

Messunsicherheitsuntersuchungen zur nichtinkrementellen Formmessung von rotierenden Objekten

M. Schuster¹, R. Kuschmierz¹, A. Fischer¹, J. Czarske¹

¹Technische Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik; Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik, Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik; Helmholtzstr. 18, D-01069 Dresden; Tel.-Nr. +49 351 463-36192 ,

E-Mail: Micha_Sebastian.Schuster@tu-dresden.de, Robert.Kuschmierz@tu-dresden.de

Zusammenfassung

Zur in-situ Formvermessung schnell rotierender Werkstücke, wie sie beispielsweise bei einem Drehprozess in Werkzeugmaschinen vorliegen, sind Lasermesssysteme prädestiniert. Die meisten dieser Messsysteme beruhen dabei einzig auf einer Messung des Abstands zwischen Messobjekt und Sensor. Um daraus den Radius des Messobjekts bestimmen zu können, muss der Abstand zwischen Sensor und Rotationsachse des Messobjekts bekannt sein. Andernfalls wirkt sich eine Änderung dieses Abstands, die z.B. durch eine Änderung der Umgebungstemperatur hervorgerufen werden kann, direkt auf das Messergebnis aus und verursacht systematische Messabweichungen.

Um eine Messung des Radius unabhängig vom Arbeitsabstand zu durchzuführen, kann der Werkstückradius aus einer Messung der Oberflächengeschwindigkeit des rotierenden Messobjekts abgeleitet werden. Der phasenauswertende Laser-Doppler-Distanzsensor (P-LDDS) ermöglicht eine gleichzeitige, zeitaufgelöste Messung der Oberflächengeschwindigkeit und der Position. Somit ist der P-LDDS in der Lage, den mittleren Radius des Messobjekts und dessen örtliche Änderung unabhängig vom Arbeitsabstand zu bestimmen. Um den Temperatureinfluss auf die Formmessunsicherheit des P-LDDS zu quantifizieren, wird eine Messunsicherheitsbetrachtung nach GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) unter Berücksichtigung zufälliger und systematischer Messabweichungen durchgeführt.

Im Ergebnis wird gezeigt, dass der P-LDDS durch die gleichzeitige Positions- und Geschwindigkeitsmessung in der Lage ist, die drei dimensionale Form schnell rotierender Objekte mit sub-mikrometer Unsicherheit zu bestimmen. Die systematische Messabweichung des absoluten Radius auf Grund der Temperatur beträgt dabei lediglich 200 nm/K. Der P-LDDS ist somit nicht auf klimatisierte Messräume angewiesen, was einen Einsatz direkt im Fertigungsbetrieb (in-situ, in-process) erlaubt.

Keywords: absolute Form, Messunsicherheit, in-situ Messung

Stand der Technik

Derzeit wird in der Prozessmesstechnik eine Vielzahl verschiedener Messsysteme eingesetzt, um die Qualität gefertigter Werkstücke zu überprüfen. Für die Messung der absoluten Form gelten Koordinatenmessgeräte (KMG) als Goldstandard und können Messabweichungen im Sub-Mikrometerbereich erzielen. Für die Vermessung schnell rotierender Werkstücke sind sie auf Grund ihres taktilen Messprinzips ungeeignet. Daher lassen sie sich nicht zur in-situ Formmessung zum Beispiel in Drehmaschinen einsetzen.

Für dieses Einsatzfeld zeigen sich optische Sensoren als prädestiniert. In der industriellen Anwendung befinden sich zur Formmessung meist abstandsmessende Sensoren, wie etwa Lasertriangulation, oder chromatisch konfokale Sensoren, mit denen eine Auflösung der Position bis in den Mikrometerbereich erreicht werden kann. Maßgeblicher Nachteil bei diesen Messverfahren ist jedoch, dass zur Bestimmung der absoluten Form rotierender Werkstücke der Abstand zwischen dem Sensor und der Rotationsachse des Werkstücks genau bekannt sein muss und eine Änderung dieses Abstandes, z.B. durch Temperaturschwankungen, sich direkt auf die gemessene Form auswirken.

Im Gegensatz zu konventionellen optischen Distanzsensoren erlaubt der phasenauswertende Laser-Doppler-Distanzsensor (P-LDDS) [1] eine absolute Formmessung rotierender Objekte. Die absolute Formmessung wird dabei durch eine gleichzeitige Messung der tangentialen Oberflächengeschwindigkeit und der Distanz erreicht. Dadurch wird das Messergebnis unabhängig von Arbeitsabstand des Sensors. Zusätzlich lässt sich der Sensor einfach in eine Drehmaschine integrieren, da er nur einen Schlüsselbohrzugang benötigt.

Ziel und Gliederung des Beitrages

Ziel dieses Beitrages ist es, die zufälligen und vor allem temperaturbedingten systematischen Messabweichungen des P-LDD Sensors analytisch wie experimentell zu charakterisieren und deren Einfluss auf die Gesamtmessunsicherheit der Form zu bestimmen. Dazu wird zunächst die Idee der Formmessung aus gleichzeitiger Geschwindigkeits- und Distanzmessung dargestellt. Anschließend wird das Messprinzip des Sensors beschrieben, was es ermöglicht, die beiden letztgenannten Größen zeitgleich zu ermitteln. Im darauffolgenden Abschnitt werden die Messabweichungen der einzelnen Messgrößen und deren Einfluss auf die Gesamtmessunsicherheit analytisch betrachtet und experimentell ermittelt. Abschließend wird

der Einsatz des P-LDD Sensors zu in-situ, 3D Formmessung in einer Werkzeugmaschine vorgestellt.

Absolute Formmessung

Zunächst soll das Prinzip der Formmessung aus gleichzeitiger Abstands- und Geschwindigkeitsmessung erläutert werden. Zur Vereinfachung wird dazu die zweidimensionale Form eines gedrehten Werkstücks betrachtet. Die Form lässt sich in Polarkoordinaten über den Drehwinkel α abhängigen Radius

$$r(\alpha) = R - \tilde{r}(\alpha) \quad (1)$$

beschreiben und setzt sich aus dem mittleren Radius $R = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} r(\alpha) d\alpha$ und der drehwinkelabhängigen Radiusabweichung $\tilde{r}(\alpha) = R - r(\alpha)$ zusammen. Entsprechend genügt die Messung von R und $\tilde{r}(\alpha)$ zur Bestimmung der absoluten Form.

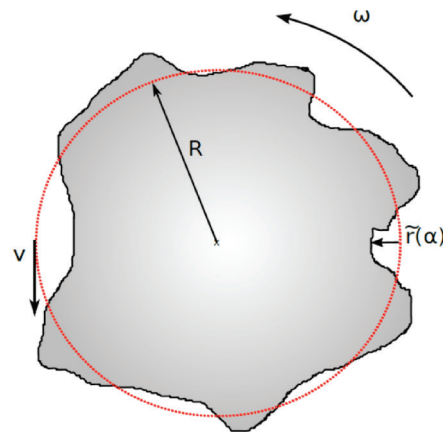


Abb. 1: Modell eines Werkstücks mit stark verstärkten Gestaltabweichungen.

Messtechnisch lässt sich der mittlere Radius aus der mittleren Oberflächengeschwindigkeit \bar{v} und der Kreisfrequenz des rotierenden Messobjekts ω ermitteln zu

$$R = \frac{U}{2\pi} = \frac{\bar{v}}{\omega}. \quad (2)$$

Die Radiusänderung $\tilde{r}(\alpha)$ entspricht dem Wechselanteil des gemessenen Abstandes

$$\tilde{r}(\alpha) = -\tilde{z}(\alpha) = z(\alpha) - \bar{z}. \quad (3)$$

Sensorprinzip des P-LDDS

Das Messprinzip des P-LDD Sensors lässt sich als Kombination zweier, gegeneinander verkippter Laser Surface Velocimeter (LSV) verstehen [2]. Bei LSVs werden zwei Laserstrahlen auf der Oberfläche des Messobjekts zur Interferenz gebracht, wodurch sich ein Interferenzstreifenmuster mit dem Streifenabstand d ergibt. Bewegt sich nun ein gegenüber dem Streifenabstand kleines

Streuzentrum durch dieses Streifenmuster, so ist das gestreute Licht amplitudenmoduliert. Die Modulationsfrequenz f_d (Dopplerfrequenz) ist dabei proportional zur Geschwindigkeitskomponente v senkrecht zur Streifenrichtung. Für die zu messende Geschwindigkeit folgt

$$v = d \cdot f_d. \quad (4)$$

Als Streuzentren dienen markante Bereiche des Specklemusters, welches entsteht, wenn eine optisch raue Oberfläche mit kohärentem Licht beleuchtet wird [3]. Zur Bestimmung der Position wird ein zweites Strahlpaar so überlagert, dass ein gegenüber dem ersten leicht verkipptes Interferenzstreifensystem entsteht. Dies führt zu einem positionsabhängigen, lateralen Versatz der Streifensysteme und äußert sich in einer positionsabhängigen Phasendifferenz der Streulichtsignale. Aus dem Phasenversatz der Streulichtsignale lässt sich entsprechend die Position bestimmen.

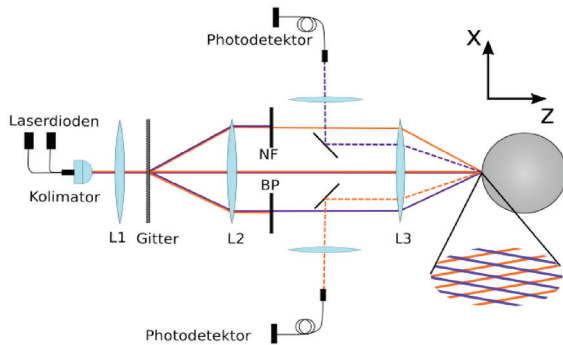


Abb. 2 Schematischer Sensoraufbau und Interferenzstreifenmuster.

In Abb. 2 ist der Sensoraufbau schematisch dargestellt. Zur Unterscheidung der beiden Streulichtsignale werden zwei Strahlpaare leicht unterschiedlicher Wellenlänge verwendet (Wellenlängenmultiplex WDM). Dazu wird Licht zweier fasergekoppelter Laserdioden kollimiert (L1) und auf ein optisches Gitter fokussiert. Die $\pm 1.$ und $0.$ Beugungsordnung werden anschließend durch ein Keplerteleskop (L2, L3) auf der Oberfläche des Messobjekts so überlagert, dass zwei gegeneinander verkippte Interferenzstreifensysteme entstehen. Nicht benötigte Beugungsordnungen werden mit schmalbandigen Filtern geblockt. Positions- und wellenlängenabhängige Wellenfrontverzerrungen der Sendestrahlen resultieren in einer Streifenabstandsdivergenz der beiden Streifensysteme [4]. Zur Minimierung dieser Streifenabstandsdivergenz werden die Laserstrahlpaare vor das Messvolumen fokussiert. Dies führt zu divergenten Streifensystemen mit dem distanzabhängigen Streifenabstand:

$$d(z) = d_0 + a \cdot z. \quad (5)$$

Und dem Phasenversatz

$$\varphi(z) = \varphi_0 + s_0 \cdot z - \frac{s_0 \cdot a}{d_0} \cdot z^2 \quad (6)$$

Mit dem Streifenabstand in der Messvolumenmitte $d_0 = d(z = 0)$, der mittleren ortsabhängigen Änderung $a = \frac{\partial d}{\partial z}$ des Streifenabstandes sowie dem mittleren Phasenanstieg $s_0 = \frac{\partial \varphi}{\partial z}$ und der Phasendifferenz $\varphi_0 = \varphi(z = 0)$ in der Messvolumenmitte. Die Position ergibt sich dementsprechend zu

$$z(\varphi) = \frac{d_0}{2a} + \sqrt{\left(\frac{d_0}{2a}\right)^2 + \frac{\varphi_0 - \varphi}{s_0 \cdot a} \cdot d_0}. \quad (7)$$

Der P-LDD Sensor ist also in der Lage sowohl die Position als auch die Geschwindigkeit eines bewegten Werkstücks zu messen, was es ermöglicht dessen absolute Form zu bestimmen.

Distanz und Geschwindigkeitsunsicherheit

Um die Gesamtmessunsicherheit für die Formmessung mit dem P-LDD Sensor abzuschätzen, werden zunächst die Unsicherheiten der Positions- und Geschwindigkeitsmessung betrachtet.

Dabei ist zwischen Messunsicherheiten auf Grund zufälliger Abweichungen verursacht durch Rauschen und Speckle und auf Grund systematischer Abweichungen verursacht durch temperaturbedingte Verschiebungen der Kalibrierfunktion zu unterscheiden.

Zufällige Messabweichungen des P-LDD Sensors wurden eingehend untersucht [5]. Für die Distanzmessung betragen sie typischerweise $\sigma_z \approx 300$ nm und können durch Mehrfachmessung oder laterale Mittelung reduziert werden.

Bisher unbekannt ist die Messunsicherheit Δz auf Grund systematischer Messabweichungen. Systematische Messabweichungen entstehen durch Verschiebung der Kalibrierfunktionen des Messsystems, die beispielsweise durch Veränderungen der Sensorgeometrie auf Grund thermischer Ausdehnung entstehen und können im Gegensatz zu zufälligen Messabweichungen durch Mehrfachmessung und Mittelung nicht reduziert werden. Die systematischen Messabweichungen der Position Δz ergeben sich mit $\vec{p} = (\varphi_0, s_0, d_0, a)^T$ als Vektor der Kalibrierparameter zu

$$\Delta z^2 = \sum \left(\frac{\partial z}{\partial p_i} \Delta p_i \right)^2 \approx \left(z \frac{a}{d_0} \frac{\Delta d_0}{d_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \varphi_0}{s_0} \right)^2 + \left(z^2 \frac{\Delta a}{d_0} \right)^2 + \left(z \frac{\Delta s_0}{s_0} \right)^2. \quad (8)$$

Um Δz bestimmen zu können, wurden die Abweichungen Δp_i einzeln experimentell ermittelt. Sie zeigten jeweils annähernd eine

lineare Abhängigkeit von der Änderung der Umgebungstemperatur ΔT . Ihr jeweiliger theoretischer Einfluss auf die Positionsmessung ist in Abb. 3 dargestellt.

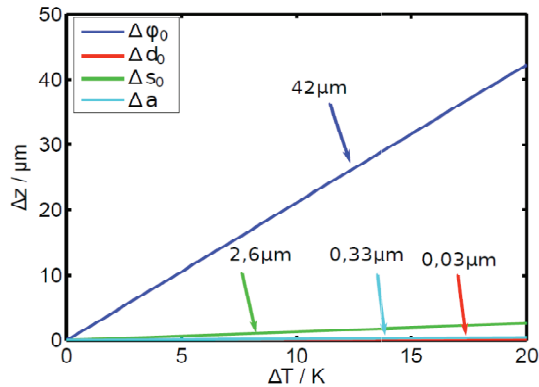


Abb. 3: Theoretische Fortpflanzung der Änderung der einzelnen Kalibrierparameter auf die Positionsmessung ($z = 500 \mu\text{m}$).

Es ist zu sehen, dass eine systematische Verschiebung der Phase φ_0 den maßgeblichen Einfluss auf die Positionsmessung ausübt. Für die systematische Messabweichung der Position in Abhängigkeit der Temperatur folgt gemäß Gl. (8) zu $\Delta z = 2,1 \frac{\mu\text{m}}{\text{K}} \cdot \Delta T$. Zur Überprüfung der Fehlerfortpflanzung wurde die Position in einem Wärmeschrank über einen großen Temperaturbereich gemessen. In Abb. 4 ist die experimentell ermittelte systematische Messabweichung der theoretisch bestimmten Messabweichung gegenübergestellt. Das Experiment validiert die Theorie.

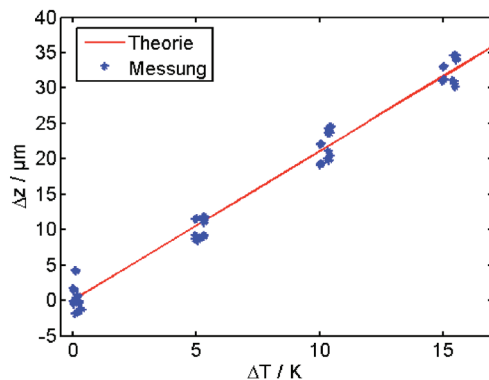


Abb. 4: Vergleich zwischen gemessener systematischer Abweichung der Position (blau) und theoretisch erwartetem Wert (rot).

Als zweite relevante Größe für die Formmessung sollen nun Messunsicherheit der Geschwindigkeit Betrachtet werden. Für zufällige Messabweichungen der Geschwindigkeit folgt aus Gl. (4)

$$\frac{\sigma_v}{v} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{fd}}{f_d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_d}{d}\right)^2}. \quad (9)$$

Sie setzt sich also aus zufälligen Messabweichung der Dopplerfrequenz ($\sigma_{fd}/f_d \approx 10^{-3}$ [5]) auf Grund von Rauschen und Speckle und zufälligen Unsicherheiten des zugrunde gelegten Streifenabstandes zusammen. Dieser resultiert aus zufälligen Abweichungen der Distanz und der örtlichen Änderung des Streifenabstands $\sigma_d/d = a \cdot \sigma_z/d \approx 10^{-5}$. Es zeigt sich, dass bei der zufälligen Messabweichung der Geschwindigkeit der Anteil, der aus der Frequenzmessung herrührt, deutlich dominiert.

Betrachtet man die relative systematische Messabweichung der Geschwindigkeit $\Delta v/v$, folgt aus Gl. 4 und mit $\Delta f_d = 0$, dass diese der relativen, systematischen Abweichung des Streifenabstand entspricht. Es folgt:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta d}{d}. \quad (10)$$

Dabei ist $\Delta d/d$ maßgeblich von der tatsächlichen Änderung des Streifenabstands Δd_0 , von der Streifenabstandsänderung a sowie von der systematischen Messabweichung der Position Δz abhängig. Nach Gl. (5) ergibt sich

$$\frac{\Delta d}{d_0} \approx \sqrt{\left(\frac{\Delta d_0}{d_0}\right)^2 + \left(\frac{z \cdot \Delta a}{d_0}\right)^2 + \left(\frac{a \cdot \Delta z}{d_0}\right)^2}. \quad (11)$$

Eine quantitative Aufschlüsselung der systematischen Messabweichung der Geschwindigkeit in deren einzelne Anteile ist in Abb. 5 dargestellt.

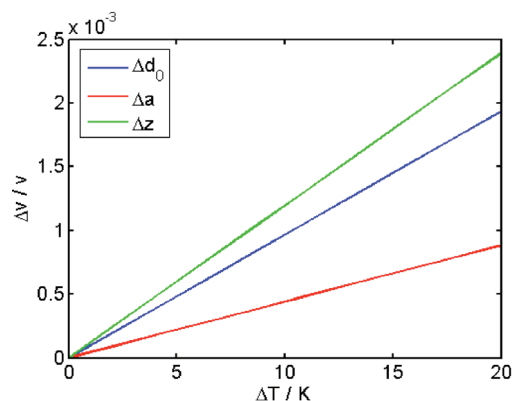


Abb. 5: Theoretische Fortpflanzung der Verschiebung der einzelnen Kalibrierparameter auf die Geschwindigkeitsmessung.

Wie für die Distanz soll die theoretisch ermittelte systematische Geschwindigkeitsabweichung experimentell validiert werden. Dabei zeigt sich, dass die tatsächlich

vorliegende systematische Messabweichung $\frac{\Delta d}{d} \approx 1 \cdot 10^{-5} \frac{\Delta T}{K}$ um mehr als eine Größenordnung geringer ist, als die theoretisch ermittelte (siehe Abb. 6)

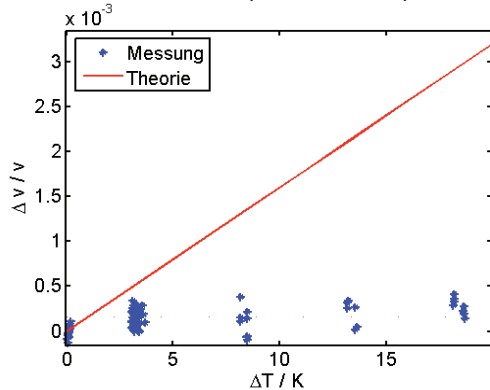


Abb. 6: Vergleich zwischen systematischen Messabweichungen des mittleren Radius zwischen Theorie (rot) und Messung (blau).

Ursächlich dafür ist eine korrelierte Änderung vom Streifenabstand im Messvolumenzentrum d_0 und der Phasendifferenz im Messvolumenzentrum φ_0 (siehe Abb. 7).

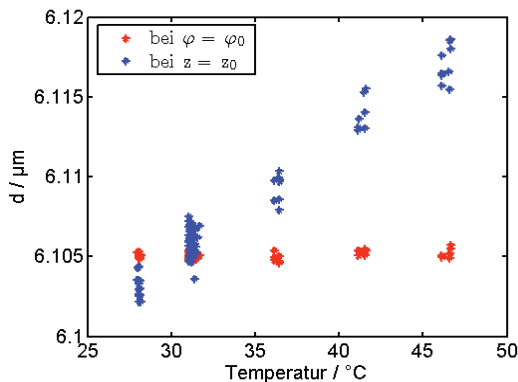


Abb. 7: Änderung des Streifenabstands an einer bzgl. des Messvolumens konstanten Position (blau) und an einer Position konstanter Phase (rot).

Die Kalibrierfunktionen des Streifenabstandes und der Phase verschieben sich bei Temperaturänderungen also gleichermaßen, sodass die systematische Änderung von d durch die gleichzeitige Phasen-/Positionsmessung korrigiert werden kann. In Tabelle 1 sind die experimentell ermittelten Messabweichungen für Position und Geschwindigkeit zusammengefasst dargestellt. Während die Messunsicherheit der Distanz schon bei geringen Temperaturschwankungen durch die systematische Messabweichungen dominiert wird, wird die Messabweichung der Geschwindigkeit durch zufällige Messabweichungen dominiert.

Tab. 1: Zufällige und systematische Messabweichung auf Grund der Temperatur für Position und Geschwindigkeit.

	Zufällige Abweichung	Syst. Abweichung $[\frac{\Delta T}{K}]$
Position	300 nm	2,1 μm
Geschwindigkeit	10^{-3}	10^{-5}

Formmessunsicherheit

Entsprechend Gl. 1 kann die Form eines rotierenden Werkstücks aus seinem mittleren Radius R und winkelaufgelösten Radiusänderungen \tilde{r} bestimmt werden. Für die Bestimmung der Gesamtmessunsicherheit der Form sind entsprechend die Einzelunsicherheiten $\sigma_{R,ges}$ und $\sigma_{\tilde{r}}$ zu bestimmen. Für die Unsicherheit des mittleren Radius R folgt mit Gl. 2

$$\frac{\sigma_{R,ges}^2}{R^2} = \left(\frac{\sigma_{\tilde{v}}}{\tilde{v}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v_{max}}{v} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 \quad (12)$$

Entsprechend ist $\sigma_{R,ges}$ vom mittleren Radius R selbst abhängig. Weiter lässt sich der Beitrag zufälliger Messabweichungen $\frac{\sigma_{\tilde{v}}}{\tilde{v}} = \frac{10^{-3}}{\sqrt{N}}$ durch Mittelung über N Messwerte reduzieren. Der Beitrag systematischer Messabweichungen $\frac{10^{-5}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\Delta T}{K}$ kann durch eine simultane Umgebungstemperaturmessung reduziert werden. Für typische Werte von $R = 20 \text{ mm}$, $N = 10^4$ und $\Delta T_{max} = 3K$ folgt $\sigma_{R,ges} \approx 400 \text{ nm}$.

Für die Gesamtmessunsicherheit der Radiusänderung \tilde{r} folgt aus Gl. (3)

$$\sigma_{\tilde{r},ges}^2 \approx \sigma_z^2 + \frac{1}{3} \cdot \Delta \tilde{z}_{max}^2. \quad (13)$$

Da die Messung der örtlichen Radiusänderung im Vergleich zur Temperaturänderung sehr schnell geschieht, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Temperatur während einer solchen Messung nicht verändert. Alle Positionsmessungen unterliegen also denselben systematischen Messabweichungen auf Grund einer Verschiebung der Kalibrierkennlinie. Die Messabweichung reduziert sich entsprechend gegenüber Gl. 8 zu

$$\Delta \tilde{z}^2 \approx z^2 \left[\left(\frac{a}{d_0} \frac{\Delta d_0}{d_0} \right)^2 + \left(z \frac{\Delta a}{d_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta s_0}{s_0} \right)^2 \right]. \quad (14)$$

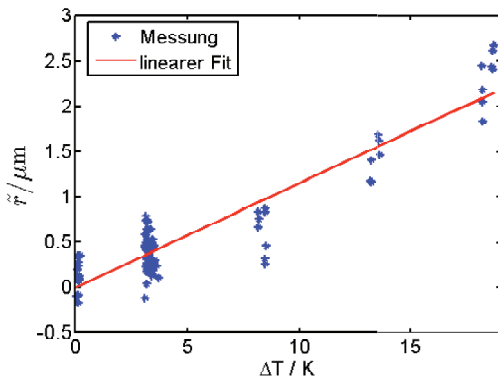


Abb. 8: Gemessene systematische Abweichung der Radiusänderung (blau) und linearer Fit der Messwerte (rot).

Dominierende Einflussgröße auf die Radiusänderung ist die Änderung des Phasenanstiegs Δs_0 . In Abb. 8 ist die experimentell ermittelte systematische Messabweichung der Radiusänderung dargestellt. Sie beträgt $0,13 \mu\text{m} \frac{\Delta T}{K}$. Nimmt man wieder eine maximale Temperaturabweichung von 3 K an, so zeigt sich, dass $\sigma_{\tilde{r},ges} \approx 300 \text{ nm}$ nicht durch systematische Messabweichungen, sondern ausschließlich durch zufällige Messabweichungen limitiert ist. Die Messabweichungen für die Formmessung sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tab. 2: Übersicht der zufälligen und systematischen Messabweichungen der Formmessung.

Größe	Zuf. Messabw.	Sys. Messabw.
Mittlerer Radius R	$0,2 \mu\text{m}$	$0,2 \mu\text{m}$
Radiusänderung \tilde{r}	$0,3 \mu\text{m}$	$0,1 \mu\text{m}$

In-situ Formmessung

Nach den theoretischen Betrachtungen zur Messunsicherheit und experimentellen Untersuchungen unter Laborbedingungen wird der Sensor in einer CNC-Drehmaschine zur in-situ Formmessung eingesetzt. Dazu wird er nach der Bearbeitung des Werkstückes gegenüber dem Werkzeugrevolver montiert (vgl. Abb. 9). Durch gleichzeitiges Rotieren des Werkstückes und Verfahren der Z-Linearachse wird das Werkstück helixförmig abgescannert. Der Scannprozess benötigt dabei etwa 125 Sekunden und liefert 625000 Messpunkte. Das rekonstruierte 3D-Modell eines Zylinders mit

Kegelstumpfansatz und zwei Einstichen ist in Abb. 10 dargestellt.

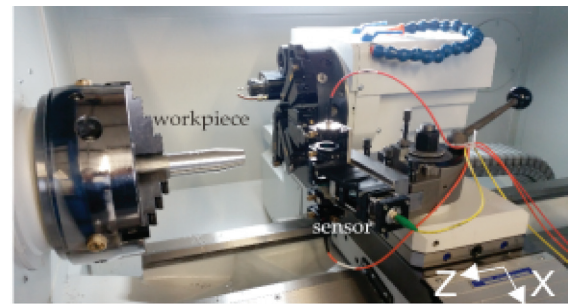


Abb. 9: P-LDD Sensor in Werkzeugmaschine. Der Sensor ist gegenüber dem Werkzeugrevolver montiert. Dies ermöglicht eine gleichzeitige Messung und Bearbeitung des Werkstückes [6].

Da der Sensor mit einer Messvolumenlänge von etwa 1 mm nicht in der Lage ist Radiusänderungen größer 1 mm ohne Scan zu vermessen, wurde der Sensor zusätzlich entsprechend des CAD Modells des Werkstücks entlang der X-Achse der Maschine verfahren. Entsprechend wurde der Arbeitsabstand über dem Kegelstumpf nahezu konstant gehalten. Lediglich die Einstiche wurden mit konstantem Abstand zur Rotationsachse überfahren.

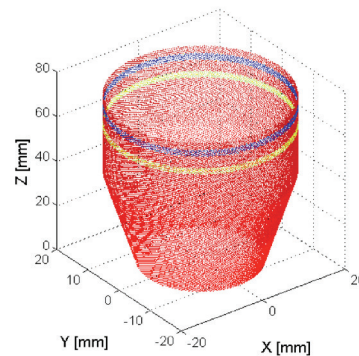


Abb. 10: Rekonstruierte 3D-Form aus gleichzeitiger Positions- und Geschwindigkeitsmessung. Die Farbgebung repräsentiert den gemessenen Abstand und hebt die gemessenen Einstiche hervor. Das Koordinatensystem entspricht den Maschinenachsen [6].

Zur Verifizierung der Messergebnisse wurden Referenzmessungen mit taktilen Messsystemen (ULM) aufgenommen. Für den Durchmesser ergibt sich dabei eine signifikante Differenz von $4 \pm 1,6 \mu\text{m}$. Diese wird auf unterschiedliche Umgebungsbedingungen bei den Messungen (Temperaturdifferenz etwa 4K) und die daraus

folgende tatsächliche Geometrieänderung des Werkstücks zurückgeführt. Neben dem absoluten Durchmesser konnten auch mikrogeometrische Riefen sowie Formabweichungen vom idealen Kreiszylinder gemessen werden, vgl. Abb. 11.

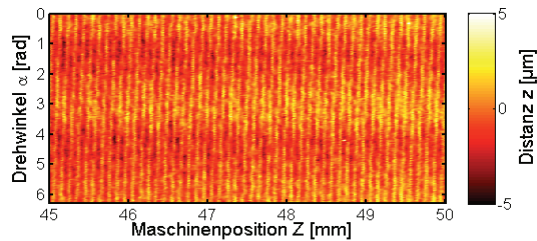


Abb. 11: Gemessenes Oberflächenprofil der Mantelfläche, erkennbar sind die Riefen sowie elliptische und konische Formabweichungen [6]

Mehrere Abweichungen zu einem idealen Kreiszylinder sind erkennbar. Entlang dem Umfang kann eine sinusförmige Variation des Abstandes mit einer Amplitude von $0,6 \mu\text{m}$ gemessen werden. Dies entspricht einer Gestaltabweichung zweiter Ordnung (Elliptizität). Referenzmessungen ergaben eine Amplitude von $0,3$ bis $0,8 \mu\text{m}$. Weiter ist eine konische Aufweitung entlang der Z-Achse (Rotationsachse) mit einem Anstieg von $0,1 \mu\text{m/mm}$ erkennbar (Referenz $0,04 \pm 0,05 \mu\text{m/mm}$). Drittens sind Riefen sichtbar, die durch das Werkzeug eingebracht wurden und sich helixförmig um das Werkzeug winden. Der Riefenabstand beträgt $100 \mu\text{m}$. Dies entspricht dem Werkzeugvorschub von $100 \mu\text{m/Umdrehung}$. Die Riefentiefe beträgt $1,2 \mu\text{m}$. Referenzmessungen (Konfokalmikroskop nanofocus μsurf) ergaben eine vergleichbare Riefentiefe von $1,1 \mu\text{m}$. Der P-LDD Sensor erlaubt entsprechend nicht nur die Bestimmung des mittleren Werkstückdurchmessers in-situ, sondern auch die Bestimmung weiterer Formmerkmale, wie Riefen, Aufweitung und Formabweichungen zweiter (und höherer) Ordnung.

Zusammenfassung und Ausblick

Der phasenauswertende Laser-Doppler-Distanzsensor (P-LDDS) ermöglicht durch die gleichzeitige Messung von Oberflächengeschwindigkeit und -Position eine absolute Formmessung rotierender Werkstücke in Werkzeugmaschinen. Auf Grund seines Messprinzips muss für die absolute Messung des Durchmessers der exakte Abstand zwischen Sensor und Rotationsachse nicht bekannt sein.

Änderungen der Umgebungstemperatur führen zu systematischen Änderungen von Kalibrierkonstanten, deren Einfluss auf die Formmessunsicherheit hier untersucht wurden. Dabei zeigt sich eine systematische

Messabweichung des mittleren Radius von 200 nm/K und für die orts aufgelöste Radiusänderungsmessung von 130 nm/K . Der P-LDDS ist somit nicht auf klimatisierte Messräume angewiesen, was einen Einsatz direkt im Fertigungsbetrieb (in-situ, in-process) erlaubt.

Zukünftig sollen kamerabasierte Detektionskonzepte untersucht werden, um die Messeigenschaften weiter zu verbessern. So lässt sich durch eine kamerabasierte, getrennte Auswertung einzelner Speckle die Messabweichung der Position und Geschwindigkeit um eine Größenordnung reduzieren und die laterale Auflösung (derzeit $50 \mu\text{m} \times 1 \text{ mm}$) verbessern. Zusätzlich erlaubt der Kameraeinsatz eine in-situ Kalibrierung des Messsystems.

Literaturnachweis

- [1] R. Kuschmierz, J. Czarske, und A. Fischer, „Multiple wavelength interferometry for distance measurements of moving objects with nanometer uncertainty“, *Meas. Sci. Technol.*, Bd. 25, Nr. 8, S. 085202, 2014.
- [2] B. E. Truax, F. C. Demarest, und G. E. Sommargren, „Laser Doppler velocimeter for velocity and length measurements of moving surfaces“, *Applied Optics*, Bd. 23, Nr. 1, S. 67–73, 1984.
- [3] J. W. Goodman, *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications*. Roberts and Company Publishers, 2007.
- [4] H.-E. Albrecht, M. Borys, N. Damaschke, und C. Tropea, *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003.
- [5] R. Kuschmierz, N. Koukourakis, A. Fischer, und J. Czarske, „On the speckle number of interferometric velocity and distance measurements of moving rough surfaces“, *Optics Letters*, Bd. 39, Nr. 19, S. 5622, 2014.
- [6] R. Kuschmierz, A. Davids, S. Metschke, F. Löffler, H. Bosse, J. Czarske, und A. Fischer, „Optical, in situ, three-dimensional, absolute shape measurements in CNC metal working lathes“, *Int J Adv Manuf Technol*, S. 1–11, 2016.