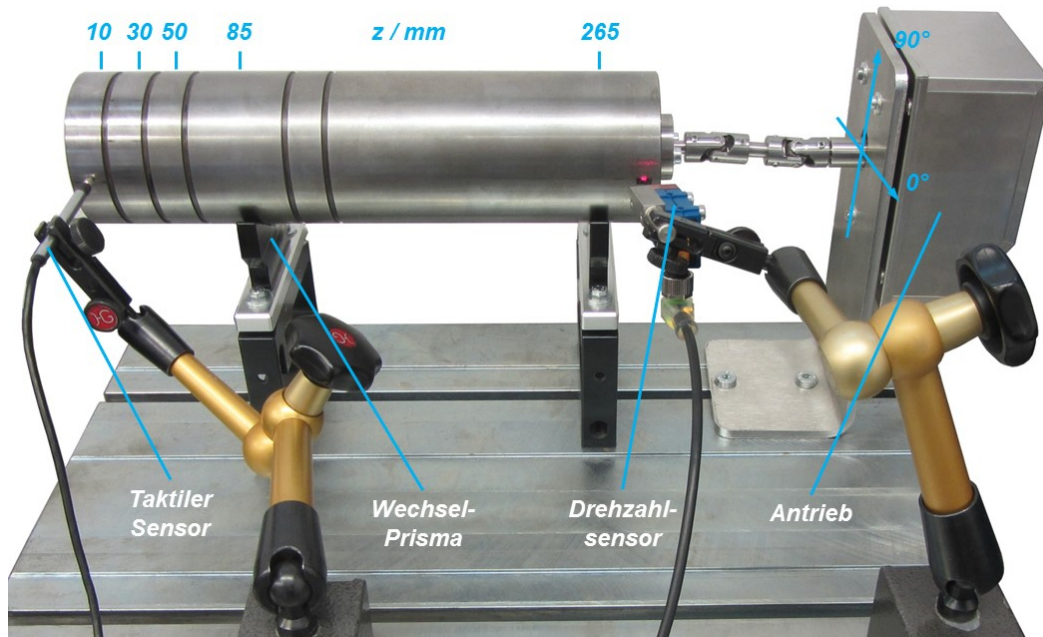


Abbildung 5: Anordnung der Modellwelle auf Prismenlagern

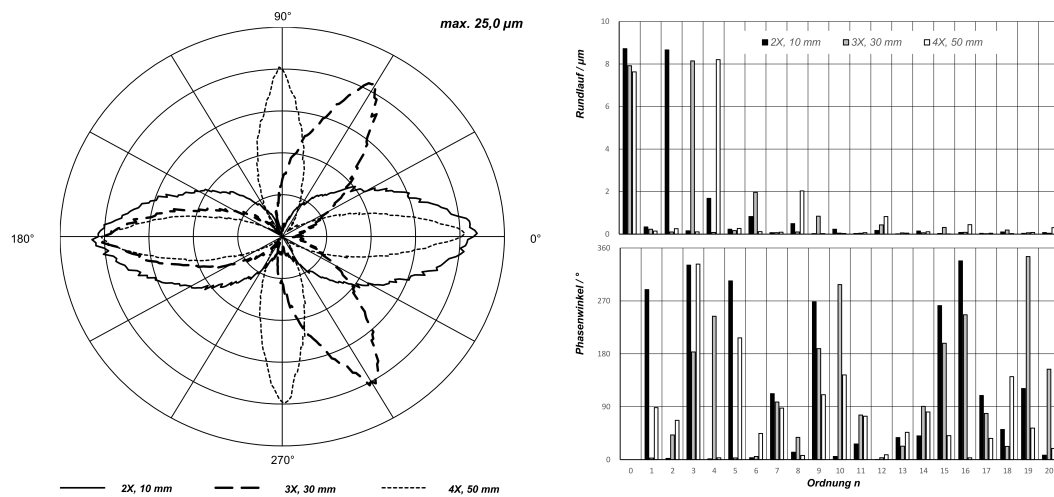


Abbildung 6: Rundlaufprofile der Modellwelle gemessen auf einer KMM
an den Axialpositionen $z = 10 \text{ mm}$, 30 mm und 50 mm

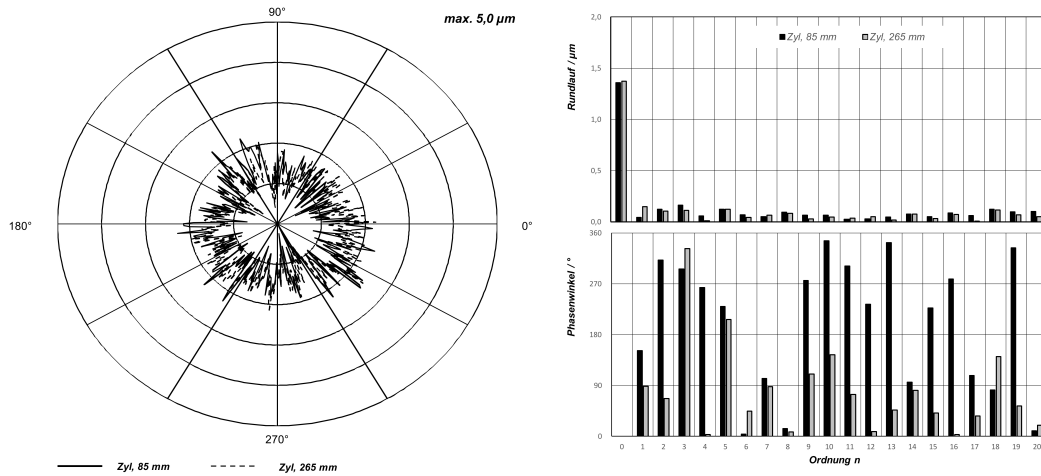


Abbildung 7: Rundlaufprofile der Modellwelle gemessen auf einer KMM an den Axialpositionen $z = 85 \text{ mm}$ und 265 mm

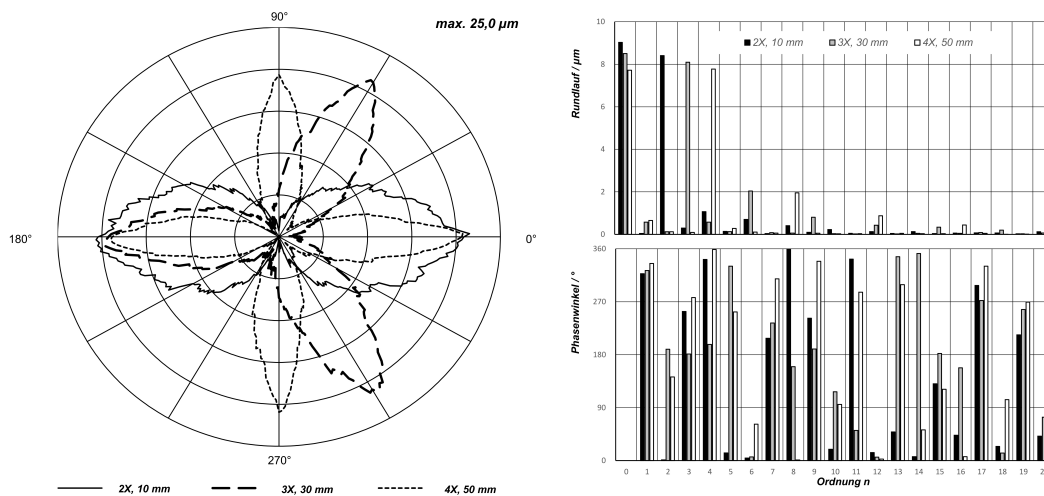


Abbildung 8: Rundlaufprofile der Modellwelle gemessen auf Prismen mit $\alpha = 60^\circ$, $\beta = 0^\circ$ an Axialpositionen $z = 10 \text{ mm}$, 30 mm und 50 mm , gelagert bei $z = 85 \text{ mm}$ und 265 mm

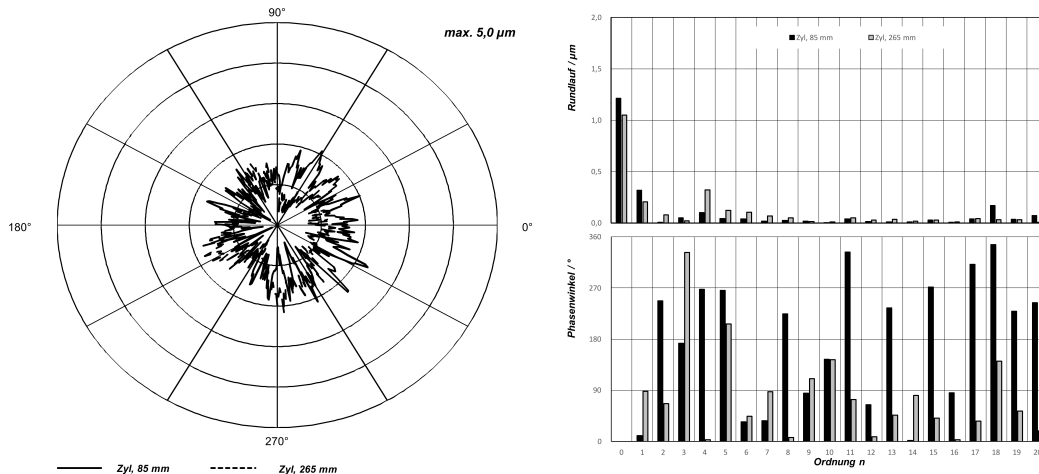


Abbildung 9: Rundlaufprofile der Modellwelle gemessen auf Prismen mit $\alpha = 60^\circ$, $\beta = 0^\circ$ an Axialpositionen $z = 85 \text{ mm}$ und 265 mm , gelagert bei $z = 85 \text{ mm}$ and 265 mm

von $\beta = 0^\circ$ angeordnet. Das Polardiagramm in den Abbildungen 8 und 9 zeigt die Ergebnisse, die gut mit denen von der KMM übereinstimmen. Der Grund dafür ist, dass der Rundlauf an den Lagerstellen weniger als 10 % des Rundlaufs an den drei Ebenen mit überhöhtem Rundlauf beträgt. Damit kommt es zu fast keiner Bewegung der Wellenachse an den Lagerstellen, die das Rundlaufprofil verzerren könnte.

Bei den nächsten Messungen wurde die Modellwelle bei $z = 30 \text{ mm}$ (überhöhter Rundlauf dritter Ordnung) bzw. 265 mm (zylindrisch) auf 90° -Prismen ($\alpha = 45^\circ$) abgestützt. Die Diagramme der Abbildungen 10 und 11 zeigen nun für verschiedene Messwinkel β , wie das tatsächliche Rundlaufprofil der Welle bei $z = 30 \text{ mm}$ durch die vom Rundlauf selbst verursachte Bewegung der Wellenachse auf dem Prisma verzerrt wird. Die Diagramme enthalten die polare Darstellung des Rundlaufprofils, die Bewegung der Wellenachse, die Ordnungsanalyse und die Detektionskoeffizienten (für die ersten 20 Ordnungen). Schließlich wird auch das durch die Detektionskoeffizienten kompensierte Rundlaufprofil dargestellt, das gut mit den Messungen auf der KMM und mit der auf zylindrischen Zapfen gelagerten Welle übereinstimmt.

Bei einem Messwinkel $\beta = 45^\circ$ kann das tatsächliche Rundlaufprofil jedoch nicht gemessen werden (Abbildung 12). Das liegt daran, dass die Detektionskoeffizienten aller ungeraden Ordnungen für ein Prisma mit 90° ($\alpha = 45^\circ$) und einem Messwinkel von $\beta = 45^\circ$ null sind (siehe auch Abbildung 2). In diesem Fall können nur die geraden Ordnungen des Rundlaufs ausgewertet werden, was für die Ordnungen 6 und 12 auch funktioniert.

Schließlich wurde die Modellwelle wieder auf 120° -Prismen ($\alpha = 60^\circ$) bei $z = 30 \text{ mm}$ (überhöhter Rundlauf dritter Ordnung) bzw. 265 mm (hauptsächlich zylindrisch) mit dem taktilen Messsensor bei $\beta = 0^\circ$ abgestützt. Zunächst wurden die Rundlaufprofile an den Auflagerstellen gemessen und mit den Detektionskoeffizienten der Dreipunktme-

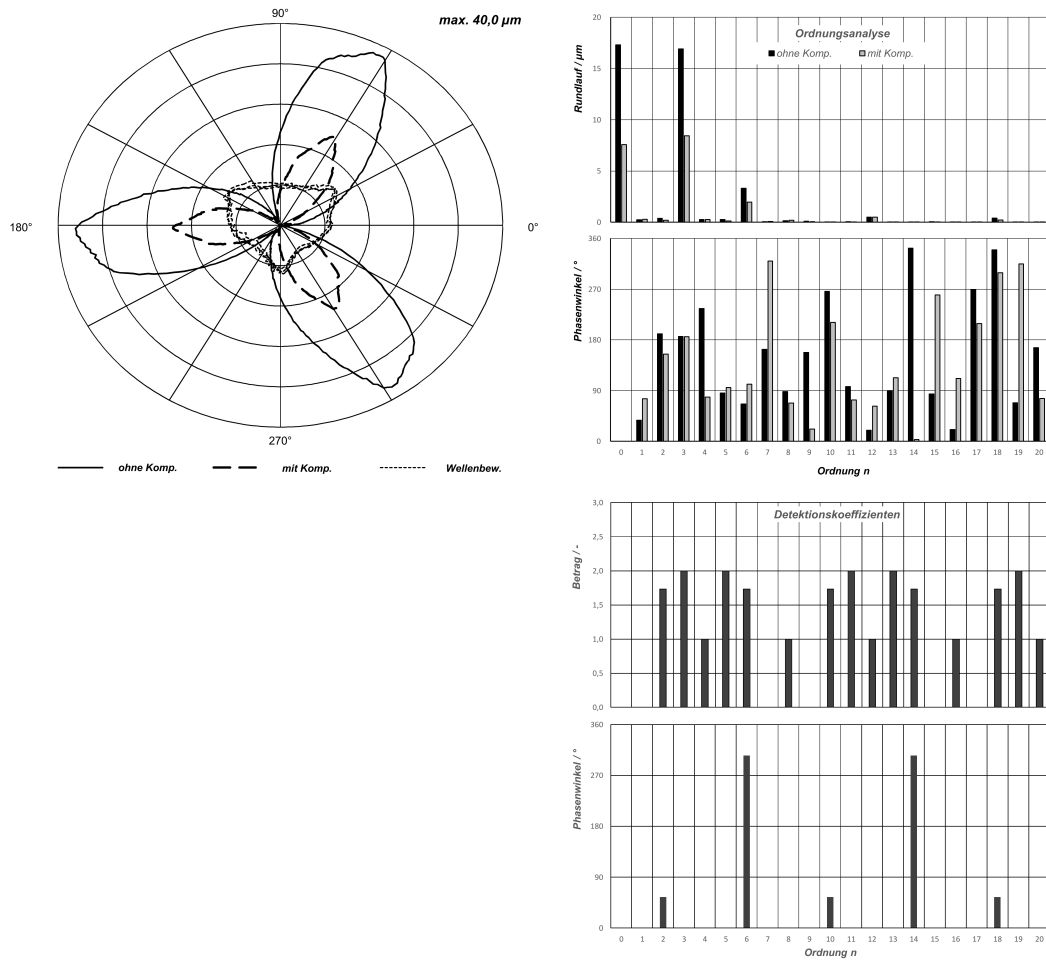


Abbildung 10: Direkte und kompensierte Rundlaufprofile und Zapfenbewegung für $z = 30 \text{ mm}$, Lagerung bei $z = 30$ und 265 mm , $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 0^\circ$

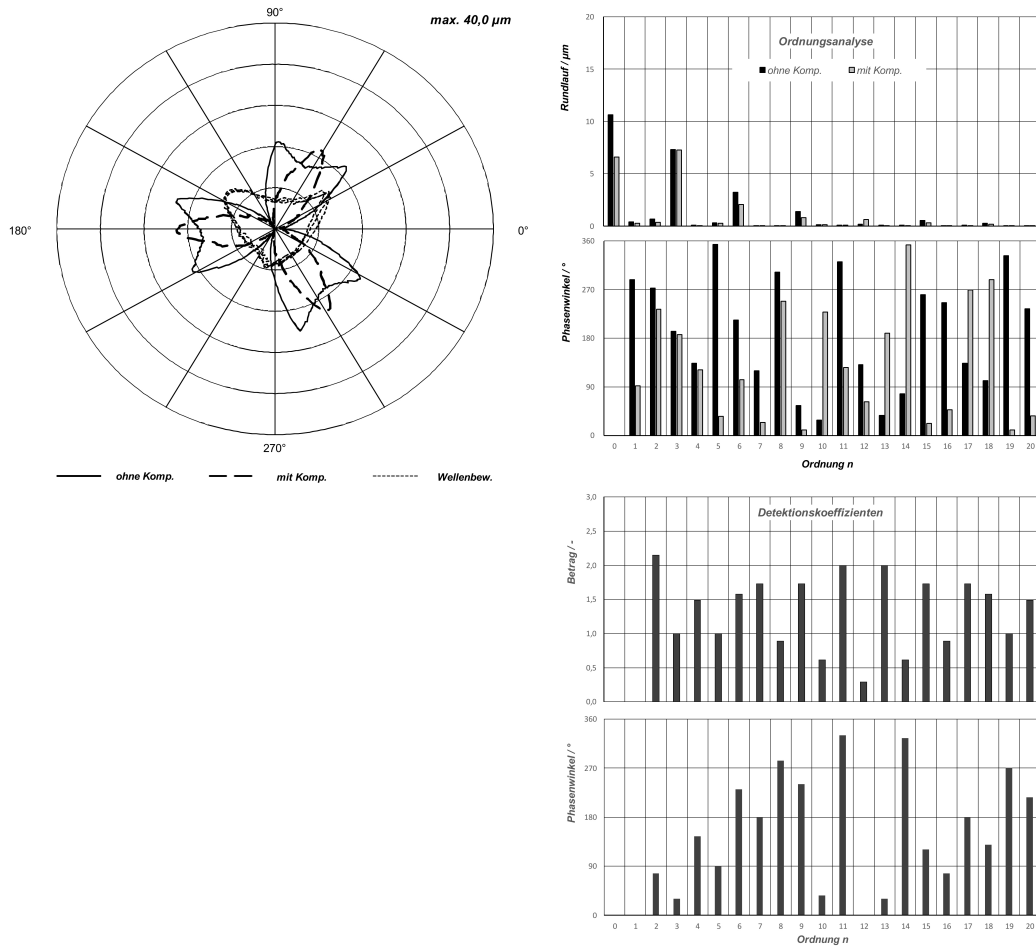


Abbildung 11: Direkte und kompensierte Rundlaufprofile und Zapfenbewegung für $z = 30 \text{ mm}$, Lagerung bei $z = 30$ und 265 mm , $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 30^\circ$

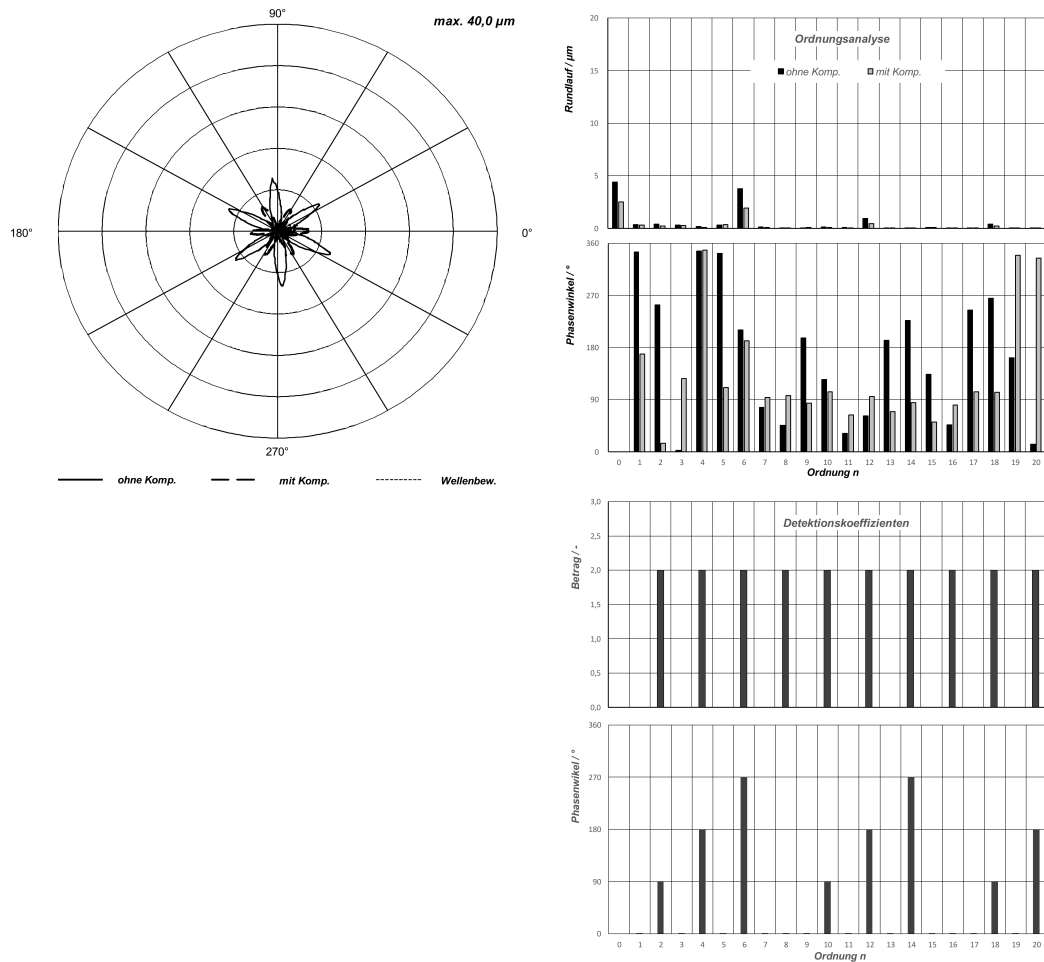


Abbildung 12: Direkte und kompensierte Rundlaufprofile und Zapfenbewegung für $z = 30 \text{ mm}$, Lagerung bei $z = 30$ und 265 mm , $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 45^\circ$

thode kompensiert. Dann wurden die überhöhten Rundläufe mit hauptsächlich zweiter Ordnung bei $z = 10 \text{ mm}$ und vierter Ordnung bei $z = 50 \text{ mm}$ gemessen. Es zeigt sich eine deutliche Verzerrung der Rundlaufprofile durch die Wellenbewegung auf den Prismen (Bild 13). Um die Wellenbewegung zu kompensieren, wird angenommen, dass die Wellenachse eine gerade Linie bildet. Dann können die an den Lagerstellen ausgewerteten Wellenbewegungen zur Berechnung der radialen Wellenbewegung für beliebige andere axiale Positionen linear umgerechnet werden. Wird dies auf die für $z = 10 \text{ mm}$ und $z = 50 \text{ mm}$ gemessenen Rundläufe angewendet, ergeben sich praktisch die tatsächlichen Rundlaufprofile, wie sie auf der KMM gemessen wurden.

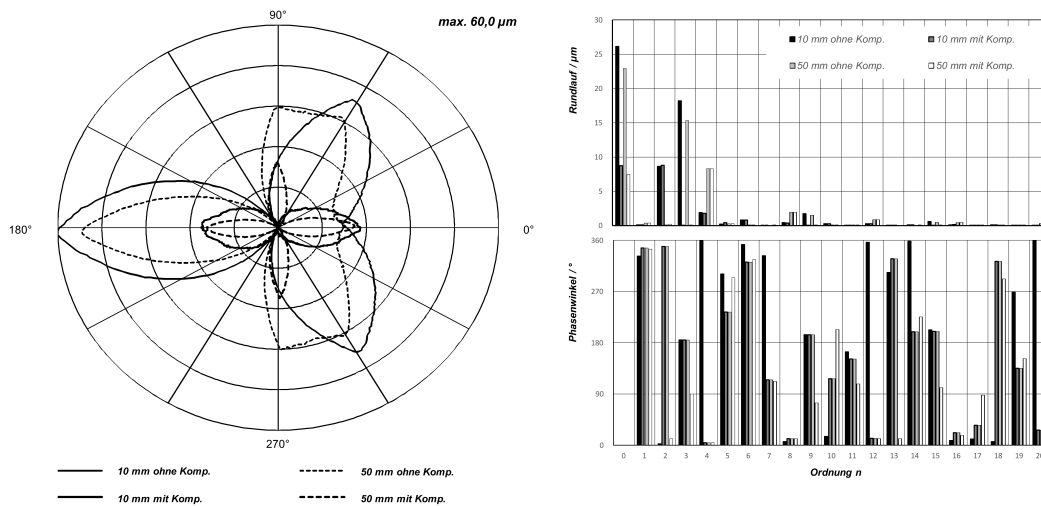


Abbildung 13: Direkte und kompensierte Rundlaufprofile für $z = 10$ und 50 mm , Lagerung bei $z = 30$ und 265 mm , $\alpha = 60^\circ$, $\beta = 0^\circ$

7 Zusammenfassung

Mit diesem Artikel wurde ein Rundlaufmessverfahren vorgestellt, das eine Messfehlerkompensation durchführt. Die an einem Wellenzapfen, der auf einem Prismenlager oder Rollenlager abgestützt ist, mit einem einzigen Sensor erfassten Rohmesswerte stellen nicht das wahre Rundlaufprofil dar. Dies liegt daran, dass die Bewegung der Wellenachse Teil des Messsignals ist. Die Überlegungen basieren auf der Tatsache, dass ein Rundlaufprofil ein periodisches Signal ist und in eine Fourierreihe entwickelt werden kann. Für einen gegebenen Messaufbau (Öffnungswinkel der Kontaktpunkte und Messwinkel) gibt es Detektionskoeffizienten, die das wahre Rundlaufprofil zu einem Messsignal verändern. Diese Detektionskoeffizienten können zur Kompensation der Bewegung der Zapfenachse verwendet werden. Darüber hinaus ergeben diese Koeffizienten, welche Ordnung eines Rundlaufprofils mit einem gegebenen Messaufbau erfasst werden kann.

Hofmann Mess- und Auswuchttechnik GmbH & Co. KG
Werner-von Siemens-Str. 21 • D 64319 Pfungstadt

Tel. +49 (0) 6157-949-0 • germany@hofmann-global.com • www.hofmann-global.com

Sobald das wahre Rundlaufprofil bestimmt wurde, kann auch die Bewegung der Wellenachse berechnet werden. Dies ist nützlich, wenn Rundlaufmessungen an anderen axialen Wellenabschnitten durchgeführt werden sollen, wo keine definierte Lagerung vorhanden ist.

Zum Schluss wurde die beschriebene Methode anhand von Rundlaufmessungen an einer Modellwelle auf Prismenlagern validiert.

Das neue Rundlaufmessverfahren ist mit dem portablen Rundlaufprüfsystem RO 7000 und den stationären Rundlaufprüfmaschinen Typ UHR von Hofmann erhältlich.

Literatur

- [1] S. Adamczak, D. Janecki und K. Stepień. "Cylindricity measurement by the V-block method – theoretical and practical problems". In: *Measurement* 44.1 (2011), S. 164–173.
- [2] B. Muralikrishnana u. a. "A note on the three-point method for roundness measurement". In: *Precision Engineering* 29 (2005), S. 257–260.