

Zustandsüberwachung von Vorschubantrieben mithilfe eingebetteter Sensoren

Erkennung von verschleißbedingten Vorspannungsverlusten anhand des dynamischen Verhaltens des Vorschubantriebs^{*)}

Johannes Ellinger,
Maximilian Benker,
James Rowe,
Robin Kleinwort und
Michael F. Zäh, München
Sebastian Unsleber, Schweinfurt

Um spanende Werkzeugmaschinen möglichst profitabel betreiben zu können, muss der aktuelle Verschleißzustand der Maschinen hinreichend genau bekannt sein. Dies kann durch kontinuierliche Zustandsüberwachung erreicht werden. Neuartige, direkt in die Komponenten des Antriebsstranges von Werkzeugmaschinen integrierte Sensoren bieten die Möglichkeit, dies auf einfache und kostengünstige Weise durchzuführen. Als Indikator für Verschleiß kann dabei direkt das dynamische Verhalten des Antriebsstranges herangezogen und so eine hohe Anlagenverfügbarkeit sichergestellt werden. ^{**)}

Einleitung

Die Profitabilität der spanenden Fertigung wird maßgeblich von zwei Faktoren bestimmt: Der Verfügbarkeit der dabei verwendeten Werkzeugmaschinen [1] und dem erreichbaren Zeitspanvolumen [2]. Ersterer gibt an, wann die Maschine überhaupt für wertschöpfende Tätigkeiten zur Verfügung steht und der zweite bestimmt, wie effizient diese Zeit genutzt werden kann. Es stellt sich heraus, dass die Komponenten der Vorschubantriebe in spanenden Werkzeugmaschinen die beiden Faktoren einschneidend beeinflussen. Zum einen stellen sie die kritischen Ausfallkomponenten der Werkzeugmaschine dar [3] und zum anderen bestimmen die Steifigkeiten des Kugelgewindetriebs (KGT) und der Profilschienenführungen grundlegend die erreichbare Präzision [4]. Maßgeblich dafür ist die Vorspannung dieser Komponenten, die im Laufe der Zeit durch mechani-

schon Abrieb nachlässt. Dies stellt zu meist den Hauptverschleißmechanismus dieser Komponenten dar [4]. Zur Sicherung der Produktivität wurde in der Vergangenheit vor allem auf Ansätze der reaktiven und zeitbasierten Wartung zurückgegriffen [5]. Im ersten Fall erfolgen Wartungsarbeiten nur, wenn bereits ein schadensbringender Ausfall stattgefunden hat. Im zweiten werden diese nach einem festen Zeitplan durchgeführt. Dabei wird bewusst in Kauf genommen, dass die bei der Instandhaltung entstehenden Kosten und der damit verbundene Maschinenstillstand möglicherweise überflüssig gewesen wären, weil die Wartung zu früh, also weit vor Ausfall der Maschine, durchgeführt wurde. Beide Ansätze führen damit zu einem Zielkonflikt hinsichtlich der Profitabilität der spanenden Fertigung.

Abhilfe verspricht ein neuartiger Ansatz der zustandsbasierten Instandhaltung („Condition Monitoring“), bei dem Wartungsarbeiten mit dem tatsächlichen, aktuellen Maschinenzustand verknüpft werden [6].

In diesem Beitrag soll eine Methode vorgestellt werden, mit der dieses Ziel mithilfe in den Vorschubantrieb eingebetteter Sensoren auf einfache und kostengünstige Weise erreicht werden kann.

Zustandsüberwachung an Vorschubantrieben

In der Literatur wird der Detektion des Vorspannungsverlusts des KGT mit einer Vielzahl an Methoden begegnet. In [7] wird gezeigt, dass das Verhältnis aus Gleiten und Rollen der Wälzkörper und damit auch die Kugelrückführfrequenz eines KGT direkt mit dessen Vorspannung korreliert. Mithilfe eines zusätzlich angebrachten Beschleunigungssensors und eines Void-Kalman-Filter-Algorithmus kann diese gemessen und Rückschlüsse auf den Vorspannungsverlust gezogen werden. Die bloße Messung des Motorstroms reicht aus, um Vorspannungsverluste durch die Kombination einer empirischen Bandzerlegung und der Multiskalen-Entropie-Methode nachzuweisen [8]. Ähnliches kann auch erreicht werden, indem die Veränderung der Schwingungsenergie ausgewählter Signale des Antriebsreglers in regelmäßigen Testzyklen überwacht wird [3]. Im Ge-

^{**)Danksagung}

Die Autoren dieses Beitrags bedanken sich bei der Europäischen Kommission für die Förderung des Projekts „PreCoM – Predictive Cognitive Maintenance Decision Support System“ unter der Grant Agreement No. 768575.

^{*)Hinweis}

Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen von den Mitgliedern des ZWF-Advisory Board wissenschaftlich begutachteten Fachaufsatz (Peer-Review).

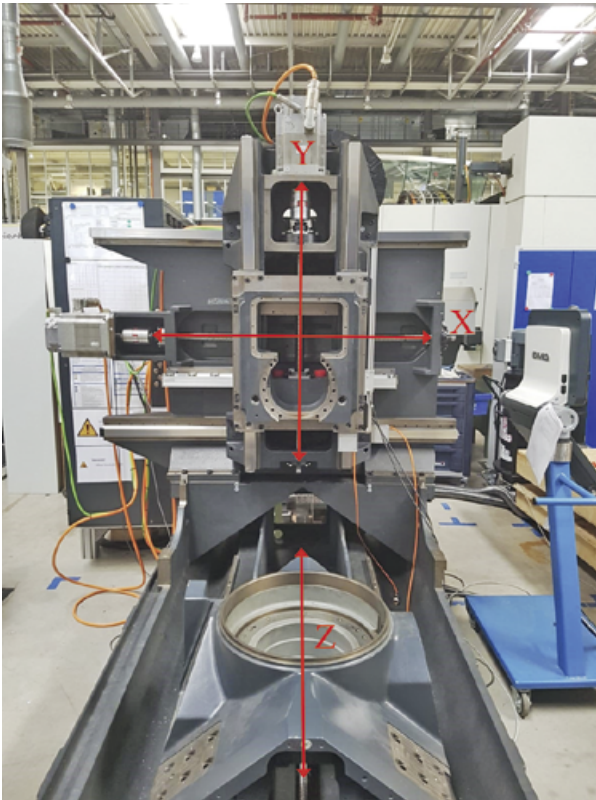


Bild 1. Versuchsstand mit einfacher Zugänglichkeit der Kugelgewindetriebe und Profilschienenführungen

gensatz zu den vorhergehenden Ansätzen wird in [4] in Form der „charakteristischen Distanz“ eine Größe eingeführt, die nicht zwingend auf einen Testzyklus mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit angewiesen ist. Dies wird durch die Transformation von der Zeit auf rein geometrische Größen als beschreibende Größe erreicht.

Zustandsüberwachung mithilfe eingebetteter Sensoren

Ebenso vielfältig wie die Ansätze zur Überwachung von KGTs sind auch die Anwendungsfälle eingebetteter Sensoren an Werkzeugmaschinen. In [9] wurden piezoelektrische Kraftsensoren unter anderem zur Zustandsüberwachung an Werkzeugmaschinen in die Spindel-einheit integriert. Die Auslegung von Lagern mit integrierter Sensorik war Gegenstand der Untersuchung in [10]. Dabei wurden die Vorteile solcher Komponenten hinsichtlich Diagnose und Zustandsüberwachung besonders betont. In [11] wurden drahtlose PVDF-Dünnschichtsensoren direkt in die Scheideinsätze eines Werkzeugs eingebettet. Dadurch konnten die Zerspankräfte jedes Einsatzes separat bestimmt und so auch

Rückschluss auf dessen Zustand gezogen werden. Zuletzt soll an dieser Stelle noch auf die Arbeit in [12] eingegangen werden, in der eingebettete Dehnmessstreifen zur Zustandsüberwachung am KGT genutzt werden. Hier wurde der RMS-Wert des Stromsignals von in die Kugelgewindetriebmutter eingearbeiteten Dehnmessstreifen genutzt, um augenscheinlich einen Totalausfall und mäßigen Verschleiß vom neuwertigen Zustand zu differenzieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wird mit dem IMS-A der Bosch Rexroth AG ein neuartiges System untersucht, bei dem die Positionsmessung des Vorschubantriebs und zusätzliche Beschleunigungssensoren

direkt in die Profilschienenführungen (PFS) eingebettet wurden. Dadurch kann die Auswahl an verfügbaren Signalen zur Zustandsüberwachung erhöht werden.

Integrierte Beschleunigungssensoren und Versuchsstand

Zur Durchführung der notwendigen Versuche wurde der in Bild 1 abgebildete Versuchsstand basierend auf einer DMG duo Block DMC 55H aufgebaut. Dabei wurde gezielt auf eine einfache Zugänglichkeit aller Komponenten des Vorschubantriebs geachtet. Die Ansteuerung der Vorschubantriebe erfolgte mittels einer Heidenhain CNC iTNC530. Alle Versuche wurden auf der X-Achse durchgeführt, da für diese KGT und PFS in unterschiedli-

chen Vorspannungsklassen zur Verfügung standen.

Eine Beschreibung der verwendeten Komponenten zeigt Tabelle 1. Für die durchgeführten Messungen wurden KGTs in zwei unterschiedlichen Vorspannungsklassen C2 und C3 mit einer prozentualen Vorspannung von 4,0 Prozent bzw. 2,4 Prozent verwendet. Weiterhin kamen auch jeweils vier PFS in denselben Vorspannungsklassen zum Einsatz. Wie im Lauf dieser Arbeit gezeigt werden kann, greift das hier verwendete Messsystem IMS-A auf ausgezeichnete Beobachtungspunkte für das dynamische Verhalten der Maschine zurück, da sämtliche auftretenden Massen-, Reibungs- und Prozesskräfte über die Profilschienenführungen in das Maschinenbett abgeleitet werden. In Bild 2 ist erkennbar, dass das System aus einer Profilschiene besteht, auf der PFS laufen. Diese bestehen zum einen aus einem belasteten Teil, der die eigentliche

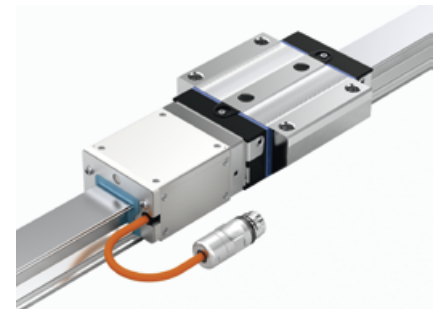


Bild 2. Profilschienenführungssystem mit integrierter Positions- und Beschleunigungssensorik

Verbindung zu den Achsschlitten herstellt. Zum anderen ist daran eine Messeinheit angeflanscht, die neben einem dreiaxigen MEMS-Beschleunigungssensor auch einen Abtastkopf zur Abtastung des in die Schiene eingebrachten Magnetgitters enthält. Die Weiterleitung der Messdaten erfolgt über die Siemens DRIVE-CLiQ- bzw. eine Debugschnittstelle.

Tabelle 1. Übersicht über die verwendeten Komponenten

Typ	Vorspannung		
	[%]	Klasse	qualitativ
Kugelgewindetrieb (KGT)	2,4	C3	hoch
	4,0	C2	mittel
Profilschienenführungsschuh (PFS)	-	C3	hoch
	-	C2	mittel

Detektion von Vorspannungsverlusten anhand der modalen Parameter

Im Gegensatz zu anderen Arbeiten auf diesem Gebiet [3, 4, 7, 8, 12] soll der aktuelle Verschleißzustand hier direkt anhand der Verschlechterung des dynamischen Verhaltens bestimmt werden. Um dieses zu messen, wurden alle Achsen auf eine definierte, mittlere Position gefahren. Anschließend wurde für den Motorstrom der X-Achse ein sinusförmiges Sollsignal mit linear ansteigender Frequenz von 1 Hz bis 500 Hz vorgegeben. Mit diesem Frequenzbereich kann das relevante Maschinenverhalten vollständig abgebildet werden [13]. Die Amplitude des Signals wurde dabei so gewählt, dass unter Einbeziehung der Reglerparameter eine Sollgeschwindigkeit von 400 mm/min zu erwarten war. Diese erwies sich als ausreichend groß für ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis an den Messpunkten und als klein genug, um den maximal zulässigen Motorstrom nicht zu überschreiten. Synchron zur Anregung wurden die Signale des in die Profilschienenführung integrierten Beschleunigungssensors gemessen. Bild 3 zeigt die Messsignale sowohl im Zeitbereich als auch nach einer Fast Fourier Transformation (FFT) für neuwertige (Vorspannungsklasse C3, blau) und leicht verschlissene (Vorspannungsklasse C2, rot) PFS und KGTs. Während im Zeitsignal kaum Unterschied zu erkennen ist, zeigt vor allem der dargestellte Ausschnitt der FFT der Signale eine deutliche Veränderung des dynamischen Verhaltens des Systems. Es ist ersichtlich, dass sich die ursprünglich bei 116 Hz, 166 Hz und 192 Hz befindlichen Eigenmoden sich mit abnehmender Vorspannung und damit geringerer Steifigkeit zu niedrigeren Frequenzen verschieben, sich deren Amplitude erhöht und sich das dynamische Gesamtverhalten des Systems demzufolge verschlechtert.

Trennung von Verschleißeffekten mit Modellwissen

Um die Verschlechterung des dynamischen Verhaltens auf einzelne Komponenten zurückzuführen, kann auf zwei unterschiedliche Ansätze zurückgegriffen werden. Zum einen kann neben dem PFS ein zusätzlicher Beobachtungspunkt an der Kugelgewindetriebmutter eingerichtet werden. Bild 4 (a) zeigt einen Ausschnitt der Amplituden im Frequenzbereich an den Messpunkten Kugelgewindetriebmutter (KGT, blau) und Profilschienenführungsschuh (PFS, rot) und zugehörige, simulierte Eigenschwingformen

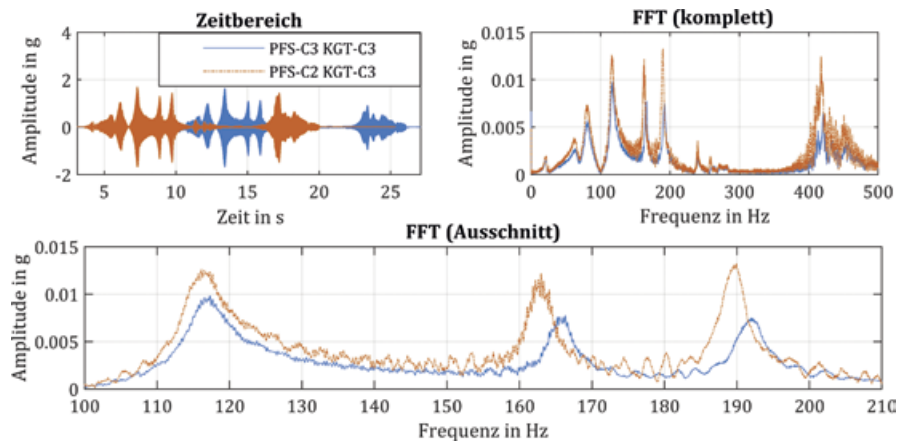


Bild 3. Zeitsignal und Fast Fourier Transformation (FFT) der Beschleunigungssignale in X-Richtung für neue (blau) und verschlissene (rot) Kugelgewindetriebe und Profilschienenführungsschuh. Die Notation besteht aus einer Abkürzung für die Komponente gepaart mit der Vorspannungsklasse und bezieht sich auf Tabelle 1

reich an beiden Messpunkten. Es ist erkennbar, dass die Eigenschwingformen bei 166 Hz und 192 Hz nur an den PFS gut beobachtbar sind, während die Mode bei 116 Hz auch an der KGT-Mutter gut sichtbar ist. Zu dieser Erkenntnis lässt sich auch durch die Nutzung von Modellwissen gelangen. Beispielsweise zeigen Bild 4 (b) und (c) simulierte Eigenschwingformen des Versuchsstand, die aus einem Finite-Elemente-Modell [14] gewonnen wurden. Dort ist ersichtlich,

dass die Mode bei 116 Hz wenig Bewegung im Bereich der KGT-Mutter aufweist. Im Gegensatz dazu führt vor allem die Mode bei 166 Hz zu Querbewegungen im Bereich der PFS. Dies lässt darauf schließen, dass Verschleiß und der damit einhergehende Vorspannungsverlust am KGT in erster Linie zu einer Änderung im Übertragungsverhalten bei 116 Hz und an den PFS vor allem zu Veränderungen bei 166 Hz und 192 Hz führt. Ein ähnliches Bild ergibt die Gegenüberstellung

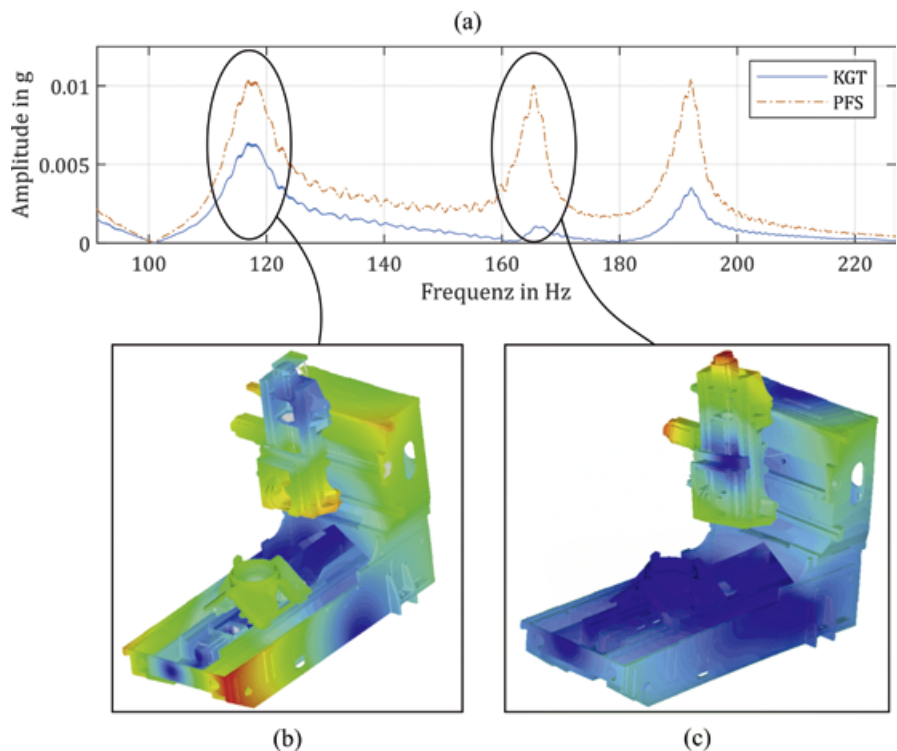


Bild 4. Ausschnitt der Amplituden der Beschleunigungssignale im Frequenzbereich an den Messpunkten Kugelgewindetriebmutter (KGT, blau) und Profilschienenführungsschuh (PFS, rot) und zugehörige, simulierte Eigenschwingformen

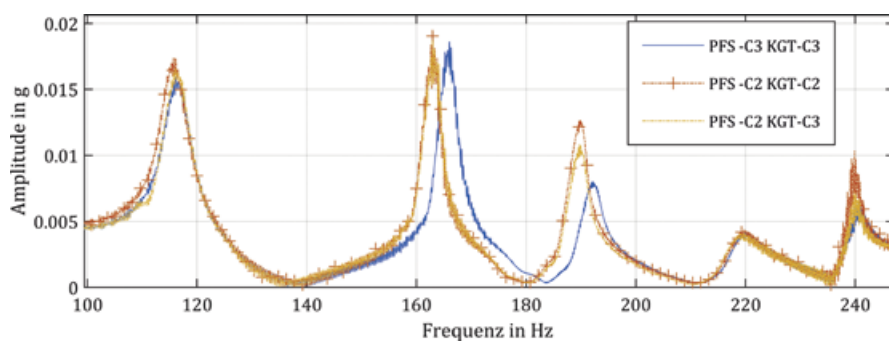


Bild 5. Ausschnitt der Amplituden der Beschleunigungssignale für neuwertigen (blau), verschlissenen (rot) und gemischten (gelb) Zustand. Die Notation besteht aus einer Abkürzung für die Komponente gepaart mit der Vorspannungsklasse und bezieht sich auf Tabelle 1

des neuwertigen, verschlissenen und gemischten Zustands des Vorschubantriebs in Bild 5. Dort ist erkennbar, dass die Kombination aus neuwertigen KGT und verschlissenen PFS bei 116 Hz leicht dem neuwertigen, bei 166 Hz und 192 Hz deutlich dem verschlissenen Zustand folgt. Daraus lässt sich folgern, dass durch die Betrachtung charakteristischer Moden gezielte Rückschlüsse auf die verschlissenen Komponenten möglich sind.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde gezeigt, wie mithilfe integrierter Sensorik ein Vorspannungsverlust im Antriebsstrang einfach und kostengünstig erkannt werden kann. Mit zusätzlicher Sensorik oder der Nutzung von Modellwissen ist darüber hinaus sogar ein gezielter Rückschluss auf verschlissene Komponenten möglich. Die dabei durchgeführte, gezielte Analyse des dynamischen Verhaltens des Antriebsstranges stellt die größtmögliche Profitabilität des Zerspanprozesses, also eine hohe Positionierpräzision bei hoher Anlagenverfügbarkeit sicher.

In einem nächsten Schritt sollen optimale Beobachtungspunkte entlang der Vorschubachse analysiert und die hier gezeigten Verschleißeffekte quantifiziert werden. Darauf aufbauend soll ein voll automatisierter Testzyklus zur Systemidentifikation entwickelt werden. Die hier gezeigte Zustandsüberwachung bildet außerdem die Basis für eine weiterführende prädiktive Wartung, mithilfe derer die Restlebensdauer des Antriebsstranges vorhergesagt werden kann. Dafür werden neben historischen Verschleißzuständen auch Informationen über die zu erwartende Belastung der Komponenten benötigt.

Literatur

- Verl, A.; Heisel, U.; Walther, M.; Maier, D.: Sensorless Automated Condition Monitoring for the Control of the Predictive Maintenance of Machine Tools. *CIRP Annals* 58 (2009) 1, S. 375–378
- Zaeh, M.; Kleinwort, R.; Fagerer, P.; Altintas, Y.: Automatic Tuning of Active Vibration Control Systems Using Inertial Actuators. *CIRP Annals* 66 (2017) 1, S. 365–368.
- Walther, M.: Antriebsbasierte Zustandsdiagnose von Vorschubantrieben. Zugl.: Dissertation, Universität Stuttgart, ISW/IPA 2011. Band 183: Forschung und Praxis. Jost-Jetter, Heimsheim 2011
- Maier, D.: Sensorlose online Zustandserfassung von Vorschubantriebskomponenten in Werkzeugmaschinen. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2014. Band 157: Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente, Antriebstechnik, CAD, Dichtungen, Zuverlässigkeit. IMA, Stuttgart 2015
- Zhai, S.; Reinhart, G.: Predictive Maintenance als Wegbereiter für die instandhaltungsgerechte Produktionssteuerung. *ZWF* 113 (2018) 5, S. 298–301
- Farrar, C.; Worden, K.: *Structural Health Monitoring*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK 2012
DOI: 10.1002/9781118443118
- Tsai, P.; Cheng, C.; Hwang, Y.: Ball Screw Preload Loss Detection Using Ball Pass Frequency. *Mechanical Systems and Signal Processing* 48 (2014) 1–2, S. 77–91
- Chang, J.-L.; Chao, J.-A.; Huang, Y.-C.; Chen J.-S.: Prognostic Experiment for Ball Screw Preload Loss of Machine Tool through the Hilbert-Huang Transform and Multi-scale Entropy Method. 2010 International Conference on Information and Automation (ICIA): The 2010 IEEE International Conference on Information and Automation. IEEE 2010, S. 376–380
DOI: 10.1109/ICINFA.2010.5512064
- Altintas, Y.; Park, S.: Dynamic Compensation of Spindle-Integrated Force Sensors. *CIRP Annals* 53 (2004) 1, S. 305–308
- Holm-Hansen, B.; Gao, R.: Structural Design and Analysis for a Sensor-integrated Ball Bearing. *Finite Elements in Analysis and Design* 34 (2000) 3–4, S. 257–270

- Luo, M.; Luo, H.; Axinte, D.; Liu, D.; Mei, J.; Liao, Z.: A Wireless Instrumented Milling Cutter System with Embedded PVDF Sensors. *Mechanical Systems and Signal Processing* 110 (2018), S. 556–568
DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.03.040
- Hillenbrand, J.; Spohrer, A.; Fleischer, J.: Zustandsüberwachung bei Kugelgewindtrieben – Integration von DMS-Sensorik in Kugelgewindtriebemuttern. *wt Werkstattstechnik online* 108 (2018) 7/8, S. 493–498
- Rebelein, C.; Vlacil, J.; Zaeh, M.: Modeling of the Dynamic Behavior of Machine Tools: Influences of Damping, Friction, Control, and Motion. *Production Engineering Research and Development* 11 (2017) 1, S. 61–74
- Rebelein, C.; Semm, T.; Zäh, M.: Simulation von Dämpfungseffekten in der gesamten Werkzeugmaschinenstruktur. *ZWF* 112 (2017) 11, S. 736–740

Die Autoren dieses Beitrags

Johannes Ellinger, M.Sc., geb. 1990, studierte Maschinenbau an der Technischen Universität München und ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am *iwb*.

Maximilian Benker, B.Sc., geb. 1990, studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der Technischen Universität Berlin und ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am *iwb*.

James Rowe, M.Sc., geb. 1994, studierte Maschinenbau an der Technischen Universität Troyes und war im Rahmen eines Praktikums am *iwb* tätig.

Robin Kleinwort, M.Sc., geb. 1988, studierte Maschinenbau an der Technischen Universität München und ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am *iwb*.

Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh, geb. 1963, leitet seit 2002 gemeinsam mit Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart das Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Dr. Sebastian Unsleber, geb. 1987, ist Projektleiter bei der Bosch Rexroth AG in Schweinfurt. Nach dem Studium der Nanostrukturtechnik an der Julius-Maximilians-Universität Würzburg promovierte er am Lehrstuhl für Technische Physik in Würzburg.

Summary

Condition Monitoring for Feed Drives Using Embedded Sensors – For maximizing the profitability of cutting operations the actual condition of the used machine-tools must be precisely known. This can be done by continuous condition monitoring. Using new sensors directly embedded in the feed drive system is an enabler for simple and low-cost condition monitoring. It is possible to use the dynamic behaviour of the feed drive as an indicator for wear. This way, high availability as well as high machining precision can be ensured.

Bibliography

DOI 10.3139/104.112046
 ZWF 114 (2019) 3; page 115–118
 © Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
 ISSN 0032–678X