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

doi.org/10.37544/1436–4980–2024–05–49

Kegelrollenlager in der Hauptspindel

Erhöhte Prozessstabilität durch Kegelrollenlager

M. Gärtner, R. Klimaschka, C. Brecher, S. Neus

ZUSAMMENFASSUNG Anhand von Schnittversuchen an Stahl wird die verbesserte Stabilität einer Kegelrollenlagerspindel gegenüber einer Standardspindel mittels eines neuen, beschleunigten Messverfahrens demonstriert.

STICHWÖRTER

Werkzeugmaschinen, Messtechnik, Fräsen

Increased process stability due to tapered roller bearings

ABSTRACT Cutting tests on steel are used to demonstrate the improved stability of a tapered roller bearing spindle compared to a conventional spindle using a new fast measuring method.

1 Einleitung

Um die Fertigungsgenauigkeit bei der Bearbeitung von hochlegierten Stählen zu verbessern, muss die Tragfähigkeit und Steifigkeit der Hauptspindel erhöht werden. Dazu können zum Beispiel die konventionell verwendeten Schrägkugellager durch ein gleichgroßes Kegelrollenlager (KR) ersetzt werden, das aufgrund seiner größeren Wälzkontaktfläche diese Anforderungen erfüllt. Ein Nachteil von Kegelrollenlagern ist jedoch deren niedrige Drehzahleignung aufgrund der hohen Gleitreibungsanteile, vor allem im Rolle-Bord-Kontakt (RBK). Deshalb finden KR selten Anwendung in der Hauptspindel, wie zum Beispiel bei einem Winkelfräskopf mit niedrigen Drehzahlen und hohen Lasten [1].

Generell wurden in der Vergangenheit die Drehzahlgrenzen von KR bereits erforscht. Die NASA untersuchte Prototypen-KR mit einer Innenringbordschmierung bei Axiallasten von 53,4 kN und Radiallasten von 26,7 kN bei einem Drehzahlkennwert von $2{,}45*10^6$ mm/min [2]. Die Schmiermengen waren jedoch für die Anwendung in der Hauptspindel mit bis zu 906 l/h unverhältnismäßig hoch. Für Anwendungen in der Automobilindustrie wurde ein KR mit einem geometrisch optimierten RBK entwickelt und getestet [3]. Mit dem neuen Prototypenlager konnte die Reibung im Vergleich zum Standardlager um bis zu 80 % reduziert werden, jedoch wurden nur Drehzahlkennwerte bis $0{,}26*10^6$ mm/min untersucht. In [4] wurde ein neues KR mit erhöhter Rollendichte und mit einem reibungsminimierten Käfigdesign zur Steigerung der Steifigkeit und Lebensdauer erfolgreich getestet. Die Tests beschränkten sich auch in diesem Fall auf niedrige Drehzahlkennwerte von $0{,}25*10^6$ mm/min.

Für den Einsatz in der Hauptspindel wurde in [5] ein spezielles KR für den Einsatz in der Hauptspindel für Drehzahlkennwerte bis 1,25*10^6 mm/min erfolgreich validiert. Das Lager zeichnet sich durch einen Öl-Luft-geschmierten Außenringbord aus, zudem bestehen die Rollen aus Siliziumnitrid zur Verbesserung der Reibeigenschaften des KR. Ein vergleichbares Lager, das ähnliche Drehzahlkennwerte erreicht, wird in [6] validiert.

In einem weiteren Ansatz zur Reduzierung der Reibung von KR werden Mikroeindrücke in die Oberfläche des Bordes gebracht, die zur Öl-Speicherung dienen und den Lagerverschleiß minimieren sollen [7]. Die Anwendung beschränkt sich jedoch auch hier wieder auf den Automobilbereich bei Tests mit vergleichsweise niedrigen Drehzahlen.

Die bisher geleisteten Arbeiten zeigen, dass KR für die Gestaltung im Hochdrehzahlbereich, bedingt durch teurere Materialien und genauere Fertigungsgenauigkeiten, erheblich verändert werden müssen. Aktuelle Ergebnisse zeigen, dass bereits mit Standardkegelrollenlagern mit ausreichender Schmierstoffeinspritzung spindelrelevante Drehzahlkennwerte von knapp $1*10^6$ mm/min erreicht werden können [8]. Deshalb wurde eine fremdgetriebene Hauptspindel in einer 4-Achs-Bearbeitungsmaschine mit einem elastisch vorgespannten KR entwickelt und in Schnittversuchen an einem Aluminiumblock getestet [9]. Die KR-Spindel zeigte signifikant reduzierte Verlagerungswerte in radialer Richtung während der Schnittversuche. Fortführend zu den Versuchen ergibt sich die Frage, inwiefern auch die Stabilität der Spindel im Bearbeitungsprozess durch den Einsatz von KR verbessert werden kann. Zudem ist auch das Betriebsverhalten bei schwerer zu bearbeitenden Materialien von Interesse.

2 Versuchsaufbau und Messmethodik

Im Folgenden werden die Versuchsspindeln mit der integrierten Sensorik sowie die neue, effiziente Methodik zur Bestimmung der Spindelstabilität vorgestellt. Anschließend werden die Frequenzgänge und das gemessene Stabilitätsverhalten beider Spindeln miteinander verglichen.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-49 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

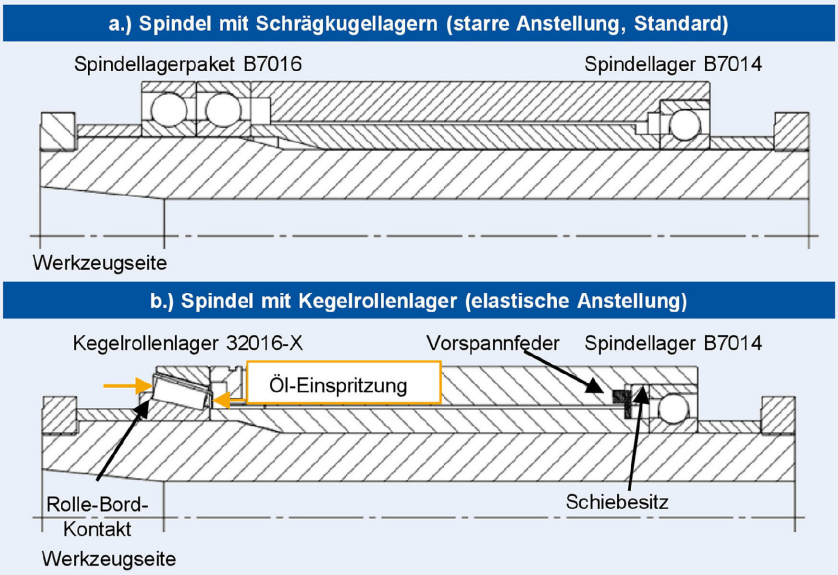

Bild 1. a.) Spindel mit Schrägkugellagern (Standardspindel) b.) Elastisch angestellte Kegelrollenlagerspindel. *Grafik: WZL RWTH*

2.1 Versuchsspindeln

Die Hauptspindel mit den beiden zu untersuchenden Lagerungsvarianten ist exemplarisch in **Bild 1** dargestellt. Es handelt sich um eine fremdgetriebene Spindel, welche standardmäßig mit einem starr angestellten Schrägkugellagerpaket (SLP) ausgeführt ist, das mit 500 N vorgespannt ist.

Diese wird in einer 4-Achs-Bearbeitungsmaschine eingesetzt, die eine maximale Drehzahl von 10 000 min^{-1} erreichen kann. Bei KR stellt sich unter hohen Drehzahlen reibungsbedingt eine inhomogene Temperaturverteilung ein [10]. Da dieser Einfluss sich in einer starren Anstellung vorspannungsreduzierend auswirken kann, wurde für die KR-Spindel eine elastische Anstellung gewählt, welche für einen weiten Drehzahlbereich eine nahezu konstante Vorspannung gewährleistet und eine axiale thermische Dehnung der Welle kompensieren kann. Das eingesetzte KR des Typs „32016-X“ muss mit 2600 N im Vergleich zum SLP deutlich stärker vorgespannt werden, damit es nahezu schlupffrei abrollen kann. Das KR weist zwar eine Grenzdrehzahl von 5000 min^{-1} auf, kann aber mit einer Öl-Luft-Schmiermenge von 960 µl/h auch bei deutlich höheren Drehzahlen betrieben werden. Für die Versuche wurde ein feinstfiltriertes Öl der ISO-VG-68-Klasse eingesetzt, das auf beiden Seiten axial in das Lager eingespritzt wurde.

Um zu bewerten, ob KR für den Einsatz in der Hauptspindel geeignet sind, wird das Stabilitätsverhalten beider Spindeln im Bearbeitungsversuch anhand eines neuen, beschleunigten Messverfahrens untersucht.

2.2 Effizientes Messverfahren zur Spindelstabilität

In konventionellen Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der dynamischen Prozessgrenzen werden typischerweise Vollnutenschnitte mit definierter Schnitttiefe a_p und Drehzahl n durchgeführt [11]. Ob ein Schnitt stabil oder instabil ist, kann in der Praxis anhand verschiedener Kriterien bewertet werden. Beispiele sind ein erhöhter Geräuschpegel, Rattermarken auf der Werkstückoberfläche oder sensorbasierte Auswertungsmethoden auf Basis von Beschleunigungssensoren oder Mikrofonen. Nach Instabilitätsdetektion wird ein neuer Schnitt mit neuem, aber während der Bearbeitung konstant gehaltenem a_p und n durchgeführt. Die gefundenen Stabilitätsgrenzen werden im Anschluss in einer sogenannten Stabilitätskarte visualisiert, auf der die Schnitttiefe über die Spindeldrehzahl aufgetragen wird.

Da die Parameter nur nach jedem Schnitt sowie in der Regel manuell angepasst werden, ist das konventionelle Verfahren sehr zeitaufwendig und kostenintensiv. Deshalb wurde eine beschleunigte und automatisierte Methode dieses Verfahrens vorgestellt und validiert [12]. Dabei werden Schwingungsdaten am Spindelgehäuse mittels einer Mess- und Steuerungssoftware, welche mit der Maschine gekoppelt ist, erfasst und mithilfe eines Ratterindikators in Echtzeit ausgewertet. Gleichzeitig wird der Stabilitätszustand im Interpolationstakt abgefragt, wodurch der Vorschub latenzarm gestoppt wird, sobald Rattern auftritt.

Die neue Vorgehensweise gliedert sich in zwei Schritte. Zuerst wird bei konstanter Drehzahl die Schnitttiefe durch Rotation der Tischachse während eines Schnitts kontinuierlich erhöht. Zeitgleich werden durch die automatisierte Steuerung die für die Rattererkennung notwendigen Schwingungsdaten aufgenommen. Je nach Breite des Rattersacks können drei bis vier Messungen bei Schnitttiefenvariation bereits ausreichend sein. Im zweiten Schritt wird die Schnitttiefe konstant gehalten und die Drehzahl stetig während eines Nutenschnittes kontinuierlich verändert. Zwischen den Versuchen extrapoliert das Programm neue Schnittparameter und Schnittbahnen unter Berücksichtigung des aktuellen Bearbeitungszustands in Form eines digitalen Zwillings des Werkstücks. Das Endergebnis der Versuchsreihe ist ein Stabilitätskartenausschnitt, der sogenannte Rattersack, der den stabilen und instabilen Betriebsbereich der Spindel charakterisiert, welcher qualitativ in **Bild 2** a.) gezeigt ist.

Die für den automatisierten Ablauf notwendige, sensorbasierte Rattererkennung basiert auf der Poincaré-Abbildung. Der Ratterindikator RI wurde aufbauend auf den Arbeiten von [13] und [14] entwickelt und ist gemäß Gleichung (1) definiert:

$$RI = \frac{s_{Bx} \cdot s_{By}}{s_{Tx} \cdot s_{Ty}} \quad (1)$$

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-49 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

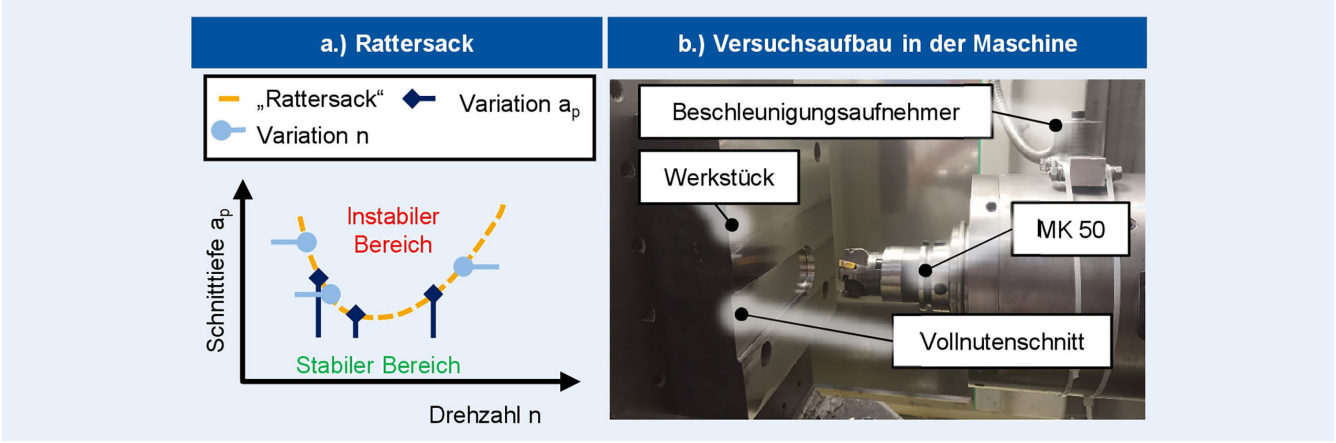

Bild 2. a.) Exemplarischer Rattersack und b.) Versuchsaufbau zur Stabilitätsuntersuchung in der Maschine. *Foto: WZL RWTH*

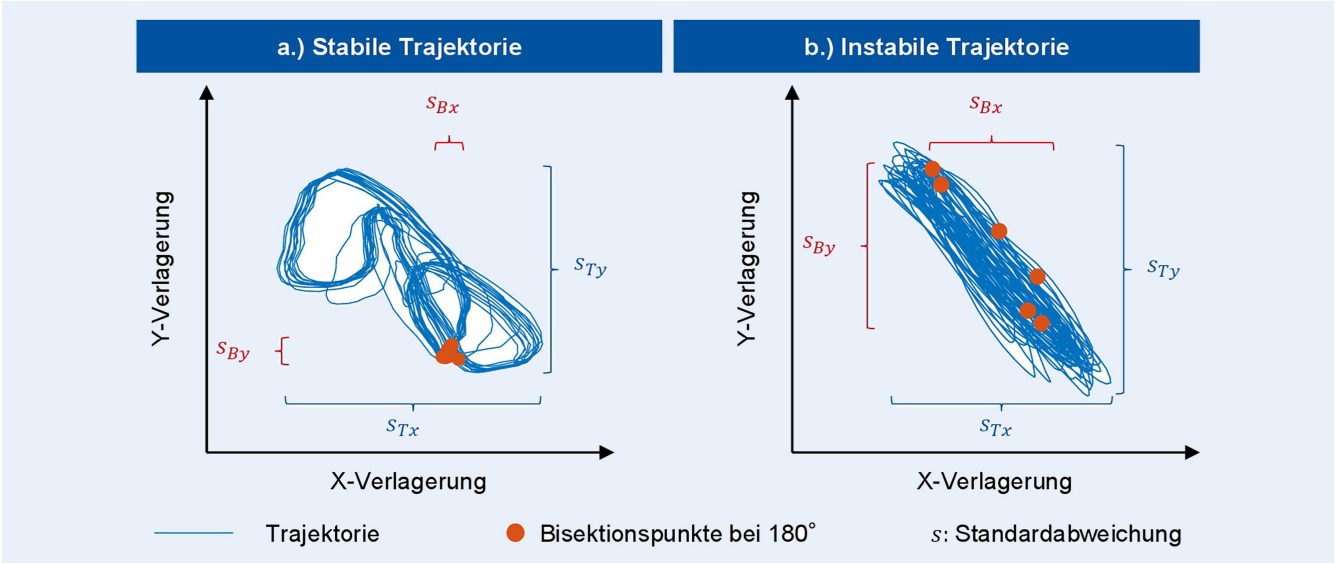

Bild 3. a.) Stabile und b.) instabile Trajektorie in radialer Richtung einer Spindel. *Grafik: WZL RWTH*

Die Standardabweichung der Bisektionspunkte (s_{Bx}, s_{By}) und der Trajektorie (s_{Tx}, s_{Ty}), aus denen sich dieser Kennwert bestimmen lässt, sind in **Bild 3** für die Bisektionspunkte für 180° veranschaulicht.

In [12] wurde mit der hier vorgestellten Standardspindel bereits ein solcher Rattersack ermittelt. Die Betriebsbedingungen dienen als Grundlage für die hier vorgestellten Untersuchungen. Es wurden Schnittversuche an einem C45-Stahlblock mit einem Messerkopf (MK50) durchgeführt. Der Versuchsaufbau dazu ist in Bild 2 b.) dargestellt. Der Ratterindikator wird alle 0,1 s berechnet. Bei Überschreitung des Indikators in Bezug auf die vorherigen Zeitpunkte um einen empirisch ermittelten Schwellwert wird Rattern detektiert. Dafür wurden verschiedene Kriterien (Sprung, Trend, Gradient) definiert [15]. Da sich die neue Methode noch in der Validierungsphase befindet und der Algorithmus zur Extrapolation der Schnittparameter weiter optimiert werden muss, sind zusätzliche Tests wie der mit der KR-Spindel erforderlich. Erst nach diesen Tests kann das Verfahren in einen industriellen Standard überführt werden.

3 Ergebnisse der Stabilitätsuntersuchungen

Im Folgenden werden die Untersuchungsergebnisse in der Maschine vorgestellt. Zunächst werden anhand von Frequenzgangmessungen potenziell instabile Betriebsbereiche identifiziert. Anschließend wird, anhand eines konkreten Fallbeispiels eines Rattersacks, die neu entwickelte beschleunigte Messmethodik angewandt, um das Stabilitätsverhalten einer KR-Spindel mit einer Standardspindel mit einem SLP zu vergleichen.

3.1 Frequenzgangmessungen

Um das dynamische Verhalten von Hauptspindeln zu charakterisieren, eignen sich Frequenzgangmessungen (FRF, Frequency Response Function). Dabei wird das Werkzeug in definierten Raumrichtungen angeregt und dessen Schwingungsverhalten im Frequenzbereich hinsichtlich der Schwingungsamplitude und des Phasenganges ausgewertet. So kann man mögliche instabile Betriebsbereiche ermitteln, die im Prozess vermieden oder verbessert werden müssen. Der Aufbau zur Messung einer FRF mit einem manuellen Impulshammer, mit dem auch die beiden Spindeltypen analysiert wurden, ist exemplarisch für einen Messer-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-49 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

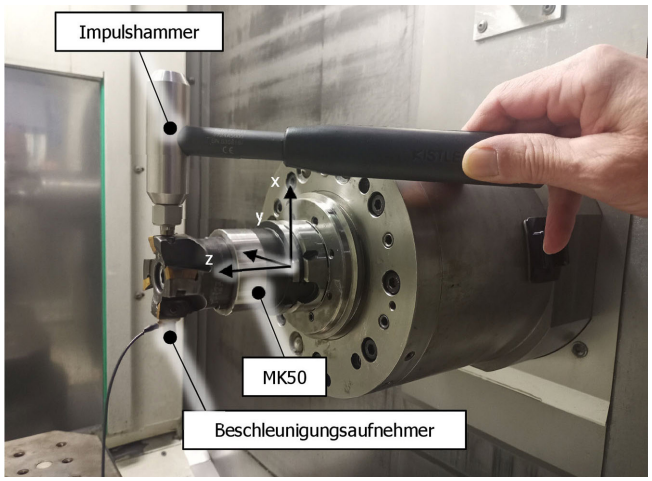

Bild 4. Exemplarischer Aufbau zur FRF (Frequency Response Function)-Messung mit einem manuellen Impulshammer am Messerkopf (MK50). *Foto: WZL RWTH*

kopf (MK50) bei Anregung in X-Richtung in **Bild 4** dargestellt. Das Antwortverhalten wird direkt am Werkzeug in unmittelbarer Nähe zur Anregungsstelle durch einen piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer gemessen.

Die FRF-Messungen für die KR-Spindel und die Standardspindel mit einem SLP zeigt **Bild 5** in den drei Raumrichtungen mit einem detailliertem Ausschnitt des Phasengangs in Y-Richtung. Im Bereich bis 200 Hz ist der Amplitudengang beider Spindeln in X- und Y-Richtung ähnlich. Dies ist dadurch zu erklären, dass hier primär der Frequenzgang von den großen und schweren Antriebskomponenten beeinflusst wird, welche bei beiden Spindeln gleichgeblieben sind. In Z-Richtung, das heißt in axialer Richtung, kommt es bei 730 Hz bei der Standardspindel zu einem Amplitudenpeak von etwa 0,006 µm/N. Der Amplitudengang der KR ist wesentlich flacher und gedämpfter. Generell kann das Stabilitätsverhalten durch den Phasengang beurteilt werden. Fällt die Phase unter -90° kann im Betrieb ein instabiles Verhalten der Spindel auftreten. Ein vergrößerter Ausschnitt des Phasengangs in Y-Richtung ist im unteren Teil von Bild 5 bis 200 Hz gezeigt. Im Bereich zwischen 161 Hz und 192 Hz fällt

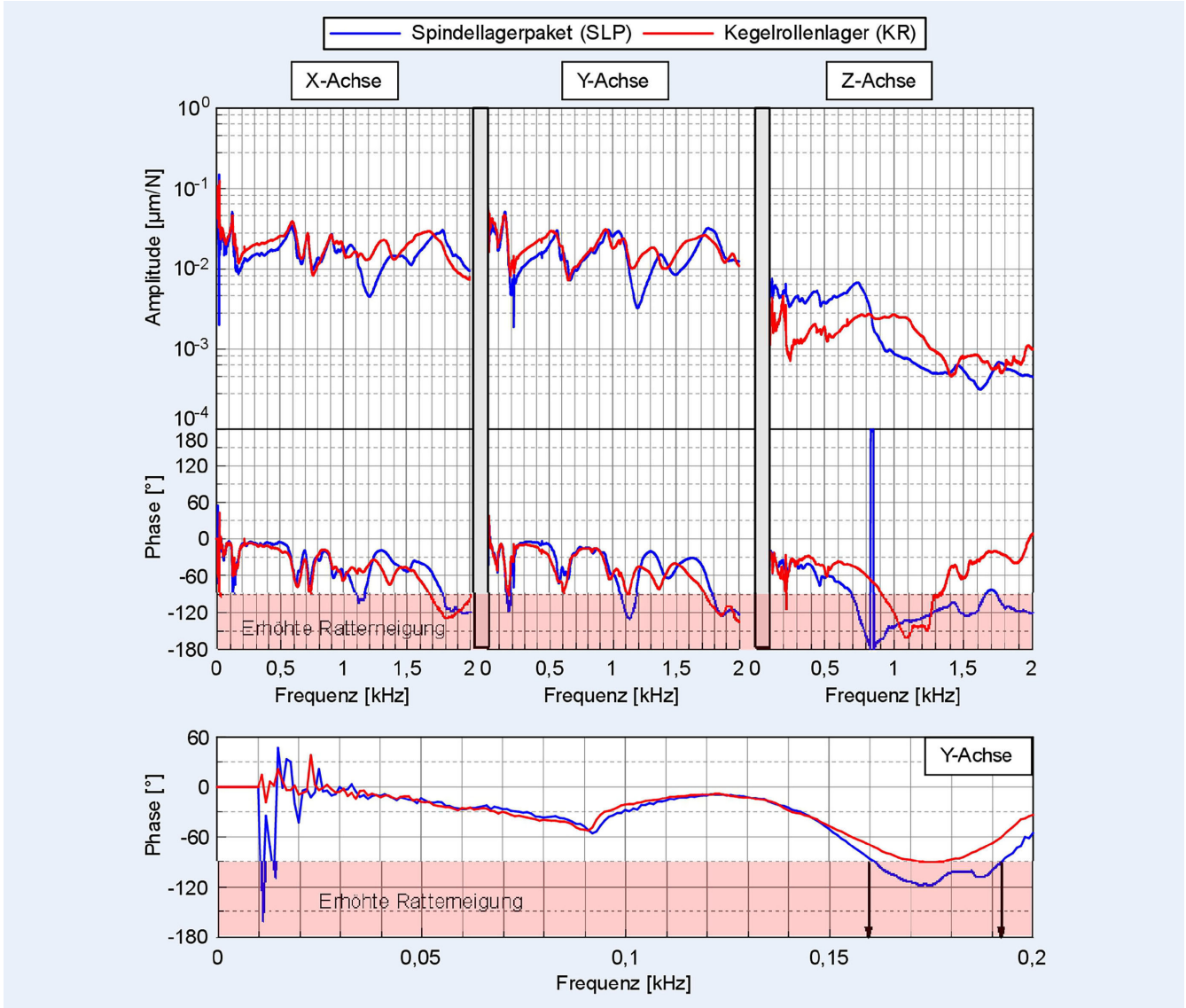

Bild 5. FRF-Messungen in X-, Y- und Z-Richtung mit dem MK50-Werkzeug mit detaillierter Phase in Y-Richtung. *Grafik: WZL RWTH*

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-49 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

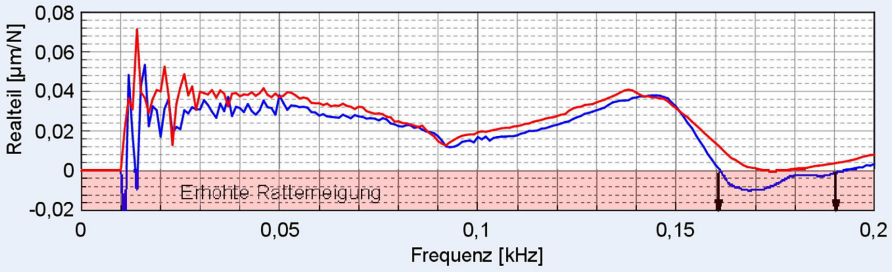

Bild 6. Realteil in Y-Richtung abhängig von der Frequenz. *Grafik: WZL RWTH*

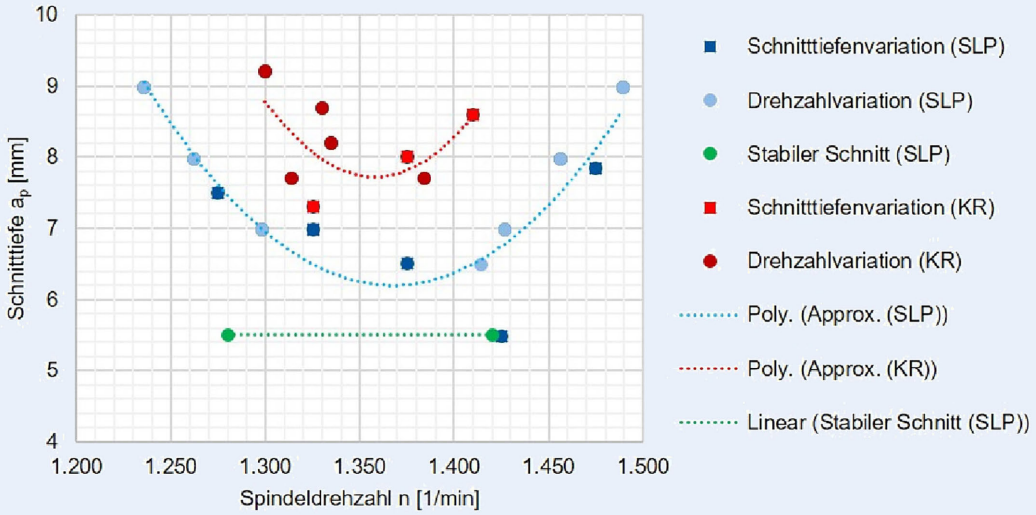

Bild 7. Rattersack der Standardspindel (SLP) und der Kegelrollenlagerspindel (KR) im Vergleich. *Grafik: WZL RWTH*

die Standardspindel unter diesen kritischen Wert. Für diesen Bereich ist tendenziell ein instabiles Verhalten zu beobachten.

Die erhöhte Stabilität der KR-Spindel gegenüber der Standardspindel lässt sich auch anhand des gemessenen Realanteils in Abhängigkeit der Frequenz veranschaulichen, wie in **Bild 6** zu sehen. Je kleiner der negative Realanteil *Re{Gg(jf)}* der Maschine ist, desto größer ist die Prozessstabilität der Spindel einzuschätzen [11]. Im Falle der Standardspindel wird der Realteil erneut zwischen 161 Hz und 192 Hz negativ, die KR-Spindel wird nur geringfügig negativ.

Die minimale kritische Grenzspannungsbreite $b_{krit,min}$ im Prozess kann dann mit Gleichung (2) in Abhängigkeit der dynamischen Schnittsteifigkeit k_{cb} ermittelt werden.

$$b_{krit,min} = \frac{1}{2k_{cb}\left|Re\{G_g(jf)\}_{neg}\right|_{max}} \qquad (2)$$

Die Analyse der FRF-Messungen zeigen die erhöhte Prozessstabilität der KR-Spindel und können einen Anhaltspunkt für die Versuchsdefinition von Stabilitätsuntersuchungen dienen. In den nachfolgenden Bearbeitungsversuchen wird die Prozessstabilität der KR-Spindel im Vergleich zur Standardspindel mittels des neuen, effizienten Messverfahrens untersucht.

3.2 Schnittversuche in der Spindel

Die Ergebnisse der Stabilitätsuntersuchungen beider Spindeln sind in **Bild** 7 zusammengefasst.

Die Stabilitätsgrenzen der Standardspindel (SLP) sind mit ermittelten Messpunkten jeweils für die Drehzahl- und Schnitttiefenvariation in blau dargestellt. Diese weisen eine gute Vergleichbarkeit zu den Messungen aus [12] auf. Die Messpunkte der KR-Spindel (KR) sind rot. Anhand der Messpunkte wurde der Rattersack mit einer quadratischen Funktion für beide Spindeln angenähert. Im Vergleich zur Standardspindel zeigt die KR-Spindel in den Untersuchungen ein signifikant verbessertes Betriebsverhalten. Der instabile Bereich der KR-Spindel ist wesentlich schmaler hinsichtlich Schnitttiefen und Drehzahlen. Teilweise stellten sich für die KR-Spindel beim Durchfahren des Rattersacks wieder stabile Betriebsbedingungen ein, sodass das Potenzial zur Steigerung der Spindelstabilität noch größer einzuschätzen ist. Ein Vergleich der Prozessverläufe zwischen SLP und KR ist in **Bild 8** dargestellt.

Exemplarisch wird hier ein Prozess mit Schnitttiefenvariation unter gleichen Randbedingungen betrachtet. Beide Schnitte starten bei 3,5 mm Schnitttiefe und halten eine Spindeldrehzahl von 1375 1/min. Der Verlauf des Ratterindikators beginnt mit Eintritt in das Werkstück. Ein initial erhöhter Ratterindikator lässt sich auf das nicht stationäre Einfahrverhalten zurückführen bis das Werkzeug eine Eingriffsbreite von 100 % erreicht hat. Sowohl die SLP als auch die KR weisen ab t = 6 s einen vergleichsweise niedrigen Ratterindikator von nahe 0,02 auf, was auf einen stabilen Prozess hindeutet. Die dazugehörigen Trajektorienverläufe sind im oberen Bereich von Bild 8 dargestellt.

Eine Wiederholbarkeit der Trajektorie sowie Bisektionspunkte geringer Standardabweichung lassen sich für beide Spindeln iden-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-49 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

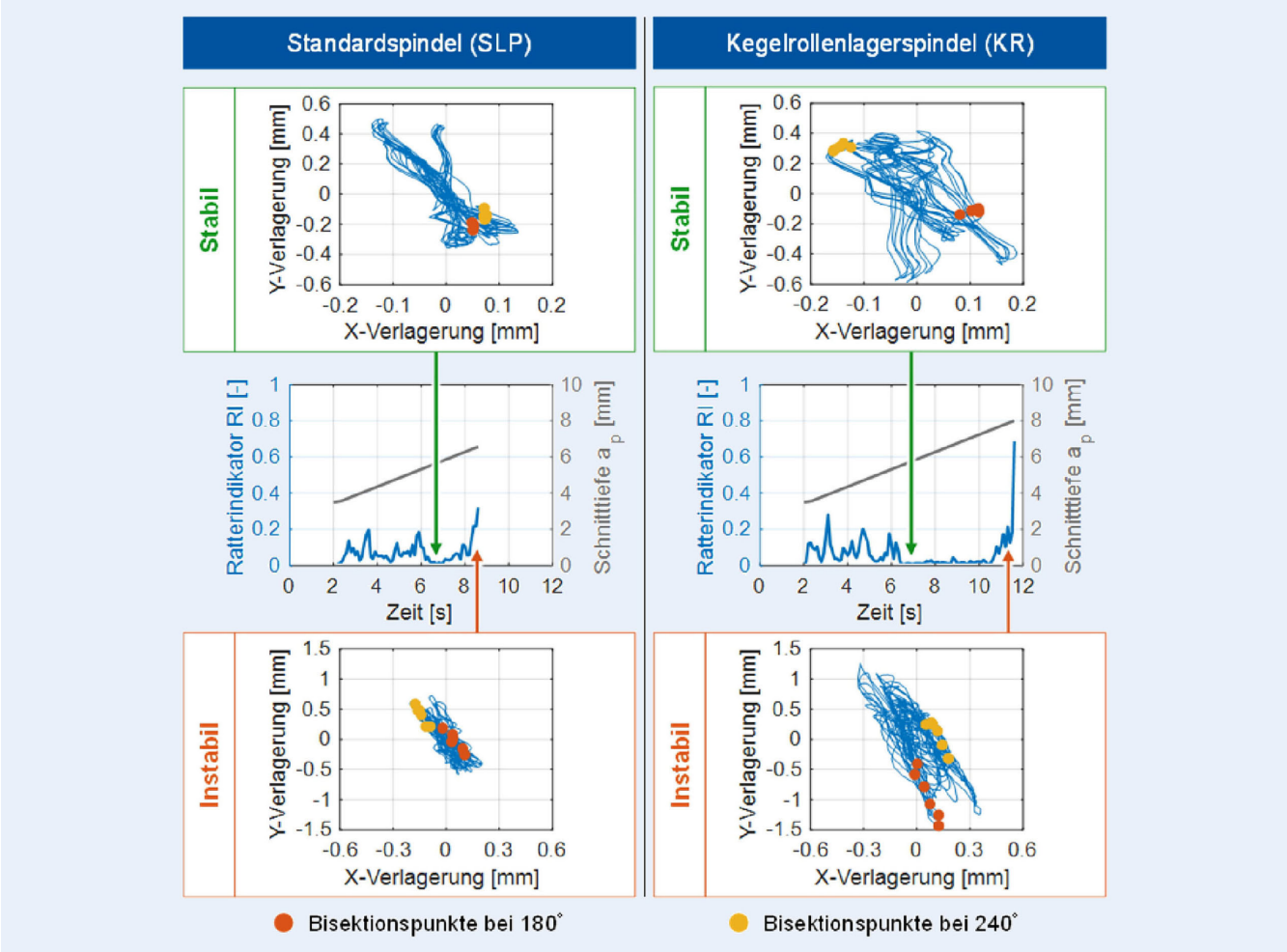

Bild 8. Vergleich der Prozessverläufe von Standardspindel (SLP) und Kegelrollenlagerspindel (KR). *Grafik: WZL RWTH*

tifizieren. Die Trajektorienamplitude ist für die KR um circa 30 % in X-Richtung und um 25 % in Y-Richtung erhöht im Vergleich zur SLP. Eine optimierte Bordgeometrie des Kegelrollenlagers birgt Potenzial zur Reduktion dieses erhöhten Grundschwingungspegels. Der Ratterindikator der SLP steigt bei t = 8,5 s und einer Schnitttiefe von a_p = 6,5 mm mit dem Eintritt in den instabilen Bereich sprunghaft an. Der Vorschub wird gestoppt, die Spindel dreht sich frei und verfährt auf sichere Halteposition. Im Gegensatz hierzu befindet sich die KR-Spindel bei dieser Schnitttiefe noch im stabilen Bereich. Erst bei t = 11,6 s und einer Schnitttiefe von a_p = 8 mm schlägt der Ratterindikator aus. Somit lässt sich mit der KR-Spindel bei einer Drehzahl von 1375 1/min verglichen mit der SLP ein um circa 33 % erhöhtes Materialabtragsvolumen bei stabilen Prozessbedingungen erzielen. Die instabilen Trajektorien kurz vor dem Vorschubstop sind im unteren Bereich Bild 8 aufgezeigt. Neben einer erhöhten Streuung der Bisektionspunkte ist auch der chaotische Verlauf der Verlagerungen in der Bearbeitungsebene ersichtlich. Die instabile Trajektorienamplitude der KR-Spindel ist in X- und Y-Richtung etwa doppelt so hoch wie die SLP. Dies lässt sich zum einen durch die erhöhte Grundschwingungsamplitude sowie den genauen Zeitpunkt der Rattererkennung erklären.

4 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurde eine neue und effiziente Methodik zur Ermittlung der Stabilitäts- und somit auch Leistungsgrenzen von Hauptspindeln vorgestellt. Frequenzgangmessungen beider Spindeltypen lassen auf eine erhöhte Prozessstabilität der KR-Spindel im Vergleich zur Standardspindel mit Schrägkugellagern schließen. Die Stabilitätsuntersuchungen anhand von Vollnutenschnitten an einem Stahlblock mit den beiden Spindeltypen, durchgeführt mit einer neuen effizienten Methodik, bestätigen die Ergebnisse in der Anwendung. Der ermittelte Rattersack zeigte, dass die Spindel mit einem KR in dem betrachteten Drehzahlbereich stabil deutlich höhere Schnitttiefen erreichen kann. Dies kann in der Praxis einen schnelleren Prozess mit einer höheren Fertigungsgüte ermöglichen.

Nichtsdestotrotz müssen dafür noch weitere Feldtests in der Maschine durchgeführt werden. Ein möglicher Ansatzpunkt zur Fortführung der Untersuchungen wäre die Zerspanung eines noch härteren Werkstoffs, wie zum Beispiel Titan. Zudem könnte anhand der Fertigung eines komplexeren Bauteils mit höheren Genauigkeitsanforderungen die verbesserte Fertigungsgenauigkeit der KR-Spindel demonstriert werden. Zur Validierung der Stabi-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-49 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

lität von KR bei höheren Drehzahlen, könnten beispielsweise auch ein Hochdrehzahl-KR mit reibungsoptimierten RBK in der Hauptspindel getestet werden. Die hier durchgeführten Untersuchungen zeigen das Potenzial zur Steigerung der Stabilität von Hauptspindeln durch Kegelrollenlager auf.

FÖRDERHINWEIS

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Projektes „Steigerung der Drehzahleignung von Kegelrollenlagern für den Einsatz in Hauptspindeln“ (GZ: BR 2905/117–1, Projektnummer 519602222).

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich beim Arbeitskreis Spindel-Lager-Systeme für die fachliche Unterstützung bei der Erarbeitung der Ergebnisse. Ein Dank geht auch an die Firma SKF für die Bereitstellung der Kegelrollenlager und an die Firma Klüber für die Bereitstellung der Schmierstoffe.

Literatur

[1] Weck, M.: Werkzeugmaschinen-Atlas. Heidelberg: Springer VDI 1995
[2] Parker, R. J.; Signer, H. R.: Lubrication of High-Speed, Large Bore Tapered-Roller Bearings. Journal of Lubrication Technology 100 (1978) 1, pp. 31–38
[3] Matsuyama, H., Dodoro, H., Ogino, K. et al.: Development of Super-Low Friction Torque Tapered Roller Bearing for Improved Fuel Efficiency. Koyo Engineering Journal 167 (2004), pp. 22–28
[4] Tsujimoto, T.; Mochizuk, J.: High Capacity Tapered Roller Bearings. NTN Technical Review 73 (2005), pp. 30–39
[5] Mori, M.; Kobayashi, T.: High-Speed Tapered Roller Bearing for Machine Tool Main Spindles. NTN Technical Review 74 (2006), pp. 16–23
[6] Brecher, C.; Fey, M.; Bartelt, A. et al. (Hrsg.): Design and test rig experiments of a high speed tapered roller bearing for main spindle applications. Procedia CIRP 46 (2016), pp. 533–536
[7] Chishima, M.: Development of NSK LCube II Tapered Roller Bearings for Electric-Hybrid Vehicles. NSK Motion and Control 31 (2020), pp. 1–7
[8] Gärtner, M.; Brecher, C.; Neus, S. et al.: Lubrication of radial loaded tapered roller bearings under high rotational speeds. Tribology in Industry 45 (2023) 1, pp. 178–190
[9] Gärtner, M.; Brecher, C.; Neus, S. et al.: Stiffness increase in tool spindles by using tapered roller bearings for aluminium cutting tests. Production Engineering Research and Development (2024), doi.org/10.1007/s11740-024-01291-1
[10] Hassis, A.: Untersuchung und Verbesserung des Kontaktverhaltens von Kegelrollenlagern bei hohen Drehzahlen Publications. Dissertation, RWTH Aachen, 2019
[11] Brecher, C.; Weck, M.: Werkzeugmaschinen, Fertigungssysteme. Heidelberg: Springer Vieweg 2017
[12] Brecher, C.; Klimaschka, R.; Steinert, A. et al.: Efficient determination of stability lobe diagrams deploying an automated, data-based online NC program adaption. MM Science Journal (2021), 4, pp. 4830–4835
[13] M.A. Davies; B. Dutterer; J.R. Pratt et al.: On the Dynamics of High-Speed Milling with Long, Slender Endmills. CIRP Annals 47 (1998) 1, pp. 55–60
[14] Brecher, C. (Hrsg.): Realisierung effizienter Zerspanprozesse. Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojekts ReffiZ (Produktentwicklung). Aachen: Shaker Verlag 2015
[15] Brecher, C.; Chavan, P.; Epple, A.: Efficient determination of stability lobe diagrams by in-process varying of spindle speed and cutting depth. Advances in Manufacturing 6 (2018) 3, pp. 272–279

Marcus Gärtner, M.Sc.
m.gaertner@wzl.rwth-aachen.de
Tel. +49 241 / 80-24791
Foto: WZL

Ralph Klimaschka, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher

Dipl.-Ing. Stephan Neus

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Steinbachstr. 19, 52074 Aachen
www.wzl.rwth-aachen.de

LIZENZ

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

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-49 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY