Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2024-11-12-37

Wie können Werkstückverformungen von Spannfuttern berücksichtig werden?

Sensorisches Spannfutter für dünnwandige Werkstücke

B. Denkena, H. Buhl, E. Wnendt, M. Meier

ZUSAMMENFASSUNG Die Einhaltung enger Fertigungstoleranz stellt bei der Drehbearbeitung dünnwandiger Werkstücke eine Herausforderung dar. Aufgrund der hohen Nachgiebigkeit dünnwandiger Werkstücke können auch bei geringen Spannkräften unzulässig hohe Werkstückverformungen auftreten. Daher wird die Spannkraft derzeit iterativ eingestellt bis die maximal zulässige Werkstückverformung eingehalten wird. In diesem Beitrag wird eine Methode zur Messung von Werkstückverformungen vorgestellt. Die neue Methode erlaubt die Messung von Werkstückverformungen innerhalb eines engen Toleranzbereichs von bis zu ISO 286 IT5.

STICHWÖRTER

Drehen, Messen/Steuern/Regeln, Spanntechnik

Sensory chuck for thin-walled workpieces – How can workpiece deformations be considered for workpiece clamping?

ABSTRACT Achieving tight tolerances is a challenge when turning thin-walled workpieces. Due to the low stiffness of thin-walled workpieces, high workpiece deformations can occur even when clamping forces are low. Currently, the clamping force is adjusted in an iterative, time-consuming process until tolerances are met. This article presents a method for measuring workpiece deformation. The new method enables the measurement of workpiece deformations within a tight tolerance range of up to ISO 286 IT5.

1 Herausforderung: Spannen dünnwandiger Werkstücke

Die Drehbearbeitung von dünnwandigen Werkstücken (zum Beispiel Lager oder Hülsen) ist in der Luft- und Raumfahrt, im Automobilbau sowie in der Medizintechnik von zentraler Bedeutung [1, 2]. Das Spannsystem zum Fixieren des Werkstücks hat dabei einen wesentlichen Einfluss auf die erreichbare Bearbeitungsgenauigkeit [3]. Um eine hohe Bearbeitungsgenauigkeit zu gewährleisten, wurden speziell konstruierte Spannsysteme entwickelt (zum Beispiel Pendelbacken, Spannzangenfutter oder Membranspannfutter) [4, 5]. Der Ansatz dieser Spannsysteme ist es, eine möglichst hohe Kontaktfläche zwischen Spannsystem und Werkstück zu realisieren. Durch die gleichmäßigere Verteilung der Spannkraft auf dem Umfang des Werkstücks wird die Verformung des Werkstücks gemindert. Derartige Spannsysteme sind aber nur für bestimmte Werkstückdurchmesser oder Fertigungsverfahren geeignet. Die am häufigsten eingesetzten Spannmittel beim Drehen sind dagegen Spannfutter mit drei oder vier Backen [3]. Backenfutter ermöglichen das Spannen von Werkstücken mit einem breiten Durchmesserbereich. Backenfutter werden daher auch als Universalspannfutter eingesetzt (**Bild 1**).

Aufgrund der relativ geringen Kontaktfläche zwischen Werkstück und Spannfutter können bei dem in Bild 1 dargestellten Spannfutter bei zu hoch eingestellten Spannkräften relativ hohe Werkstückverformungen auftreten. Geringere Spannkräfte mindern die Werkstückverformung. Bei zu geringen Spannkräften besteht jedoch das Risiko, dass das Werkstück freigesetzt wird. Die Spannkraft muss daher anhand der real auftretenden Werkstückverformung optimal eingestellt werden. Bei konventionellen Ansätzen wird die Werkstückverformung direkt mit einem kontaktbehafteten Messgerät (wie etwa Messtaster oder Messuhr) bestimmt [6]. Zudem wurden Systeme zur berührungslosen Messung der Werkstückverformung entwickelt [7–9]. Die Spannkraft wird bei beiden Messmethoden anschließend iterativ angepasst bis eine hinreichend geringe Werkstückverformung erzielt wurde.

Darüber hinaus wurden Methoden zur indirekten Messung der Werkstückverformung auf der Grundlage von FE-Simulationen oder analytischen Berechnungen erarbeitet [10]. In diesem Zusammenhang bestimmen *Sergeev et al.* die optimale Spannkraft simulativ, die danach durch einen hydraulischen Spannzylinder aufgebracht wird [11]. Aufgrund von Verlusten in der Kraftübertragung zwischen Zylinder und Spannfutter treten jedoch hohe Spannkraftfehler und damit Formabweichungen von 12–15 % auf.

Zusammenfassend erfolgt die Bestimmung der Verformung und Spannkrafteinstellung typischerweise manuell in einem iterativen und zeitaufwendigen Prozessschritt. In diesem Beitrag wird daher ein neuartiges Spannfutter vorgestellt, das die Messung der Werkstückverformung und die automatische Spannkrafteinstellung kombiniert.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-11-12-37 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

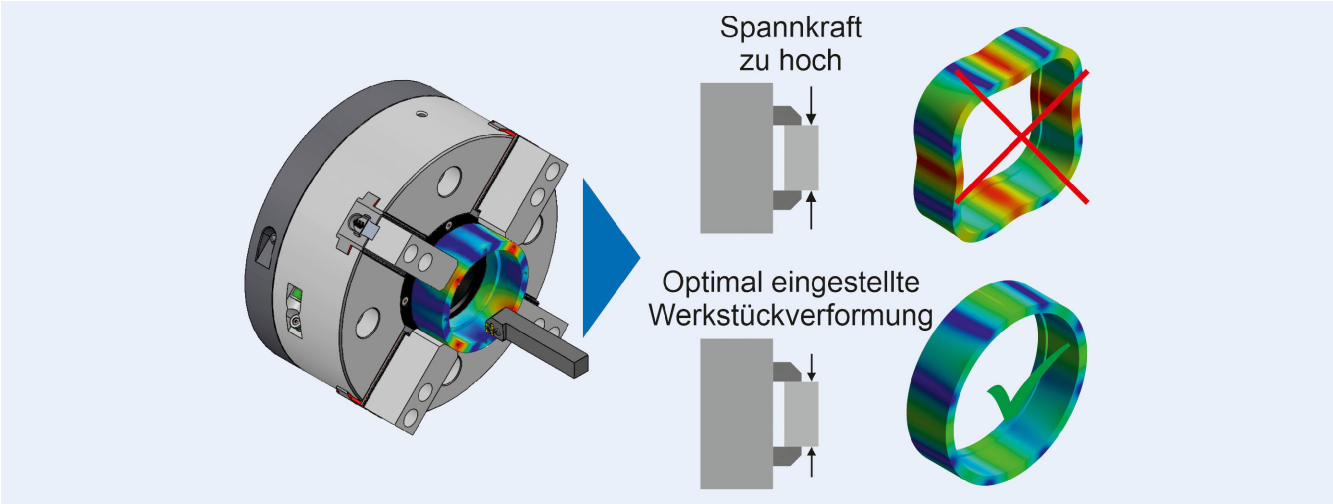

Bild 1. Herausforderung beim Spannen dünnwandiger Werkstücke. *Grafik: IFW Hannover*

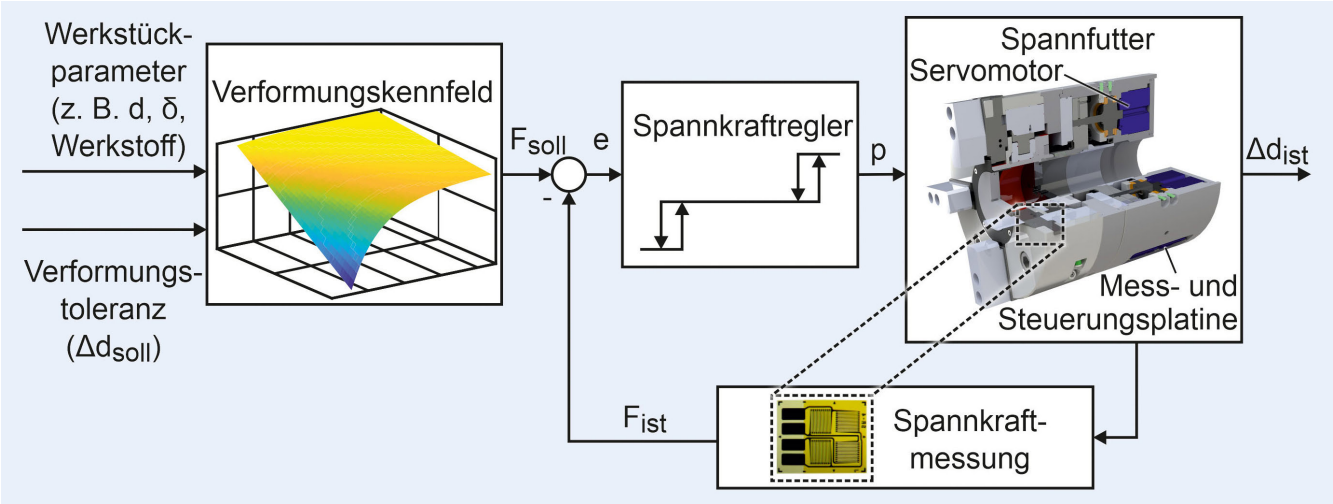

Bild 2. Konzept zur Messung der Werkstückverformung. *Grafik: IFW Hannover*

2 Sensorisches Spannfutter ermöglicht Messung der Werkstückverformung

2.1 Konzept zur Messung der Werkstückverformung

Das Konzept zur Messung der Werkstückverformung ist in **Bild 2** dargestellt.

Eingangsparameter sind Werkstückparameter (zum Beispiel Werkstückdurchmesser d, Durchmesserverhältnis δ oder Werkstoff) sowie eine Verformungstoleranz Δd_{soll} (zum Beispiel der Rundlauf des Werkstücks). Derartige Parameter werden vom Bedienpersonal vorgegeben. Aus einem experimentell bestimmten Verformungskennfeld wird dann aus den Eingangsparametern die Sollspannkraft F_{soll} errechnet, bei der die Verformungstoleranz Δd_{soll} eingehalten wird. Die errechnete Spannkraft F_{soll} wird anschließend vom Spannfutter in einem geschlossenen Regelkreis aufgebracht. Die Werkstückverformung Δd_{ist} wird somit indirekt anhand der gemessenen Spannkraft bestimmt, wobei ein linear-elastischer Zusammenhang zwischen Spannkraft und Werkstückverformung angenommen wird.

Das Spannfutter besteht aus einem Vierbacken-Spannfutter vom Typ „VT-S031“ der HWR Spanntechnik GmbH. Zum Aufbringen und Anpassen der Spannkraft sind vier Servomotoren vom Typ „FHA-14C“ der Harmonic Drive SE im Spannfutter integriert. Jeder Servomotor kann mithilfe der Motorposition p angesteuert werden. Dazu werden insgesamt vier Steuerungsplatinen vom Typ „EJ7411“ der Beckhoff Automation GmbH & Co. KG im Spannfutter verwendet. Zur Messung der Spannkraft F_{ist} sind Dehnungsmessstreifen (DMS) vom Typ „N2A-06-S1783“ der Me-Meßsysteme GmbH im Spannfutter integriert. Eine weitere Messplatine vom Typ „EJ3104“ der Beckhoff Automation dient zur Erfassung des DMS-Signals.

2.2 Einflüsse auf die Werkstückverformung

Die Bestimmung des Verformungskennfeld erfolgte experimentell. Die Versuche wurden für insgesamt neun Werkstückproben aus dem Werkstoff 16MnCr5 durchgeführt. Jede Werkstückprobe stellt einen Hohlzylinder mit einer Zylinderhöhe h_Z = 60 mm dar. Der Außendurchmesser d_a wird zwischen 80 mm und 120 mm variiert. Dies entspricht einem typischen Werkstückdurchmesserbereich für das Spannfutter. Die übrigen Geometrieparameter sind in der **Tabelle** aufgeführt.

Mit den gewählten Geometrieparametern wurde der Einfluss variierender Geometrieparameter (Außendurchmesser d_a, Innen-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-11-12-37 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

Tabelle. Geometrieparameter der Werkstückprobe.

Nr.	d_a	d_i	$s = (d_a-d_i)/2$	$\delta = d_a/d_i$
1	80 mm	52 mm	14 mm	1,53
2	80 mm	60 mm	10 mm	1,33
3	80 mm	64 mm	8 mm	1,25
4	100 mm	72 mm	14 mm	1,38
5	100 mm	80 mm	10 mm	1,25
6	100 mm	84 mm	8 mm	1,19
7	120 mm	92 mm	14 mm	1,30
8	120 mm	100 mm	10 mm	1,20
9	120 mm	104 mm	8 mm	1,15

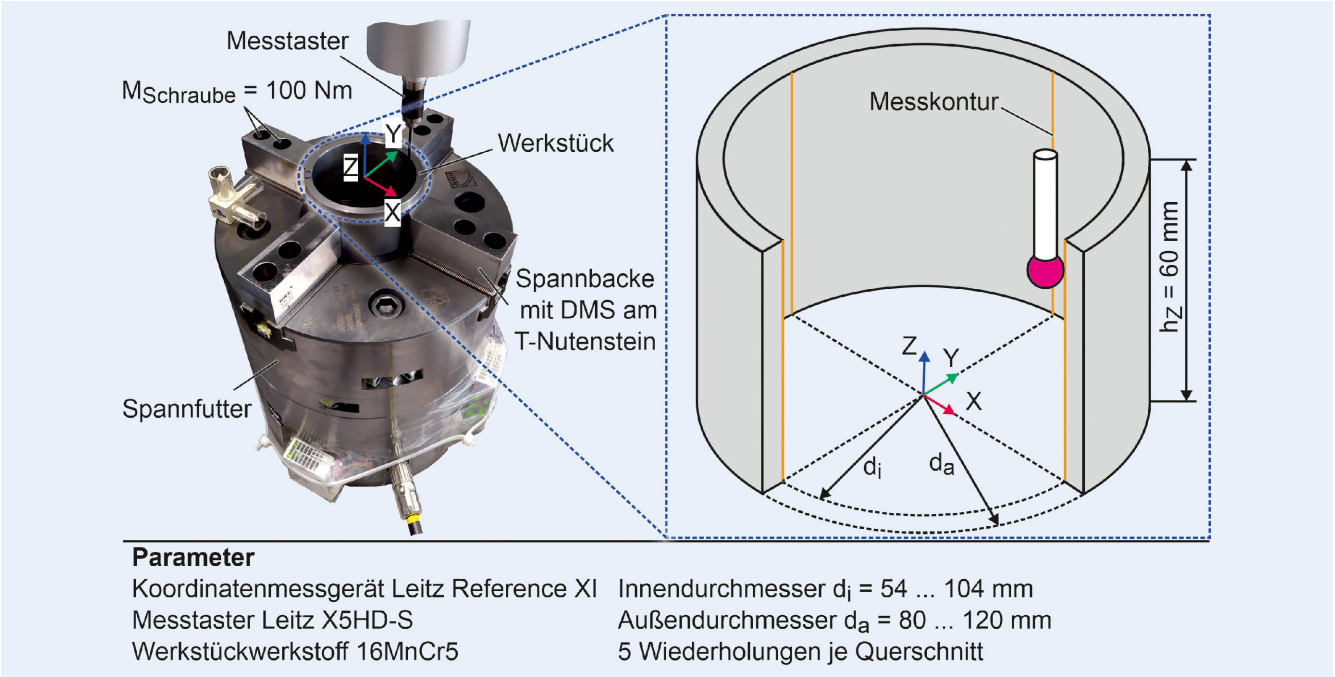

Bild 3. Versuchsaufbau zur Bestimmung des Verformungskennfelds. *Grafik: IFW Hannover*

durchmesser d_i, Wandstärke s und Durchmesserverhältnis δ) auf die Messung der Werkstückverformung analysiert. Der Versuchsaufbau ist in **Bild 3** dargestellt.

Mit einer Koordinatenmessmaschine wurde die Kontur der Innenfläche entlang der Z-Achse an den vier Spannbacken mit fünf Wiederholmessungen ermittelt. Dieser Vorgang wurde für zehn Spannkraftstufen (zwischen minimaler und maximaler Spannkraft) wiederholt. Im ersten Schritt wurde jede Werkstückprobe mit einer minimalen Spannkraft $F_{Spann,min} \approx 250\,N$ gespannt. Bis zur minimalen Spannkraft kann wegen einer Ausgleichsbewegung des Spannmechanismus vom Spannfutter eine Starrkörperverschiebung des Werkstücks auftreten. Die Position des Werkstücks kann oberhalb der minimalen Spannkraft als konstant angenommen werden. Darüber hinaus werden alle neun Werkstücke bei der minimalen Spannkraft um $\Delta d < 1\,\mu m$ und damit unterhalb der Messgenauigkeit der Koordinatenmessmaschine verformt. Die Werkstückkontur bei der minimalen Spannkraft wird daher als nahezu unverformter Referenzzustand verwendet. Die Werkstückverformung ist die Differenz zwischen der Innenkontur im Referenzzustand und Innenkontur bei der jeweiligen Spannkraftstufe. Die gemessene Werkstückverformung entlang der vier Spannbacken ist beispielhaft für die Werkstückprobe 3 in **Bild 4** dargestellt.

Für jede Spannbacke ist die Werkstückverformung Δd als Mittelwert aus fünf Messungen für eine Spannkraft $F_{Spann} = 74\,kN$ angegeben. Die Werkstückverformung unterscheidet sich je nach Spannbacke. Dies ist auf eine ungleichmäßige Kraftverteilung an den vier Spannbacken zurückzuführen. Die jeweils gegenüberliegenden Spannbacken (Spannachse X: Backe 2 und 4 sowie Spannachse Y: Backe 1 und 3) sind über ein Kulissengetriebe mechanisch miteinander gekoppelt. Über das Kulissengetriebe findet ein Kraftausgleich zwischen den Spannbacken statt. Die auftretende Reibung an den Gleitflächen im Kulissengetriebe limitiert jedoch

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-11-12-37 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

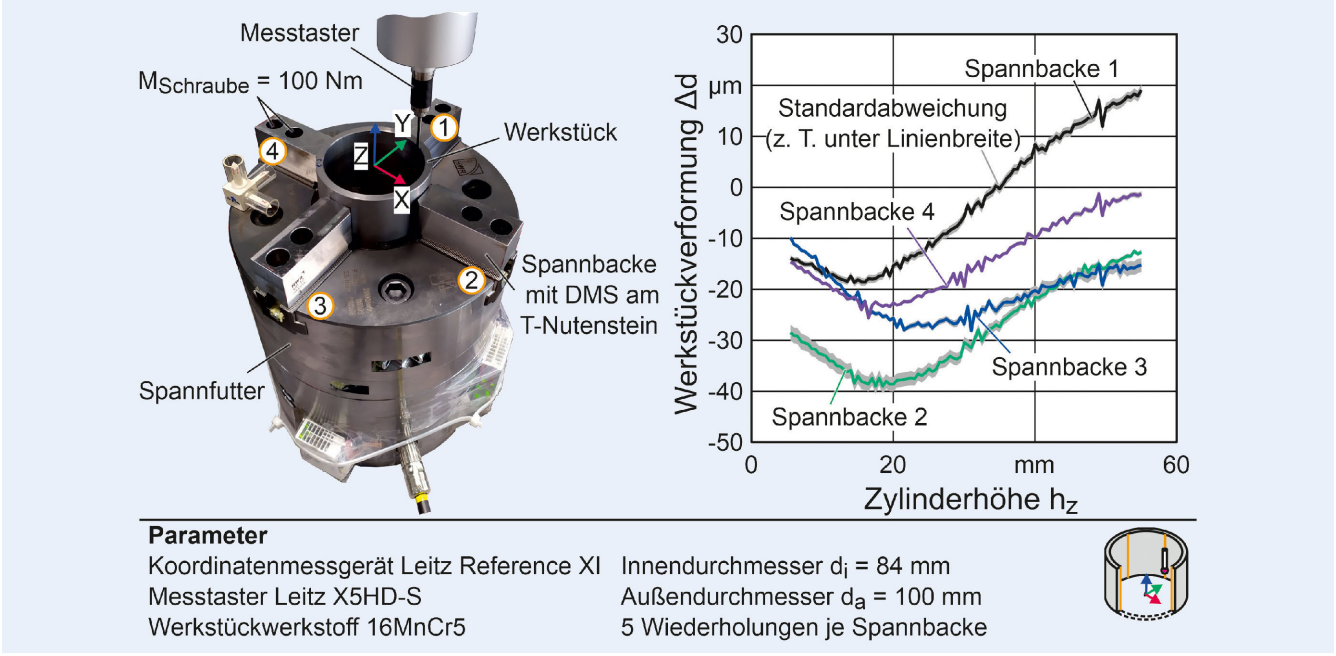

Bild 4. Werkstückverformung bei Probe 3. *Grafik: IFW Hannover*

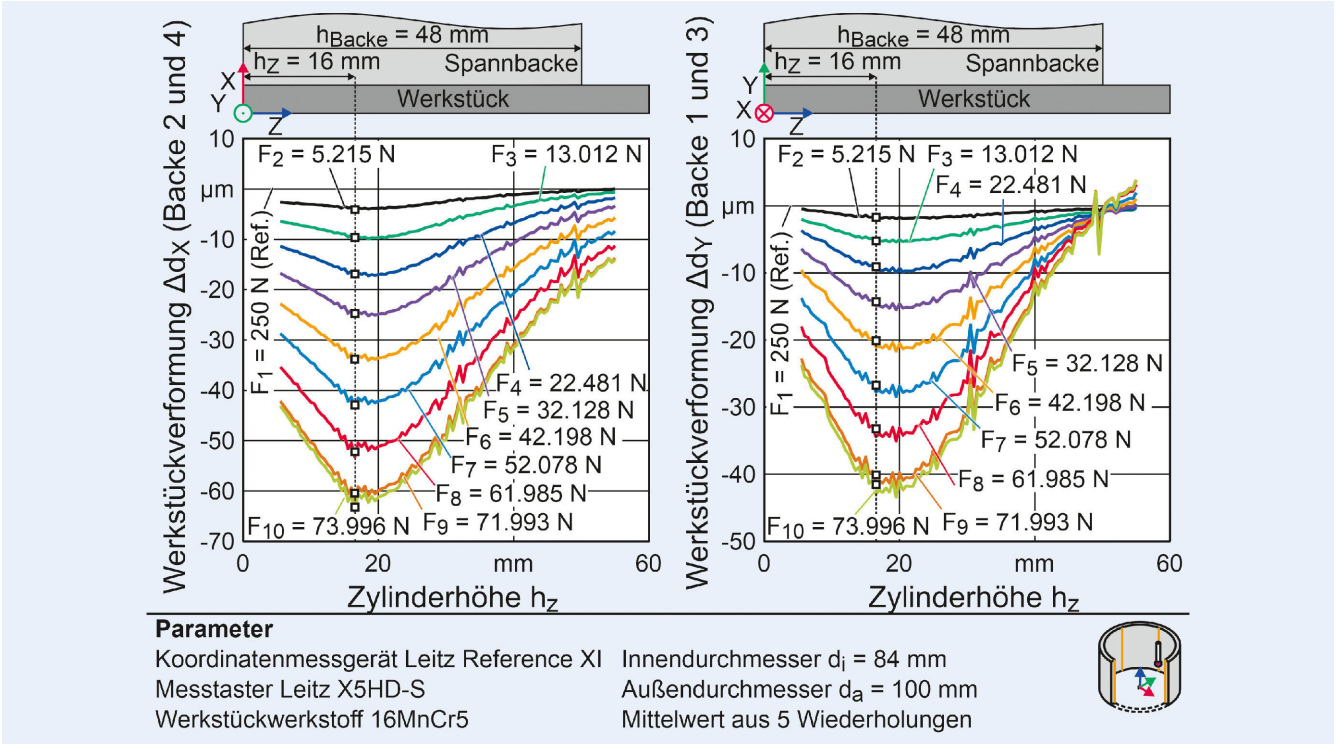

Bild 5. Werkstückverformung für Werkstückprobe 3 in X- und Y-Richtung. *Grafik: IFW Hannover*

den realisierbaren Kraftausgleich, wodurch ein Kraftunterschied an den Spannbacken entsteht.

Die Spannkraft am Werkstück ist als Summe der vier Kräfte an den Spannbacken definiert. In den zwei Spannachsen wirkt entsprechend die Kraftsumme der gegenüberliegenden Spannbacken. In **Bild 5** ist analog die Verformungssumme Δd_X für Spannachse X sowie Δd_Y Spannachse Y dargestellt. Die Verformungssumme für Backe 1 und Backe 3 ist die Werkstückverformung Δd_Y und die Werkstückverformung Δd_X ist die Summe von Backe 2 und Backe 4.

Aufgrund der Werkstückrauheit treten bei jedem Spannkraftschritt Verformungsspitzen bei stochastisch verteilten Zylinderhöhen auf. Das Verformungsmaximum tritt sowohl in X- als auch in Y-Richtung bei einer Zylinderhöhe $h_Z \approx 16$ mm auf. Dies ist auf den Angriffspunkt der Spannkraft zurückzuführen, der bei 1/3 der gesamten Spannbackenhöhe $h_{Backe} = 48$ mm (das heißt $h_Z = 16$ mm) liegt [12]. Die Kurven sowohl für die X-Richtung

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-11-12-37 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

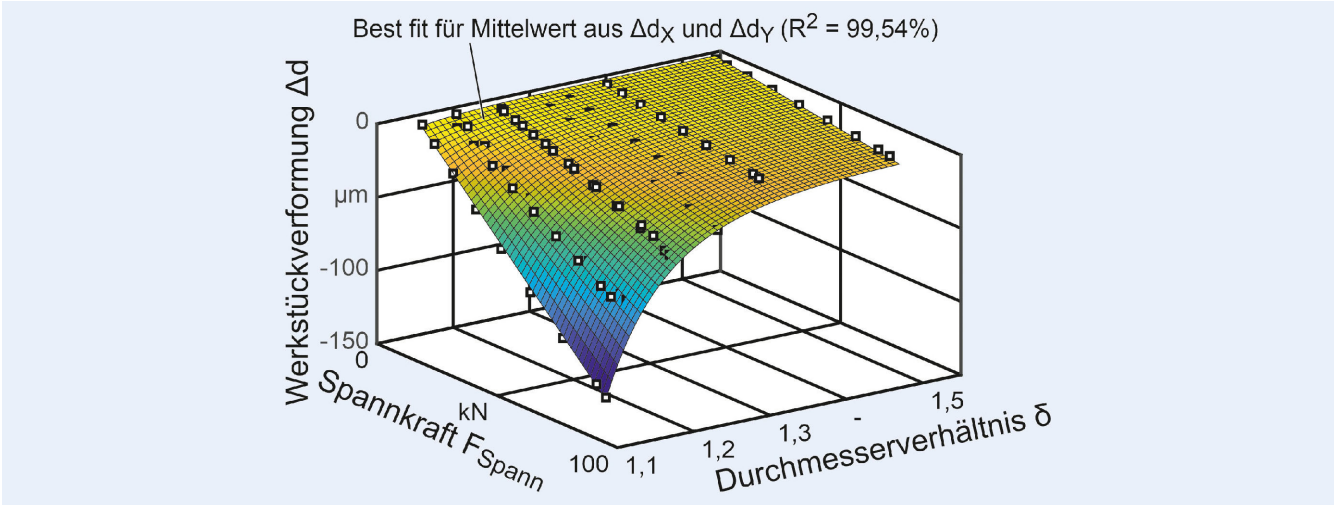

Bild 6. Verformungskennfeld. *Grafik: IFW Hannover*

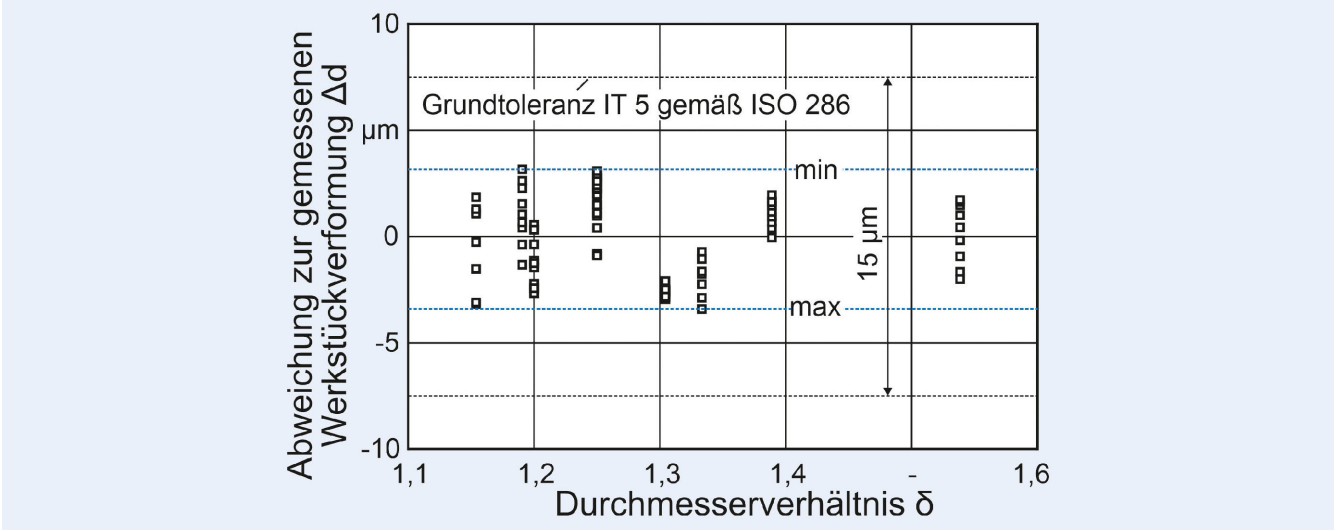

Bild 7. Genauigkeit des Verformungskennfelds. *Grafik: IFW Hannover*

als auch für die Y-Richtung weisen ein qualitativ identisches Verhalten auf. Daher wird die Verformung im Verformungskennfeld als Mittelwert der X- und Y-Richtung zusammengefasst. Die maximale Verformung bei jeder der zehn Spannkraftstufen stellt einen Datenpunkt im Kennfeld dar. Das resultierende Verformungskennfeld ist in **Bild 6** dargestellt.

Für ein konstantes Durchmesserverhältnis besteht ein linearproportionaler Zusammenhang zwischen der Spannkraft und der Werkstückverformung. Demgegenüber steht bei einer konstanten Spannkraft ein reziproker Zusammenhang zwischen dem Durchmesserverhältnis und der Werkstückverformung. Für die Asymptote $\delta = 1$ (unendliche Nachgiebigkeit des Werkstücks) tritt eine unendlich hohe Verformung des Werkstücks auf. Für die Asymptote $\delta = \infty$ (unendliche Steifigkeit des Werkstücks) wird nur das Spannfutter verformt. Das Kennfeld berücksichtigt folglich auch die Steifigkeit des Spannfutters.

Für jeden Datenpunkt liegt eine geringe Standardabweichung mit einem Mittelwert von $\sigma = 0{,}65\ \mu m$ vor. Das Spannfutter kann folglich eine sehr hohe Wiederholgenauigkeit erreichen. Zur Interpolation des Verformungskennfelds verwendet wurde der in Gleichung (1) beschriebene Zusammenhang.

$$\Delta d = (a + b \cdot F_{cl}) \cdot (c \cdot \delta^n + \delta)^2 \qquad (1)$$

a = −0,1858; b = −0,07932; c = 12,91; n = −9,109

Gleichung (1) nähert das Verformungskennfeld mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 = 99,54 % an. Um die Genauigkeit des Verformungskennfeldes zu bewerten, wurde die Differenz zwischen dem Kennfeld und der gemessenen Werkstückverformung berechnet (**Bild** 7).

In Bild 7 sind die Abweichungen sowie die Grundtoleranz IT 5 nach ISO 286 dargestellt. Die Grundtoleranz IT 5 ist ein gängiges Toleranzmaß beim Drehen (zum Beispiel Drehen von Werkstücken mit h5-Toleranz). Insgesamt zeigt das Kennfeld eine Abweichung im Bereich von −3,4 µm bis +3,16 µm zu den gemessenen Verformungen. Die Abweichungen liegen innerhalb eines Toleranzgrades von IT 5. Die vorgestellte Methode zur Messung der Werkstückverformung ermöglicht folglich eine potenziell hinreichend präzise Messung der Werkstückverformung.

Folgende mögliche Einflussfaktoren auf das Verformungskennfeld sind jedoch bisher unerforscht:

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-11-12-37 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

– Die Messungen wurden im Stillstand des Futters durchgeführt. Nach [12] variiert die Spannkraft aufgrund von Fliehkräften beim Drehen erheblich. Dieser Einfluss ist noch nicht quantifiziert worden.
– Beim Drehen werden in der Regel ausgedrehte Spannbacken verwendet. Durch das Ausdrehen werden Abweichungen im mechanischen Aufbau des Spannfutters (etwa Verkippung des Werkstücks aufgrund unterschiedlicher Spannbackenabmessungen) gemindert [13]. Ausgedrehte Spannbacken wurden jedoch nicht verwendet, um identische Spannbacken und damit eine konstante Steifigkeit des Spannfutters sicherzustellen.
– Es treten Rundlauffehler der Werkstückproben von bis zu 194 µm auf. Der Einfluss von Formfehlern des Werkstücks auf das Verformungskennfeld wurde bisher nicht quantifiziert.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Dargestellt wurde eine Methode zur Messung von Werkstückverformungen mithilfe eines Verformungskennfelds. Das Verformungskennfeld wird durch eine Näherungsfunktion mit einem hohen Bestimmtheitsmaß von R^2 = 99,54 % angenähert. Die Messabweichungen liegen innerhalb einer Toleranzklasse von ISO 286 IT 5 und damit innerhalb von gängigen Toleranzen beim Drehen.

Zukünftige Forschungsarbeiten zielen darauf ab, die bei Zerspanungsprozessen erreichte Bearbeitungstoleranz zu ermitteln. Außerdem sollen weitere mögliche Einflüsse auf die Genauigkeit der Verformungsmessung (zum Beispiel Werkstückverkippung, Fliehkräfte beim Drehen) untersucht werden.

DANKSAGUNG

Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsprojekts „DefCon“ (KK5032720JN2) erzielt. Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die Förderung dieses Projekts im Rahmen des „Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM)“.

Literatur

[1] Brinksmeier, E.; Sölter, J.; Grote, C.: Distortion engineering – identification of causes for dimensional and form deviations of bearing rings. CIRP Annals 56 (2007) 1, pp. 109–112
[2] Viitala, R.: Minimizing the bearing inner ring roundness error with installation shaft 3D grinding to reduce rotor subcritical response. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 30 (2020), pp. 140–148
[3] Fleischer, J.; Denkena, B.; Winfough, B. et al.: Workpiece and tool handling in metal cutting machines. CIRP Annals 55 (2006) 2, pp. 817–839
[4] Denkena, B.; Hülsemeyer, L.: Investigation of a fine positioning method in lathes using an active clamping chuck. Euspen's 15th International Conference & Exhibition, Leuven, 2015, pp. 245–246
[5] Khaghani, A.; Cheng, K.: Investigation on an innovative approach for clamping contact lens mould inserts in ultraprecision machining using an adaptive precision chuck and its application perspectives. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 111 (2020), pp. 839–850
[6] Valiño, G.; Suárez, C. M.; Rico, J. C. et al.: Comparison between a laser micrometer and a touch trigger probe for workpiece measurement on a CNC lathe. Advanced Materials Research 498 (2012), pp. 49–54
[7] Che, J. K.; Ratnam, M. M.: Real-time monitoring of workpiece diameter during turning by vision method. Measurement 126 (2020), pp. 369–377
[8] Fan, K. C.; Chao, Y. H.: In-process dimensional control of the workpiece during turning. Precision Engineering 13 (1991) 1, pp. 27–32
[9] Kuschmierz, R.; Davids, A.; Metschke, S. et al.: Optical, in situ, three-_dimensional, absolute shape measurements in CNC metal working lathes. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 84 (2016), pp. 2739–2749
[10] Manikandan, H.; Chandra Bera, T.: Modelling of dimensional and geometric error prediction in turning of thin-walled components. Precision Engineering 72 (2021), pp. 382–396
[11] Sergeev, A. S.; Tikhonova, Z. S., Krainev; D. V.: Automated thrust force calculation of machine tool actuators in fastening and turning steels. Precision Engineering 206 (2017) pp. 1148–1154
[12] Engl. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik: VDI 3106 – Determination of permissible speed (rpm) of lathe chucks (jaw chucks), 2004
[13] Byun, J.; Liu, C.: Methods for improving chucking accuracy. Journal of Manufacturing Science and Engineering 134 (2008) 5, pp. 427–436

Eike Wnendt, M.Sc.
wnendt@ifw.uni-hannover.de
Tel. +49 511 / 762-18257
Foto: IFW Hannover

Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena

Henning Buhl, M.Sc.

Leibniz Universität Hannover
Institut für Fertigungstechnik
und Werkzeugmaschinen (IFW)
An der Universität 2 30823 Garbsen
www.ifw.uni-hannover.de

Matthias Meier

HWR Spanntechnik GmbH
Rosa-Luxemburg-Str. 5, 28876 Oyten
Tel. +49 4207 / 68870
info@hwr.de
www.hwr.de

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-11-12-37 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY