

Bedarfsgerechte Auslegung und Nachschmierung von Vorschubachskomponenten

Schwingungsbasierte Schmierzustandsermittlung in Kugelgewindetrieben

C. Brecher, J. Hameleers, R. Klimaschka, S. Neus

ZUSAMMENFASSUNG Als mechanisches Übertragungselement ist der Kugelgewindetrieb (KGT) zur Vorschuberzeugung in Werkzeugmaschinen (WZM) bewährt und hat in Kraftfahrzeugen (KFZ) die hydraulische Servolenkung verdrängt. Während die intervallgesteuerte Zentralschmierung in WZM oft für eine Überschmierung sorgt, darf die Lebensdauer-schmierung im KFZ nicht zu gering ausfallen. Die Betrachtung der Grundlagen einer schwingungsbasierten Schmierzustandsermittlung soll die bedarfsgerechte Schmierung ermöglichen.

STICHWÖRTER

Automobilindustrie, Werkzeugmaschinen, Sensoren

Vibration-based determination of the lubrication state in ball screws

ABSTRACT As a mechanical transmission element, the ball screw is well-established for generating feed motion in machine tools (MT) and has replaced hydraulic power steering in motor vehicles (MV). While interval controlled central lubrication in MTs often leads to excessive lubrication, the lifetime lubrication in MVs steering must not be insufficient. Examining the fundamentals of vibration-based lubrication, condition monitoring aims to enable demand-oriented lubrication.

1 Einleitung

Der Kugelgewindetrieb (KGT) dient der Wandlung einer Rotations- in eine Translationsbewegung und besteht aus einer Gewindespindel, einer Kugelumlaufmutter und Kugeln, die zwischen den Laufbahnen von Spindel und Mutter abwälzen. Da der vorgespannte KGT eine hohe Steifigkeit, Spielfreiheit und schnelle Vorschübe bei hohen Wirkungsgraden kombiniert, ist die Vorschuberzeugung in Werkzeugmaschinen (WZM) ein gängiges Anwendungsgebiet (**Bild 1** rechts). [1] Im Zuge der Elektrifizierung von Kraftfahrzeugen hat sich der KGT jedoch auch in der Automobilindustrie bewährt. Zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und der damit einhergehenden Verringerung ausgestoßener CO₂-Emissionen wurde die hydraulisch unterstützte Servolenkung in Kraftfahrzeugen durch elektromechanische Lösungen ersetzt. Dabei zeigte sich, dass der Wirkungsgrad konventioneller Ritzel-Zahnstangen-Kombinationen zu gering ist, um hohe Lenkkräfte mit dem 12-V-Kraftfahrzeugbordnetz bereitzustellen. Aufgrund des sehr hohen Wirkungsgrads wurde der KGT als mechanisches Übertragungselement eingeführt, sodass der Lenkimpuls weiterhin über ein Zahnstangenprofil übertragen wird, während die Lenkunterstützung durch den rotatorischen Antrieb der KGT-Mutter erfolgt (**Bild 1** links). Die Bauform „EPSapa“ (eng.: electronic power steering axis parallel) verfügt über einen achsparallel zum Lenkgestänge angeordneten Elektromotor, der die KGT-Mutter über einen Zahnriemen oder eine

Verzahnung in Rotation versetzt und somit die Translationsbewegung des Lenkgestänges unterstützt. [2] Neben den genannten ökologischen Vorteilen erlaubt die unkomplizierte, elektrische Vorgabe von fahrerunabhängigen Zusatzlenkmomenten, im Zusammenspiel mit ausgewählter Fahrzeugumfeldsensorik, die Implementierung von Systemen wie dem Spurhalteassistenten oder dem Parklenkassistenten. [3]

Während diese Fahrassistenzsysteme bereits umfangreich realisiert wurden, ist die Steer-by-Wire-Technologie Teil aktueller und zukünftiger Entwicklungen, die von Unternehmen wie Bosch Mobility, ZF und Thyssen Krupp vorangetrieben werden. Da die direkte mechanische Verbindung zwischen Lenkrad und Lenkung beim Steer-by-Wire-Konzept entfällt, muss der KGT als Teil der Lenkung absolut ausfallsicher sein. Dies steht der reversierenden Betriebsart des KGT gegenüber, durch die ein Teil des Schmierstoffs trotz Abstreifersystem aus der Komponente ausgetragen werden kann. Um Ausfälle durch Mangelschmierung auszuschließen, ist daher die Kenntnis über die Entwicklung des Schmierzustands im KGT essenziell. Eine schwingungsbasierte Schmierzustandsermittlung, die aus dem Forschungsbereich der Werkzeugmaschinen stammt, könnte bei der Auslegung der Komponenten dazu genutzt werden, um den Schmierfilmabriss zu identifizieren und geeignete Gegenmaßnahmen zu entwickeln. Denkbar wären besonders additivierte Fette oder Oberflächenbehandlungen der Laufbahnen, um eine geringere Schmierstoffverdrängung zu gewährleisten.

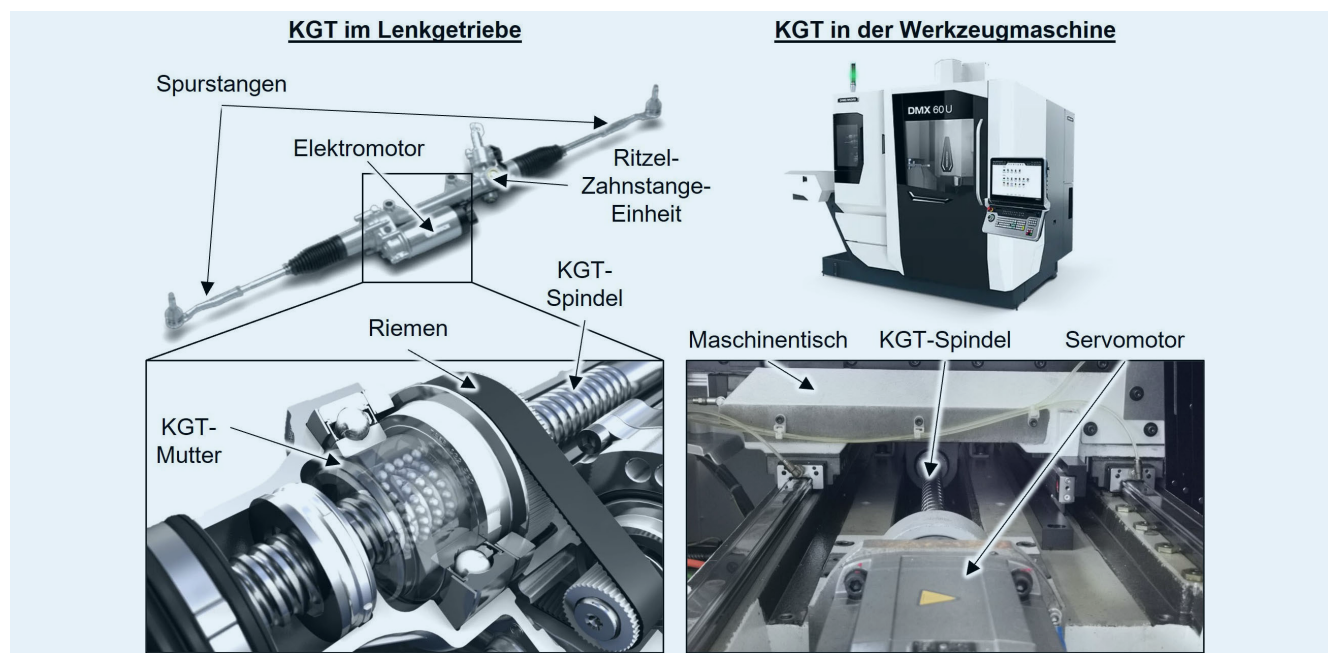


Bild 1. KGT in einer EPSapa Komponente (links) und KGT in einer WZM (rechts). Foto: [4, 5]

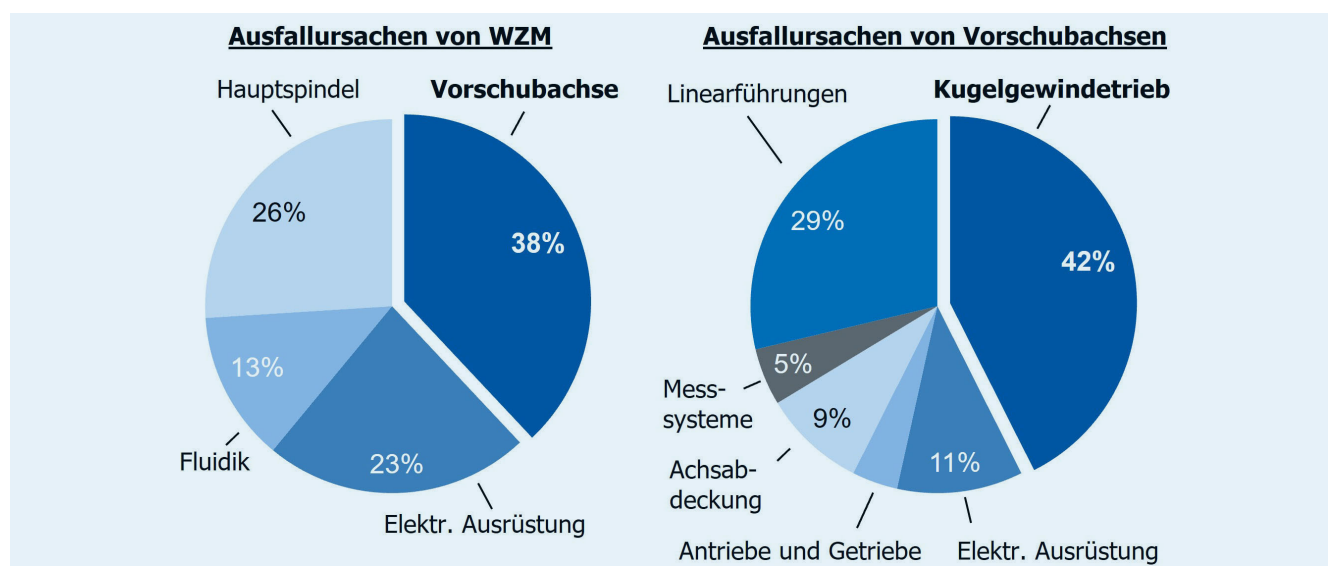


Bild 2. Ausfallursachen von KGT in Werkzeugmaschinen. Grafik: [7]

Die Untersuchung von Grundlagen der schwingungsbasierten Schmierzustandsermittlung am Beispiel einer Komponente aus dem Bereich Werkzeugmaschinen ist Gegenstand dieser Arbeit.

2 Stand der Technik

Die in Kraftfahrzeuglenkungen verbauten KGT werden beim Zusammenbau mit einer Lebensdauerschmierung versehen und als funktionsbereite, endgeprüfte Baugruppe beim Fahrzeughersteller angeliefert. Während hier also keine Nachschmierung innerhalb der Lebensdauer vorgesehen ist, werden KGT in WZM in regelmäßigen Intervallen geschmiert. Die Häufigkeit der Schmierintervalle und die dabei abgegebene Schmierstoffmenge basieren auf Richtwerten der KGT-Hersteller und variieren stark in Abhängigkeit vom Schmierstoff (Öl oder Fett), der KGT-Bau-

größe und der Schmierstrategie (Umlaufschmierung / Ölnebel-schmierung / etc.). [6] Diese Randbedingungen können einerseits für einen unwirtschaftlichen Schmierstoffeinsatz, andererseits für eine Mangelschmierung und damit für einen vorzeitigen Ausfall des KGT sorgen. Wie Bild 2 entnommen werden kann, stellen Schäden an KGT eine der Hauptausfallursachen von Vorschubachsen dar und sind dadurch maßgeblich für Stillstände von WZM verantwortlich. Neben dem Wert des defekten KGT fallen hohe Kosten durch die entstehenden Produktionsrückstände an, was eine Motivation für die Verfügbarkeitssteigerung des KGT darstellt.

Nach [8] gibt es vier Verschleißmechanismen im tribologischen System des KGT: den Ermüdungsverschleiß, den abrasiven Verschleiß, den adhäsiven Verschleiß und die tribochemischen Reaktionen. Der Ermüdungsverschleiß tritt durch zyklische

Belastungen auf und führt zur Oberflächenzerrüttung, während abrasiver Verschleiß durch Relativbewegungen zwischen den Kontaktpartnern entsteht und in Materialabtrag resultiert. Adhäsiver Verschleiß wird durch Mikroverschweißungen und anschließendes Losreißen von Materialpartikeln verursacht. Die tribochemischen Reaktionen führen zu chemischen Veränderungen der Oberflächen durch Wechselwirkungen mit dem Schmierstoff oder der Umgebung. Durch die reversierende Betriebsweise des KGT und die oft geringen Wälzgeschwindigkeiten der Kugeln kommt es regelmäßig zum Zusammenbruch des Schmierfilms, was für Mischreibung und lokale Festkörperkontakte in den Rauigkeitsspitzen sorgt. Ein ausreichender Schmierfilm trennt die Oberflächen, mindert abrasiven und adhäsiven Verschleiß und trägt abgelöste Partikel aus der Kontaktzone aus. Zudem kann eine geeignete Schmierung tribochemische Reaktionen durch Wärmeableitung aus der Kontaktzone einschränken. [8] Um dem oben genannten Ausfall von KGT zu begegnen, ist die Überwachung des Schmierzustands also ein geeignetes Mittel. Zudem arbeiteten Zentralschmierungen von WZM nicht bedarfsgerecht, sodass oft ein unwirtschaftlicher Schmierstoffeinsatz zu erwarten ist. Vorherige Arbeiten haben für die Umsetzung einer Schmierzustandsüberwachung und damit einer bedarfsgerechten Schmierung folgende Ansätze erarbeitet:

In der Arbeit von *Spohrer* [9] wird mit dem modellbasiert errechneten Reibmoment des KGT, der Muttertemperatur und der Schmierimpulshistorie der Schmierzustand detektiert und nur bei Bedarf nachgeschmiert. Dazu wurde zunächst ein Reibmodell für KGT aufgestellt, welches in Abhängigkeit von Drehzahl, Axiallast und Temperatur das Reibmoment im Betrieb berechnet. Um schmierstoffbedingte Reibmomentschwankungen und die durch Fertigungsungenauigkeiten über der Spindellänge hervorgerufenen Reibmomentschwankungen zu unterscheiden, wird die KGT-Temperatur als träge reagierender Kennwert hinzugefügt. Um Veränderungen von KGT-Reibmoment und KGT-Temperatur aufgrund von kürzlich durchgeführten Schmierimpulsen abzugrenzen, wird die Schmierhistorie als dritter Kennwert benötigt. Nachteile der Methodik sind die KGT-spezifische Kalibrierung eines aufwendigen Reibmodells sowie die Notwendigkeit einer baugrößenabhängigen Sensoreinheit für jeden KGT in der WZM. Diese wird zwischen Maschinenschlitten und KGT-Mutter montiert, sodass sich die dynamischen Eigenschaften der Vorschubachse ändern und ein Teil der Hublänge verloren geht. [9]

Von *Klein* wurde am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen (WZL) der Schmierzustand von Führungswagen und Kugelgewindetrieben mithilfe von Körperschallmessungen untersucht. Durch das Verfahren des KGT mit 5 m/min und 10 m/min wird dieser bei variierenden Axiallasten angeregt und die dadurch erzeugten Schwingungen werden mit einem Piezo- und einem MEMS-Beschleunigungssensor (MEMS: Mikroelektromechanisches System) in axialer Richtung aufgezeichnet. Die Auswertung der Messung erfolgt unter anderem durch den Vergleich der Amplituden im Frequenzbereich von 0 – 25 kHz. Dazu erfolgte die erste Messung nach einer initialen Schmierung, die zweite nach 317 km Laufleistung, woraufhin erneut geschmiert wurde. Die dritte Messung wurde bei 500 km Laufleistung erhoben. Die Amplituden oberhalb von 10 kHz waren nach Absolvieren der jeweiligen Laufleistung stark erhöht, was den Zustand der Mangelschmierung repräsentiert. Außerdem wurden Auswertungen mithilfe der Frequenzbandsumme und der Wavelet-Energie durchgeführt. Insgesamt wurden eine gute Vergleichbarkeit der

Ergebnisse von MEMS- und Piezo-Sensor sowie eine Lastunabhängigkeit der Frequenzspektren nachgewiesen. Für die Identifikation der Mangelschmierung bietet die Betrachtung der Schwingungsamplitude eine qualitative Indikation, allerdings wurde der Einfluss der Geschwindigkeit und der eingesetzten Schmiermenge nicht umfangreich untersucht. [10] Die im Stand der Technik identifizierten Defizite werden mit dieser Arbeit adressiert, indem die Eignung von MEMS-Sensoren zur schwingungsbasierten Schmierzustandserkennung nachgewiesen wird. Außerdem weisen strukturierte Untersuchungen den Zusammenhang zwischen Verfahrensgeschwindigkeit, Schmierstoffmenge und Schwingungsverhalten nach, das als Grundlage für Indikatoren zur Bestimmung des im Betrieb vorliegenden Schmierzustands im KGT dient.

3 Experimenteller Aufbau und Bewertungsmetrik

Das Kapitel 3 beschreibt den für die Nachweisführung eingerichteten Prüfstand, den Versuchsplan, nach dem der Kugelgewindetrieb verfahren wird, sowie die Bewertungsmetrik zur Auswertung der aufgezeichneten Schwingungsmessungen.

3.1 Versuchsaufbau

Zur Untersuchung des Einflusses der Schmierung auf das Schwingungsverhalten der Komponente wurde der in **Bild 3** dargestellte Prüfstand eingesetzt. Ein KGT in Doppelmutterausführung mit einem Durchmesser von 40 mm und einer Steigung von 20 mm ist mittels Fest-Los-Lagerung in den Prüfstand eingebracht. Die Abrollbewegung der Wälzkörper erfolgt über einen Zwei-Punkt-Kontakt mit Mutter- beziehungsweise Spindellaufbahn. Angetrieben wird der KGT spindelseitig von einem Servomotor, verbunden durch eine Balgkupplung. Der Prüfstand verfügt über eine Sinumerik-Steuerung („840D powerline“), mit der sich verschiedene Verfahrsprofile flexibel festlegen lassen. Das Leerlaufmoment der Mutter wird über einen am Flansch angebrachten Ausleger mit Schienen abgestützt.

Messtechnisch ist der KGT mit einem piezoelektrischen Beschleunigungssensor des Typs „MMF KS95B.10“ sowie einem MEMS-Sensor des Typs „ADXL 1002“ zur Erfassung des Schwingungszustands ausgestattet. Beide Sensoren sind am Mutterflansch in unmittelbarer Nähe zueinander mittels Sekundenkleber angebracht und messen in radialer Richtung. Der MEMS-Sensor ist direkt auf der Platine verlötet, die wiederum auf einer Trägerplatte verschraubt ist. Darüber hinaus nimmt ein magnetisch am Flansch befestigter Temperatursensor den thermischen Zustand der Mutter auf. Alle Sensoren sind über entsprechende Messkarten (NI 9217, NI 9234, NI 9263, NI 9215) von National Instruments (NI) mit einem Data Acquisition Board (DAQ-Board: NI cDAQ-9178) verbunden. Das Messprogramm ist in LabView umgesetzt. Zusätzlich werden Positions- und Motorstromdaten aus dem Numerical Control Kernel (NCK) mithilfe einer proprietären Kommunikationsschnittstelle zur Steuerung ausgelesen. Alle Daten werden auf einem Messrechner zusammengeführt.

3.2 Versuchsplanung

Die experimentellen Untersuchungen gliedern sich in zwei Versuchsreihen. Während Versuchsreihe 1 die Abhängigkeit des

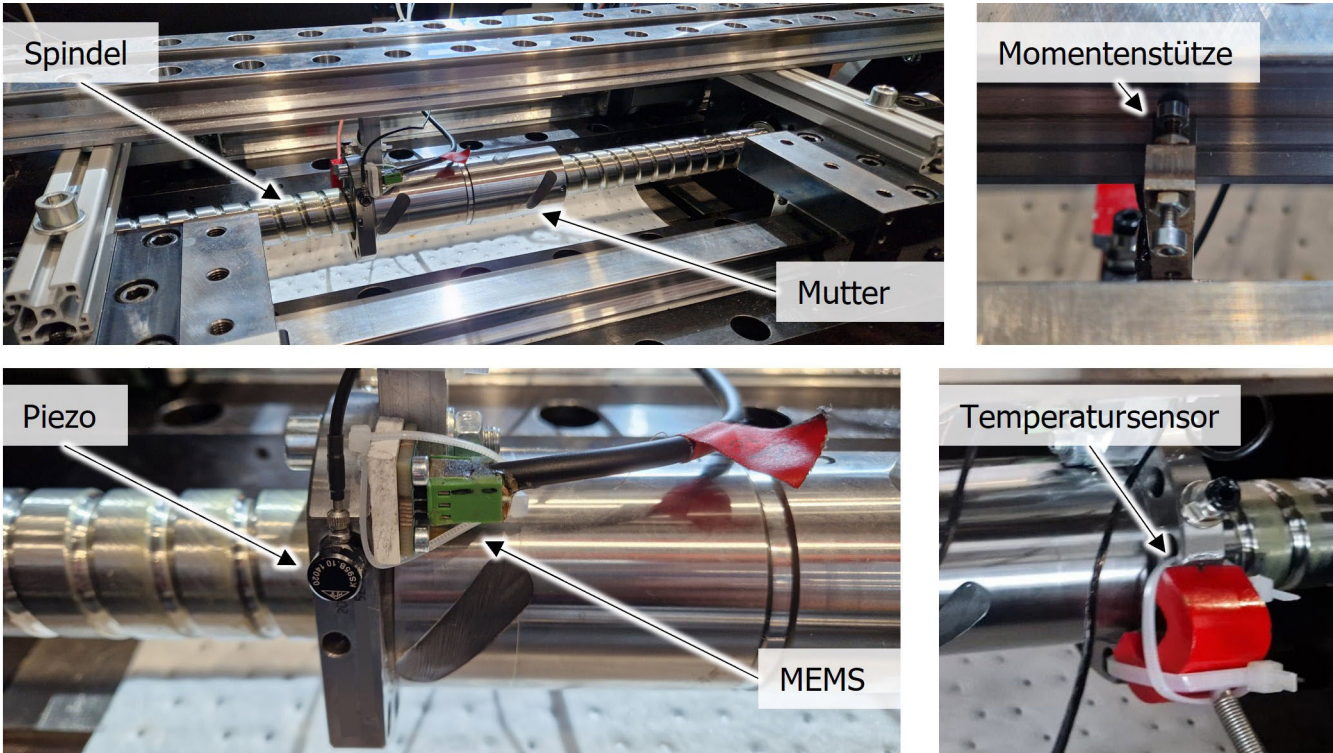


Bild 3. Prüfstand zur schwingungsbasierten Schmierzustandsermittlung. Foto: WZL

Tabelle. Stufen untersuchter Einflussfaktoren im vollfaktoriellen Versuchsplan.

Faktor	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
Schmiermenge m [g]	0	1	2	3	4	5
Geschwindigkeit v [mm/min]	600	1200	1800	2400	3000	

Schwingungszustands von der in die Komponente eingebrachten Schmiermenge m und der Vorschubgeschwindigkeit v untersucht, fokussiert Versuchsreihe 2 das tatsächliche Austragen von Schmiermittel aus der Komponente. Um ein beschleunigtes Aus-tragen in Versuchsreihe 2 zu bewirken, wurde der KGT ohne Ab-streifer betrieben. Zur Sicherstellung gleicher Randbedingungen und zur Vermeidung des Abstreifereinflusses auf den Schwin-gungszustand erfolgte auch die Durchführung von Versuchs-reihe 1 ohne Abstreifer. Als Schmiermedium für die Unter-suchungen wurde das Fett „Divinol Lithogrease 000“ eingesetzt. Die Verseifungsart des Schmierfetts entspricht einer Lithiumkom-plexeisenbasis. Über alle Versuche hinweg wurde ein Hub von 200 mm sichergestellt. Kurzhubbedingungen, die sich negativ auf die Ausbildung eines trennenden Schmierfilms zwischen Wälz-körper und Laufbahn auswirken, sowie sich daraus ergebende Einflussüberlagerungen konnten hiermit vermieden werden. [11]

Versuchsreihe 1: Einfluss der Schmiermenge und Vorschub-geschwindigkeit

Der vollfaktorielle Versuchsplan zur Untersuchung der Ein-flussfaktoren Schmiermenge m und Geschwindigkeit v ist der Tabelle zu entnehmen. Insgesamt wurden sechs Stufen für m und fünf Stufen für v getestet, was einer Gesamtanzahl von 30 Versuchen entspricht. Nach initialer Säuberung wurden nach und nach die aufgeführten Schmiermengen gezielt auf die Spindel

appliziert und über Verteilhübe in die Komponente eingebracht. Den Geschwindigkeitsprofilen am Prüfstand liegt eine Ruckbe-grenzung von 20 m/s^3 zugrunde. Die Verfah- beziehungsweise Messzeit betrug 40 s. Um eine möglichst hohe Bandbreite zu betrachten, lag die Abtastrate der Schwingungssensoren bei 51,2 kHz. Hierdurch sind gemäß des Shannon-Theorems Schwin-gungen bis 25,6 kHz auswertbar. [12] Da sich der KGT während des Verfahrens reibungsbedingt erwärmt und damit die Viskosität des Schmiermittels beeinflusst, wurde vor Durchführung von Ver-suchsreihe 1 ein Einlaufzyklus über 4 h mit den verschiedenen Geschwindigkeitsstufen vorgenommen, um den KGT auf einen thermischen Referenzzustand zu bringen. Dadurch werden quasi-stationäre Bedingungen für Versuchsreihe 1 sichergestellt.

Versuchsreihe 2: Schmiermittelaustragung

Zur Bewertung der Schmiermittelaustragung, begünstigt durch den Verzicht auf ein Abstreifersystem, sieht der zweite Teil des Versuchsplans eine dauerhafte Verfahrbewegung des KGT über einen Zeitraum von 40 h vor, wobei jede Stunde eine Schwin-gungsmessung von 40 s erfolgte. Ausgangszustand ist eine mit 5 g gefettete Komponente. Zwischen Versuchsreihe 1 und Versuchsreihe 2 wurde eine Abkühlzeit von einem Tag eingehal-ten, um auch das Einlaufverhalten der Komponente zu charakte-risieren.

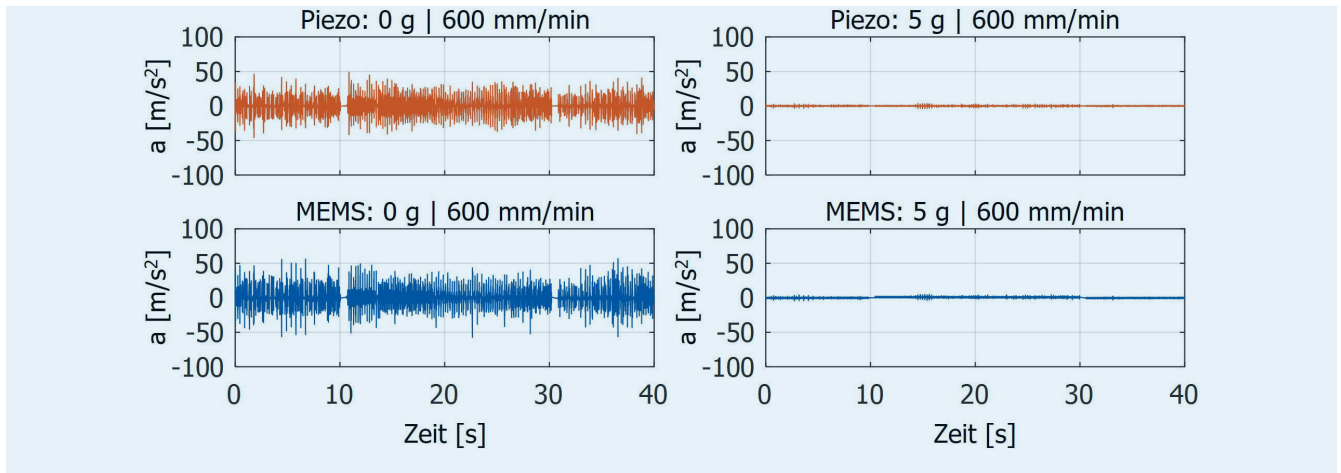


Bild 4. Schmierzustandseinfluss auf Beschleunigungspegel ($v = 600$ mm/min). Grafik: WZL

3.3 Bewertungsmetrik

Als Metrik zur Bewertung des Schwingungsniveaus wird in dieser Arbeit der Effektivwert (engl.: Root-Mean-Square Value, RMS) verwendet, der neben der Kurtosis und dem Crest-Faktor auch in der VDI-Richtlinie 3832 [13] als Condition-Monitoring-Parameter für die Zustandsbeurteilung von Wälzlagern in Maschinen und Anlagen vorgeschlagen wird. Der Effektivwert, der in Gleichung (1) dargestellt ist, kann im Zeit- wie Frequenzbereich eingesetzt werden und beurteilt den Energiegehalt des Signals. Ein erhöhtes Schwingungsniveau steht in positiver Korrelation zu einem erhöhten RMS-Wert. Die Kurtosis beurteilt als statistisches Maß die Spitzenhaltigkeit einer Verteilung, also den Ausreißeranteil im Vergleich zur Normalverteilung, während der Crest-Faktor den Stoßgehalt eines Signals mathematisch mittels Relation von Maximalwert zu RMS angibt. Diese beiden Condition-Monitoring-Parameter eignen sich insbesondere für plötzliche Schäden und Komponentenausfälle. Da beim Rückgang der Schmierung innerhalb einer Komponente von einem stetigen Charakter ausgegangen wird und der RMS robuster gegenüber störungsbedingten Ausreißern ist, wird im Rahmen dieser Arbeit auf die genauere Betrachtung von Kurtosis und Crest-Faktor verzichtet.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (1)$$

4 Ergebnisse

Das Kapitel 4 umfasst die Auswertung der Versuchsreihen zur Bewertung des Einflusses von Schmierstoffmenge, Vorschubgeschwindigkeit und Schmiermittelaustragung auf das Schwingungsverhalten.

4.1 Versuchsreihe 1: Einfluss von Schmiermenge und Vorschubgeschwindigkeit

In Bild 4 sind die gemessenen Beschleunigungsverläufe des Piezo- und MEMS-Sensors für die ungeschmierte (links) und geschmierte Komponente (rechts) im Zeitbereich dargestellt. Verglichen werden die Extrema der Schmierung in Form von Stufe 1 ($m = 0$ g) und Stufe 6 ($m = 5$ g). Der zugrunde liegende

Vorschub beträgt 600 mm/min, was der niedrigsten getesteten Geschwindigkeit entspricht. In 40 s Messzeit führt der KGT bei der Geschwindigkeit circa zwei Hübe durch, was durch die Umkehrpunkte bei Sekunde 10 und 30 deutlich wird. Mithilfe der gleichen Skalierung der y-Achse innerhalb von Bild 4 ist eine deutliche Reduktion des Beschleunigungspegels bei der geschmierten Komponente zu verzeichnen, wobei Piezo- und MEMS-Sensor ähnliche Verläufe zeigen. Die gemessenen Amplituden in der ungeschmierten Komponente liegen im Bereich vom zehn- bis zwanzigfachen der geschmierten Komponente, wobei der MEMS-Sensor aufgrund des erhöhten Rauschanteils etwas höhere Amplituden ausgibt als der Piezo-Sensor. Eine Abhängigkeit des Schwingungsniveaus vom Schmierzustand im Vergleich zwischen einer komplett ungeschmierten und einer geschmierten Komponente kann also festgehalten werden.

Der Schwingungszustand eines KGT hängt unter anderem durch eine erhöhte kinetische Energie auch von der Vorschubgeschwindigkeit ab. Die Ergebnisse für $v = 3000$ mm/min sind in Bild 5 dargestellt. Erneut wird der ungeschmierte Zustand mit der maximalen Schmierung verglichen. Durch die erhöhte Geschwindigkeit entfallen nun neun vollständige Hübe auf den Messzeitraum von 40 s. Die gemessenen Beschleunigungen liegen über dem Niveau der niedrigsten Geschwindigkeitsstufe, wobei der MEMS-Sensor stärkere Ausschläge als der Piezo-Sensor, vor allem in einer Vorschubrichtung, verzeichnet. Im Vergleich von ungeschmierter zu geschmierter Komponente ist erneut ein reduzierter Schwingungspegel im Zeitbereich bei beiden Sensoren zu beobachten. Allerdings fällt der Unterschied weniger stark aus als bei einem niedrigeren Vorschub von 600 mm/min.

Eine Analyse der überlagerten Effekte von Geschwindigkeit und Schmierzustand auf das Schwingungsniveau der Komponente kann im Zeitbereich ohne Filterung nicht hinreichend genau erfolgen. Um für die Schmierung relevante Frequenzbereiche zu identifizieren, werden daher die Frequenzspektren der Beschleunigungssignale in Bild 6 ausgewertet. Vor der Fast Fourier Transformation (FFT) erfolgt eine Segmentierung der Zeitsignale, sodass die Umkehrpunkte der Hubbewegung nicht mitbetrachtet werden. Dies kann unter Zuhilfenahme der steuerungsseitigen Positionsdaten erfolgen. Im Frequenzbereich von 0 bis 5 kHz unterscheiden sich die jeweiligen Spektren von Piezo- wie MEMS-Sensor für unterschiedliche Vorschubstufen nur geringfügig zwischen dem ungeschmierten und geschmierten Zustand.

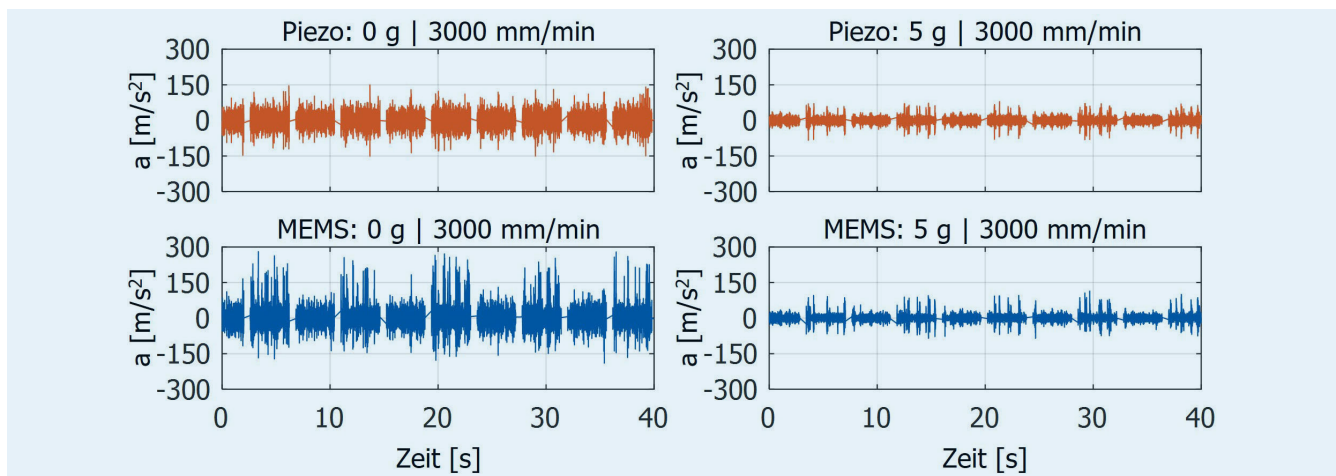


Bild 5. Schmierzustandseinfluss auf Beschleunigungspegel ($v = 3000 \text{ mm/min}$). Grafik: WZL

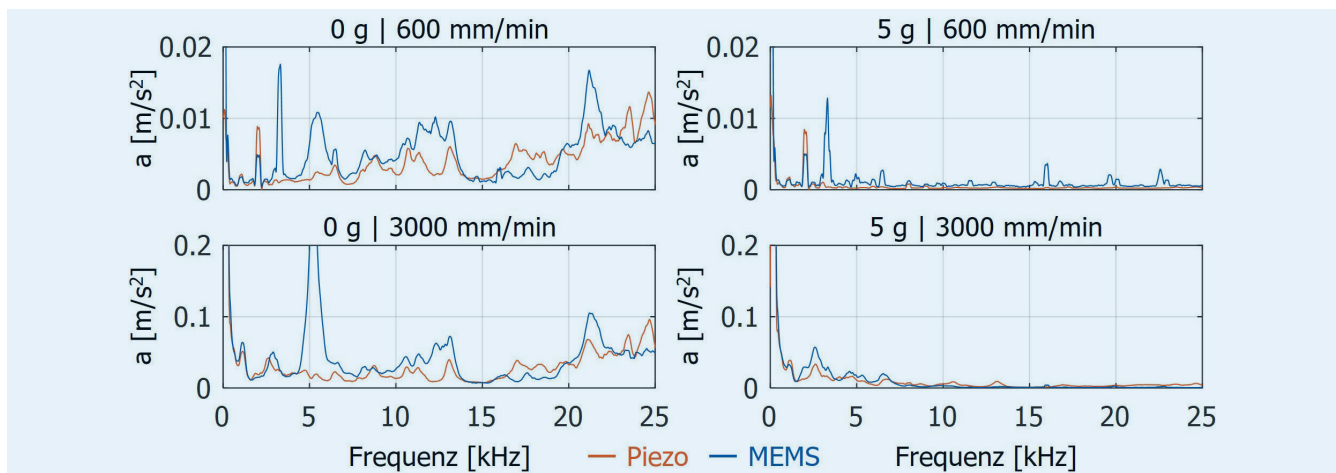


Bild 6. Schmierzustandseinfluss auf Frequenzspektrum. Grafik: WZL

Typischerweise liegen geschwindigkeitsabhängige Frequenzen wie Überroll- oder die Spindeldrehfrequenzen sowie ihre Harmonischen im niederfrequenten Bereich von wenigen hundert Hertz. [14] Diese Schwingungsanteile werden den Ergebnissen nach weniger stark durch die Schmierung beeinflusst. Zudem kann die schmierungsunabhängige Prüfstandsynamik in diesem Bereich einen Einfluss haben.

Ab 5 kHz sind dämpfende Effekte der Schmierung sichtbar. Dies wird darin deutlich, dass die geschwindigkeitsbedingten Unterschiede geringer ausfallen und der Einfluss zwischen ungeschmiertem und geschmiertem KGT mehr ins Gewicht fällt. Aufgrund der hohen Komponentensteifigkeit eines KGT liegen Schwingungsmoden, die Relativbewegungen zwischen Mutter und Spindel beinhalten, eher im hochfrequenten Bereich. Insbesondere bei diesen Moden bewirkt ein veränderter Schwingungszustand einen signifikanten Unterschied. Während das Frequenzspektrum von Piezo- und MEMS-Sensor in vielen Bereichen gut übereinstimmt, existieren Bereiche erhöhter Amplitude beim MEMS-Sensor. Dies ist beispielsweise für die Frequenzen um 21 und 5 kHz der Fall. Gemäß dem Datenblatt des ADXL1002 liegt die Resonanzfrequenz für den MEMS-Sensor bei 21 kHz. Diese Frequenz führt vor allem im ungeschmierten Zustand zu einer circa zweifachen Amplitudenüberhöhung verglichen mit dem Piezo-Sensor. Die Überhöhung bei 5 kHz könnte einer Sub-

harmonischen dieser Resonanzfrequenz entsprechen. Die Resonanzfrequenz des Piezo-Sensors liegt hingegen bei über 40 kHz und hat demnach keinen Einfluss auf die betrachtete Bandbreite. Darüber hinaus soll an dieser Stelle aber auch auf den erhöhten Rauschanteil des MEMS sowie mögliche Störeinflüsse infolge der Anbringung auf die Trägerplatte (Bild 3) hingewiesen werden. Trotz dieser lokalen Abweichungen ist der Einfluss der Schmierung bei beiden Sensoren sichtbar, weshalb von einer Eignung beider Schwingungsaufnehmer ausgegangen werden kann. Aufgrund des erhöhten Informationsgehalts sollte die Auswertung allerdings im Frequenzbereich erfolgen.

Zur Beschreibung des funktionalen Zusammenhangs zwischen der Schmiermenge m , der Geschwindigkeit v und dem resultierenden Schwingungsgehalt, sind in Bild 7 die RMS-Werte in Abhängigkeit von diesen beiden Größen sowohl für den Piezo- als auch den MEMS-Sensor abgebildet. Der RMS wurde für alle Läufe aus Versuchsreihe 1 im Frequenzbereich über drei verschiedene Bandbreiten gebildet, um den Einfluss des gewählten Frequenzbands zu verdeutlichen. Zunächst zeigt sich, dass bei Betrachtung der gesamten Bandbreite von 1 Hz bis 25,6 kHz der Einfluss der Geschwindigkeit überwiegt. Der Vorschub geht demnach exponentiell in den Effektivwert ein. Piezo- und MEMS-Sensor weisen hierbei geringfügige Abweichungen auf. Für eine Betrachtung von Frequenzen oberhalb von 5 kHz ist die

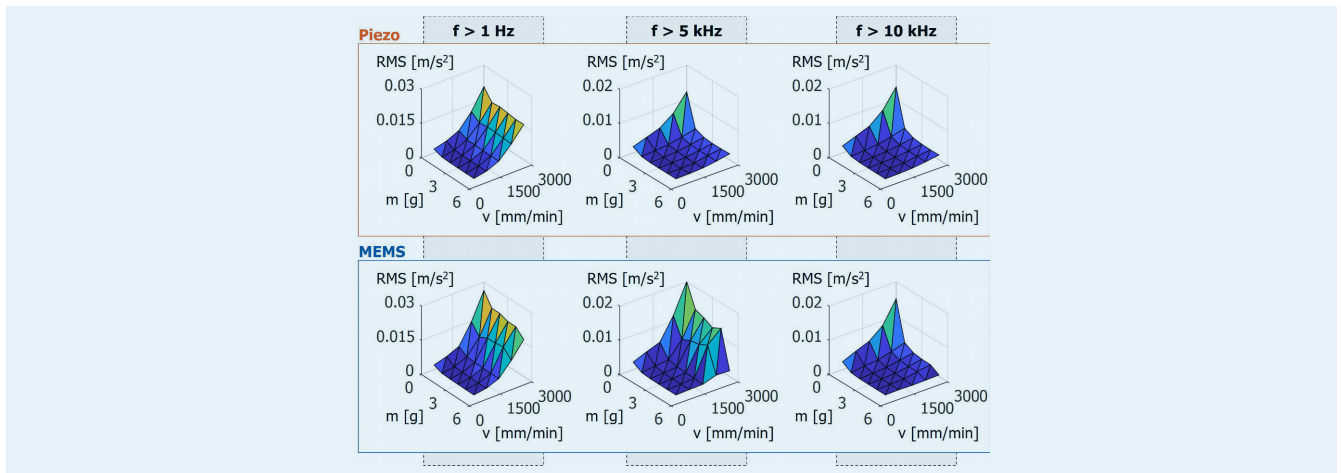


Bild 7. RMS-Abhängigkeit von Schmiermenge, Geschwindigkeit und Bandbreite. Grafik: WZL

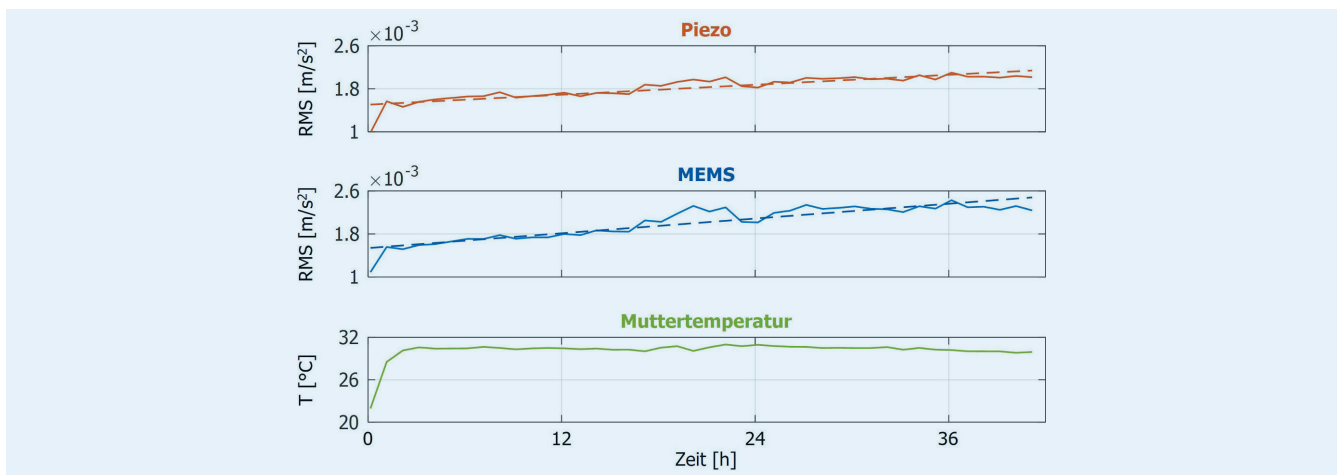


Bild 8. Kontinuierliche RMS-Messung ($m = 5 \text{ g}$, $v = 3000 \text{ mm/min}$, $f > 10 \text{ kHz}$). Grafik: WZL

Geschwindigkeitsabhängigkeit beim Piezo-Sensor stark reduziert und auch bei höheren Vorschüben besitzt die Schmiermenge verstärkt Einfluss auf den RMS. Aufgrund der oben beschriebenen Störfrequenzen, insbesondere im Bereich von 5 kHz, ist dieser Verlauf beim MEMS-Sensor nicht isoliert sichtbar. Im dritten Frequenzbereich von 10 kHz bis 25,6 kHz zeigen beide Sensoren den charakteristisch gleichen Verlauf. Die Geschwindigkeit zeigt eine exponentiell positive Korrelation mit dem RMS, die Schmiermenge eine exponentiell negative. Demnach führen vor allem Schmierzustände nahe des ungeschmierten Zustands zu stark überhöhten Effektivwerten der Schwingungsamplituden über 10 kHz. Die Erstellung und Nutzung von Parameterkarten, wie sie in Bild 7 gezeigt sind, können eine Unterstützung bei der Auslegung von KGT vor dem Hintergrund der Schmierung sein. Darüber hinaus bietet die Darstellung das Potenzial, Schwellwerte festzulegen, die im Rahmen von bedarfsgerechten Schmier-systemen einen Nachschmierzyklus auslösen.

4.2 Versuchsreihe 2: Schmiermittelaustragung

In Bild 8 ist die zeitliche Veränderung des RMS-Werts für Piezo- und MEMS-Sensor sowie der Temperaturverlauf für den Dauerlauf über 40 h im Rahmen von Versuchsreihe 2 dargestellt.

Zu Beginn enthielt die Komponente 5 g Schmierfett. Der Vorschub betrug 3000 mm/min. Die Werte basieren auf einer Messung pro Stunde über 40 s sowie einer RMS-Berechnung im Frequenzbereich für die Bandbreite 10 – 25,6 kHz. Charakteristisch ist zunächst das Einlaufverhalten des KGT, das eine Erwärmung der Mutter um 8 °C von 22 °C auf 30 °C (gemessen am Flansch) bewirkt. Beide Sensoren zeigen in dieser Phase eine deutliche Sensitivität gegenüber dem Temperaturanstieg. Die Veränderung des Schwingungsverhaltens lässt sich auf eine temperaturabhängige Veränderung der Schmierfilmviskosität sowie auf thermisch induzierte Änderungen der Vorspannung zurückführen. Nach etwa zwei Stunden weist die Komponente für den Rest des Dauerlaufs einen thermischen Beharrungszustand auf. In diesem Zeitraum steigen die RMS-Werte für den Piezo- und MEMS-Sensor weiter an, allerdings mit einer geringeren Steigung als während der Einlaufphase. Über die verbleibenden 38 h steigt der RMS-Wert um 30 % (Piezo) beziehungsweise 40 % (MEMS) an. Der qualitative Verlauf beider Sensoren ist annähernd linear und qualitativ ähnlich. Da die Komponente ohne Abstreifer betrieben wurde, die Randbedingungen über den gesamten Versuch konstant blieben und auch die Temperatur keine signifikanten Schwankungen aufwies, ist von einem kontinuierlichen Austrag von Schmierstoff auszugehen. Die Ergebnisse der Versuchsreihe 2

legen nahe, die in Versuchsreihe 1 ermittelten Parameterkarten, um den thermischen Zustand der Komponente zu erweitern. Insbesondere beeinflusst das Vorliegen eines thermischen Gleichgewichts die Aussagekraft der RMS-Werte signifikant. Für den praktischen Einsatz bedeutet dies, dass eine bedarfsgerechte Nachschmierung erst nach einer definierten Warmlaufphase aktiviert werden sollte beziehungsweise sensorseitige Schwellenwerte temperaturabhängig angepasst werden müssen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Eine unzureichende Schmierung zählt zu den häufigsten Ausfallursachen von Vorschubachskomponenten, so auch von Kugelgewindetrieben. In der Praxis wird die Schmierung daher häufig überdimensioniert. Durch Dysfunktionen in Abstreifersystemen kann es dennoch zu einem kontinuierlichen Schmiermittelaustrag aus der Komponente kommen. In der vorliegenden Arbeit werden die Grundlagen einer schwingungsbasierten Schmierzustandserkennung untersucht. Als Bewertungsgröße dient der Effektivwert (RMS) des Schwingungssignals, wobei sich der Frequenzbereich von 10 kHz bis 25,6 kHz als besonders sensitiv gegenüber Veränderungen im Schmierzustand erwiesen hat. Sowohl Piezo- als auch MEMS-Sensoren weisen eine Abhängigkeit des Schwingungsniveaus vom Schmierzustand für verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten auf, wobei sich insbesondere MEMS-Sensoren aufgrund ihrer geringen Kosten für eine zukünftige praktische Integration in die KGT-Mutter eignen. Neben der Geschwindigkeitsabhängigkeit konnte der Einfluss des thermischen Zustands der Komponente auf das Schwingungsverhalten nachgewiesen werden. Dieser Aspekt sollte in zukünftigen Arbeiten tiefergehend untersucht werden. Darüber hinaus ist die Übertragbarkeit der Methode auf unterschiedliche KGT-Ausführungen mit variierenden Spindeldurchmessern, Steigungen, Kugelgrößen, Kugelanzahlen, Vorspannklassen und Umlenkungskonzepten zu analysieren. Zudem sollten die Untersuchungen auf KGT aus dem Automotive-Bereich übertragen werden, damit eine Unterstützung in der Auslegung von Lenkgetrieben erreicht werden kann. Für den konkreten Anwendungsfall eines intelligenten Überwachungssystems zur Schmierzustandserkennung und bedarfsgerechten Nachschmierung in Werkzeugmaschinen sind Konzepte zur Sensorintegration, Kabelführung und Einbindung in die Maschinensteuerung zu entwickeln. Ergänzend bedarf es einer Untersuchung geeigneter Parametrierzyklen zur Festlegung temperatur- und zustandsabhängiger Schwellenwerte für die Auslösung eines Nachschmierzyklus.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken den Teilnehmern im Arbeitskreis Vorschubachsen (AKV) am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen für ihre Unterstützung im Rahmen dieser Arbeit.

LITERATUR

- [1] Brecher, C.; Weck, M.: Werkzeugmaschinen, Fertigungssysteme. Berlin: Springer Vieweg 2017
- [2] Ersoy, M.; Gies, S.: Fahrwerkhandbuch. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2017
- [3] Runge, W.; Gaedke, A.; Heger, M. et al.: Elektrisch lenken. ATZextra 15 (2010) 2, S. 68–75
- [4] Robert Bosch GmbH: Elektrolenkung mit achsparalleler Servoeinheit. Internet: <https://www.bosch-mobility.com/de/loesungen/lenkung/elektrolenkung-mit-achsparalleler-servoeinheit/>. Zugriff am 17.05.2023
- [5] DMGMori: DMX 60 U. Hochleistungs- und präzises Universal-Fräsenstrum für Werkstücke bis zu D630 x 450 mm und 300 kg. Internet: <https://de.dmgmori.com/produkte/maschinen/fraesen/5-achs-fraesen/dmx-u/dmx-60-u>. Zugriff am 08.05.2025
- [6] August Steinmeyer GmbH & Co.KG: Schmierung von KGT. Stand: 10.04.2025. Internet: <https://www.steinmeyer.com/de/technik/schmierung-und-abstreifer/>. Zugriff am 10.04.2025
- [7] Fleischer, J.; Schopp, M.; Broos, A. et al.: Datenbasis für lastabhängige Prozesseingriffe*. wt Werkstattstechnik online 97 (2007) 7-8, S. 491–497
- [8] Forstmann, J.: Kugelgewindetriebe im Einsatz an Kunststoffspritzgießmaschinen. , Dissertation Universität Duisburg, Essen, 2010
- [9] Spohrer, A.: Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung. Dissertation
- [10] Klein, W. H.: Zustandsüberwachung von Rollen-Profileschienenführungen und Kugelgewindetrieben. Aachen: Apprimus-Verl. 2011
- [11] Münzing, T.: Auslegung von Kugelgewindetrieben bei oszillierenden Bewegungen und dynamischer Belastung. Dissertation, Universität Stuttgart
- [12] Shannon, C. E.: Communication in the Presence of Noise. Proceedings of the IRE 37 (1949) 1, S. 10–21
- [13] VDI: Richtlinie VDI 3832. Körperschallmessungen zur Zustandsbeurteilung von Wälzlagern in Maschinen und Anlagen (2013)
- [14] Helwig, N. J.: Zustandsbewertung industrieller Prozesse mittels multivariater Sensordatenanalyse am Beispiel hydraulischer und elektromechanischer Antriebssysteme, 2018

Prof. Christian Brecher 

Josch Hameleers, M.Eng. 

Ralph Klimaschka, M.Sc. 
r.klimaschka@wzl.rwth-aachen.de

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)