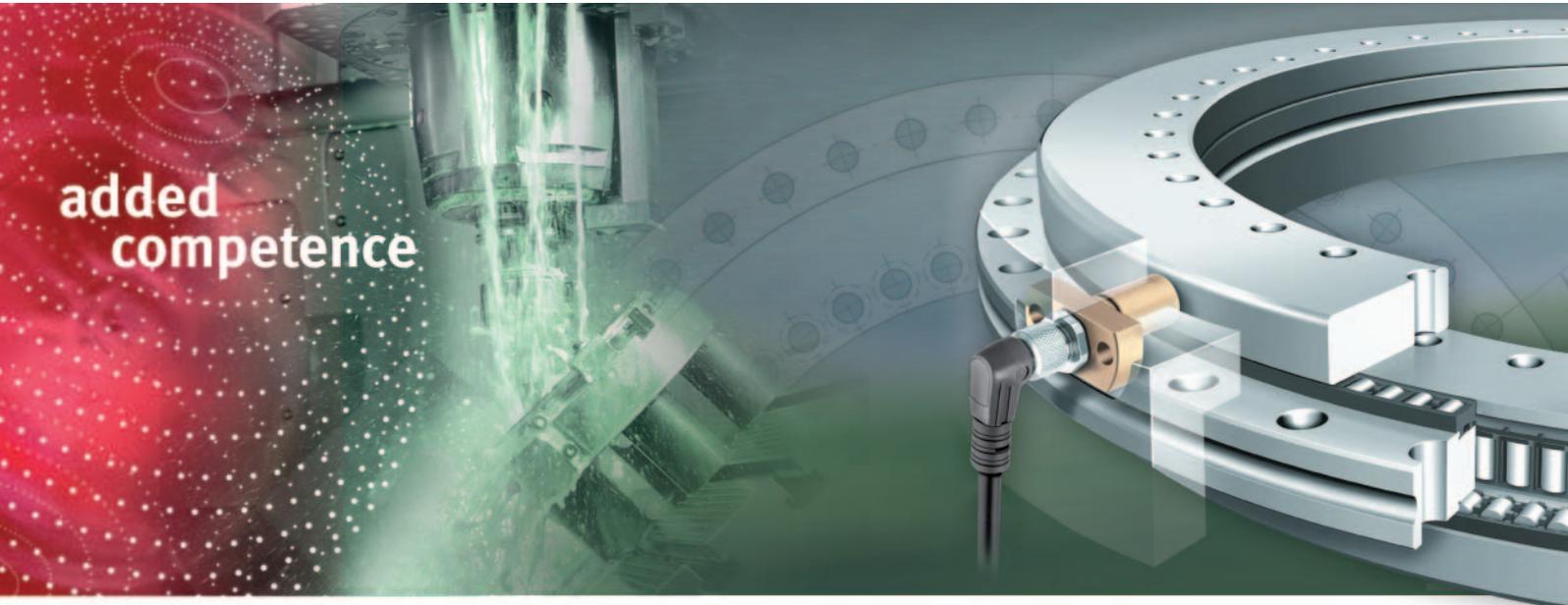




FAG



added
competence

Magnetisch versus optisch

Winkel-Mess-Systeme für Rundtischachsen im Vergleich

Magnetisch versus optisch

Winkel-Mess-System für direkt angetriebene Präzisions-Rundachsen im Vergleich

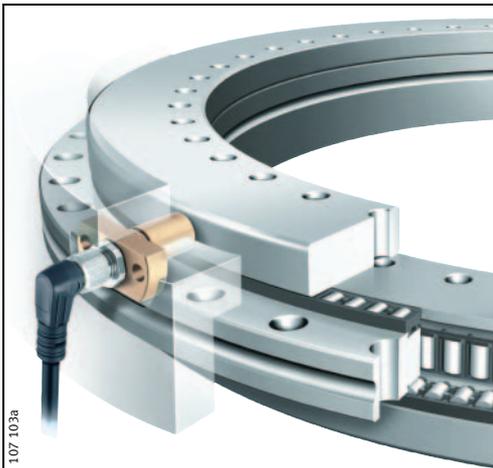


Bild 1: HIGH-SPEED Rundachslager mit magnetischem Winkel-Mess-System, YRTSM

Bei der Frage nach dem optimalen Mess-System für hochdynamische Direktantriebe in Werkzeugmaschinen wird in der Regel optischen Systemen der Vorzug gegeben. Für den Einsatz in Rundtischachsen erweisen sich aber auch magnetische Messprinzipien als Alternative, Bild 1.

Der Vergleich beider Mess-Systemarten in einem Rundtisch mit Torquemotor-Antrieb stellt die charakteristischen Eigenschaften der Systeme und ihre Auswirkungen gegenüber.

Einleitung

Für den Einsatz in Rundtischen, die sowohl für die Fräs- als auch die Drehbearbeitung Verwendung finden, steht eine breite Auswahl leistungsfähiger Antriebskomponenten zur Auswahl. Dies bezieht sich insbesondere auf Torquemotoren und zugehörige Umrichter und Regler, sowie darauf abgestimmte Rundtischlagerungen. Bei der Auswahl des Winkel-Mess-Systems für hochdynamische, direkt angetriebene Rundtischachsen, die für die kombinierte Fräs- und Drehbearbeitung vorgesehen sind, werden heute in der Regel optische Mess-Systeme mit höchster Genauigkeit und Winkelauflösung bevorzugt. Aufgrund des optischen Messprinzips sind hier allerdings besondere Vorkehrungen hinsichtlich Verschmutzungen durch z. B. Kühlschmierstoffe oder Wälzlagerfette zu treffen. Die optischen Geber sind in der Regel als Einbaudrehgeber verfügbar, die mittig im Rundtisch eingebaut werden müssen und eine eigene, mechanisch nachgiebige Ausgleichskupplung aufweisen. Daraus folgt, dass die axiale Mittendurchführung nicht für Medienleiter zur Verfügung steht, und dass bei der Ankopplung des Mess-Systems an den direkt angetriebenen Rundtisch besonders auf die mechanische Steifigkeit geachtet werden muss, um eine hohe Regelsteifigkeit zu erzielen.

Im Folgenden wird beispielhaft ein optischer Drehgeber mit dem magneto-resistiven, lagerintegrierten, inkrementalen Winkel-Mess-System YRTSM der Schaeffler KG verglichen. Dieses bietet Vorteile hinsichtlich Robustheit gegen Kühlschmierstoffe und Wälzlagerfette, kann platzsparend eingebaut werden und lässt prinzipbedingt einen freien Mittendurchgang zu. Der Vergleich wurde in einem gemeinsamen Entwicklungsprojekt der Schaeffler KG und des Werkzeugmaschinenlabors (WZL) der RWTH Aachen an einem praxisgerechten Rundtisch durchgeführt, der zu diesem Zweck parallel mit beiden Mess-Systemen ausgerüstet wurde, Bild 2.



Bild 2: Direkt angetriebener Rundtisch, ausgerüstet mit einem optischen und einem magneto-resistiven Winkel-Mess-System

Kenndaten

Als Referenz-Mess-System diente ein hochauflösender, optischer Einbaudrehgeber mit 36 000 Strichen pro Umdrehung, welcher am unteren Ende der Rundtischachse auf Höhe des Torquemotors angebracht war. Das inkrementale, magneto-resistive

Mess-System YRTSM, *Bild 1*, ist abgestimmt auf die Lagerbaureihe YRTS, welche in verschiedensten Bohrungsdurchmessern verfügbar ist und hohe Grenzdrehzahlen erreicht. In diesem Fall kam ein Lager des Typs YRTSM325 mit einem Innendurchmesser von 325 mm und einer Grenzdrehzahl von 760 min^{-1} zum Einsatz. Die magnetische Winkelteilung ist stoffschlüssig auf der drehenden Wellenscheibe des Lagers aufgebracht, wobei diese mittels zweier Sensorköpfe abgetastet wird, die um 180° winkelfersetzt angeordnet sind und direkt an das Rundtischgrundgestell angeflanscht werden, *Bild 3*. Durch die Zweikopfabtastung wird sichergestellt, dass eventuell durch Bearbeitungskräfte auftretende Mittenverlagerungen systemintern kompensiert werden und damit absolute Messgenauigkeiten von kleiner als $\pm 3''$ erzielt werden.

Zudem wird durch diese Art der Abtastung, die Winkelauflösung verdoppelt, so dass insgesamt ein Signal aus 5184 Strichen pro Umdrehung der Steuerung übertragen wird. Die Signale der beiden Köpfe werden in einer Auswerte-Elektronik zusammengefasst, die dann an die NC-Steuerung angeschlossen wird. Bei der Entwicklung der Auswerte-Elektronik wurde der Fokus auf kürzest mögliche Rechenzeit gelegt, wodurch kurze Totzeiten und damit maximale Regelgüten erzielt sind. Der Antrieb des Rundtisches erfolgte über einen Torquemotor vom Typ RE11-3P-410 \times 50 des Herstellers IDAM mit einem ungekühlten Nennmoment von 307 Nm, als Steuerung kam eine Sinumerik 840D/611D mit Performance-Regelung zum Einsatz.

Ergebnisse der vergleichenden Untersuchungen

An dem vollständig betriebsbereiten Rundtisch, *Bild 3*, wurden im ersten Schritt der Untersuchungen die Regler- und Filtereinstellungen optimiert. Die Stromsollwertfilter konnten dabei auf ein Tiefpassfilter beschränkt werden, der für beide Mess-Systeme von 2 kHz (Standardeinstellung) auf 1 kHz herabgesetzt wurde, während zusätzliche Stellgrößenbegrenzungen und andere Einflussfaktoren (z. B. Aufschaltfunktionen, Drehzahlsollwertfilter) vollständig abgeschaltet blieben. Für jedes Mess-System wurden jeweils zwei Sätze mit Reglereinstellungen mit unterschiedlichen Anforderungen ermittelt, wobei zur besseren Vergleichbarkeit bei der Parameterfindung bei beiden Mess-Systemen die gleichen Optimierungsgrundsätze angewendet wurden. „Moderat“ bezeichnet die Einstellungen für den Produktionsbetrieb, hierbei wurde eine Amplitudenüberhöhung im Führungsfrequenzgang des Drehzahlreglers von maximal +3 dB zugelassen, während im Lageregelkreis in keinem Frequenzbereich eine positive Amplitude gestattet war. Auf diese Weise wird ausgeschlossen, dass es durch die Anregung von Störschwingungen zu Überspringen und damit zu Konturverletzungen am Werkstück kommen kann. Die „maximalen“ Einstellungen brachten das System so weit wie möglich

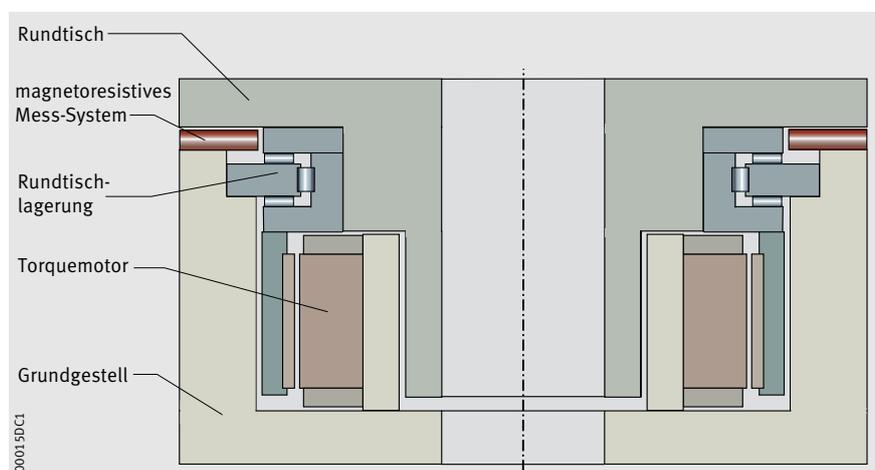


Bild 3: Konstruktiver Aufbau des Rundtisches mit beiden Winkel-Mess-Systemen

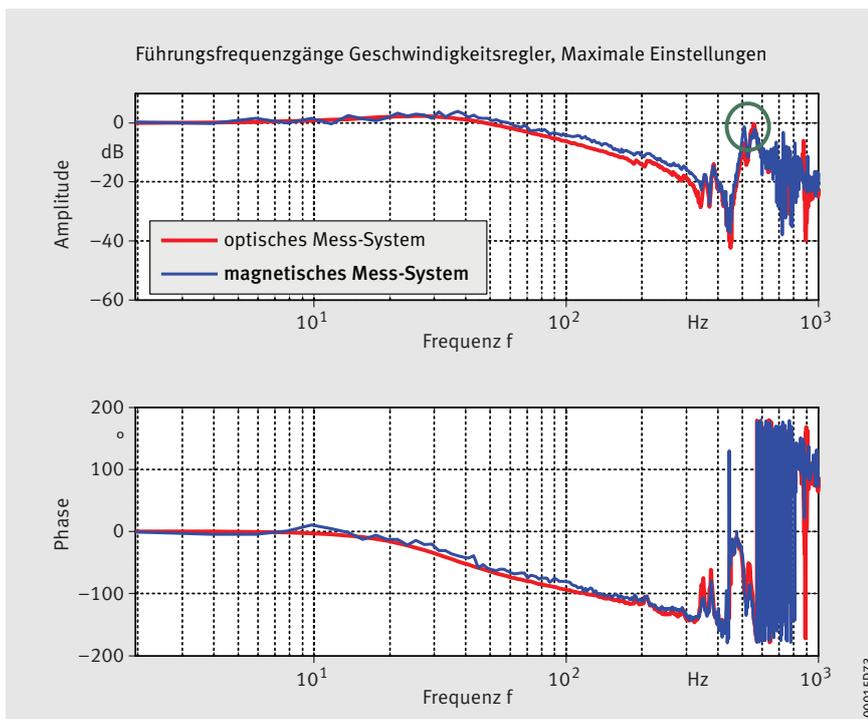


Bild 4: Führungsfrequenzgang des Geschwindigkeitsregelkreises beider Systeme im Vergleich

an den Stabilitätsrand, um das dynamische Potential des Rundtisches zu ermitteln. Die jeweiligen Einstellungen können der Tabelle entnommen werden. Durch die veränderten Filtereinstellungen konnte der Proportionalanteil im Drehzahlregler (K_p) für beide Mess-Systeme deutlich gesteigert werden, wovon die Dynamik des Rundtisches stark profitierte. Nach der Optimierung der Regelung waren mit dem magnetischen Mess-System YRTSM im direkten Vergleich etwas höhere Reglereinstellungen möglich. Im Führungsfrequenzgang des Drehzahlreglers zeigte sich, dass das optische Mess-System durch eine Schwingung bei zirka 550 Hz begrenzt wurde, während das magnetische

Mess-System erst bei höherem K_p durch eine Schwingung bei etwa 500 Hz an die Stabilitätsgrenze kam, *Bild 4*, grüne Markierung. Die Sprungantworten der Regelkreise waren bei diesen Einstellungen mit beiden Mess-Systemen noch stabil und zeigten kein unzulässiges Überschwingen. Mit Hilfe einer Modalanalyse der Tischstruktur im Bereich von 150 Hz bis 2 000 Hz konnte gezeigt werden, dass bei 550 Hz eine starke Taumelschwingung zwischen dem Gehäuse des optischen Mess-Systems und dem Gehäuse des Rundtisches auftrat, die möglicherweise von der Kupplung im optischen Mess-System nicht mehr vollständig ausgeglichen werden konnte und somit zu Messfehlern

führte. Das magnetische Mess-System profitierte dagegen von der mechanisch steifen Anbindung direkt am Lager des Rundtisches.

Die Auswirkungen der Anbringung des Mess-Systems bei Direktantrieben auf die Reglereinstellungen konnte bereits in der Vergangenheit unter Beweis gestellt werden [1]. Zusätzlich zu dieser dominanten Eigenform identifizierte die Modalanalyse noch weitere Eigenfrequenzen, die sich in geringerem Ausmaß im Führungsfrequenzgang abzeichnen, oder bereits jenseits der relevanten Reglerbandbreiten liegen.

Beide Mess-Systeme ermöglichten einen stabilen Gleichlauf. Die Qualität des Geschwindigkeitssignals richtete sich dabei nach der Auflösung des verwendeten Mess-Systems und konnte zusätzlich durch die Verwendung des Drehzahlwertfilters verbessert werden. Einen erheblichen Einfluss hatte auch die Dynamische Steifigkeitsregelung (Dynamic Servo Control, DSC) der Siemens-Steuerung, welche die interne Berechnung des Lagereglers aus der Steuerung in den Antrieb verlagerte, und damit die systeminterne Totzeit der Drehzahlollwertschnittstelle eliminierte [2]. Die Aktivierung dieser Zusatzfunktion verbesserte das niederfrequente Störverhalten der Regelung mit magnetoresistivem Mess-System sehr deutlich.

Im Endergebnis war das dynamische Verhalten des Rundtisches mit beiden Mess-Systemen an der Siemens-Steuerung 840D/611D vergleichbar. Es zeigte sich, dass das magnetische Mess-System in Bezug auf Reglereinstellung und dynamisches Verhalten nicht hinter dem optischen Mess-System zurückblieb. Im Gegenteil, es konnten sogar etwas höhere Reglereinstellungen mit dem magnetischen Mess-System erzielt werden, die sich durch die minimalen Unterschiede der in dem *Bild 5* und *Bild 6* gezeigten Kurven äußerten. Gegenüber den moderaten Einstellungen, welche die oben genannten Einstellregeln erfüllten, erzielten die maximalen Parameter eine zusätzliche Verkürzung der Anstiegszeit der Sprungantworten (auf 95% des Sollsprungs) um 20% bis 25% in beiden Regelkreisen und für beide Mess-Systeme. Damit betrug die Anstiegszeit im Lageregelkreis für einen Sprung von $0,5^\circ$ jeweils minimal 67 ms, während ein Sollsprung von 1 min^{-1} im Geschwindigkeitsregelkreis jeweils zirka 8 ms beanspruchte. Zusätzlich verringerte sich das Überschwingen in den Sprungantworten des Geschwindigkeitsregelkreises um 5% bis 10%.

Die Geschwindigkeitssignale zeigten sich entsprechend des Auflösungsunterschieds der beiden Mess-Systeme unterschiedlich stark verrauscht und mussten für die Darstellung in *Bild 6*

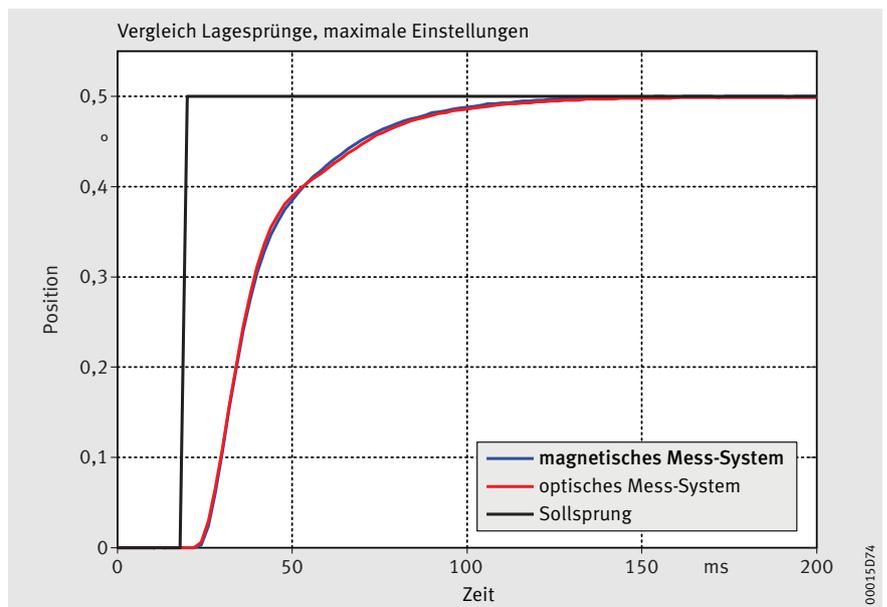


Bild 5: Sprungantwort des Lageregelkreises beider Systeme im Vergleich

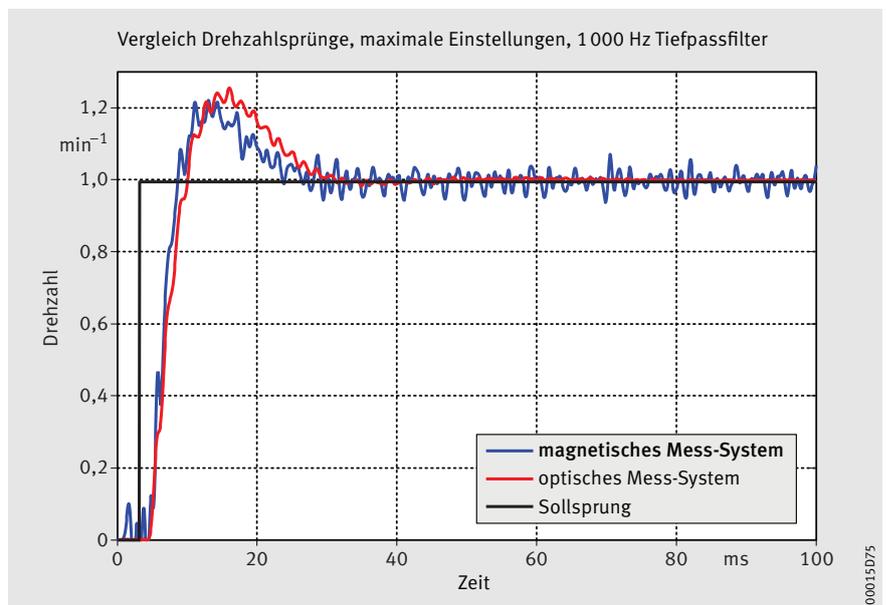


Bild 6: Sprungantwort des Geschwindigkeitsregelkreises beider Systeme im Vergleich

00015D74

00015D75

erneut mit 1 kHz tiefpassgefiltert werden. Das stärkere Rauschen des magnetischen Mess-Systems zeigte sich auch im momentbildenden Strom, setzte sich aber nicht in zusätzlicher Motorerwärmung um.

Entsprechende Temperaturmessungen im intermittierenden Dauerbetrieb ohne Wasserkühlung wurden an den Torquemotorwicklungen durchgeführt, wobei ein praxisgerechter Verfahrenszyklus zugrunde gelegt wurde. Die ermittelten Temperaturen im Beharrungszustand unterschieden sich für beide Winkel-Mess-Systeme im Vergleich an den verschiedenen Messpunkten um weniger als 0,5 K, Bild 7.

Parallel zu den messtechnischen Untersuchungen wurde ein Simulationsmodell des Rundtisches in Matlab/Simulink entwickelt, das die Eigenschaften des mechanischen Systems und seiner Regelung widerspiegelte. Die vollständige Abbildung der Kaskadenregelung mit den verschiedenen Filtern, den unterschiedlichen Abtastzeiten, sowie den Eigenschaften des Motors und der dazugehörigen Massenträgheiten erlaubte die Nachbildung des dynamischen Verhaltens des Rundtisches. Zusätzlich konnte durch die Integration von Ausschnitten real gemessenen Messrauschens in die simulierten Mess-Systeme die Simulationsergebnisse weiter

verbessert werden. Das Modell demonstrierte durch Variationen der Mess-System-Eigenschaften und der Regelparameter deutlich, wie die Systemdynamik von den erreichbaren Reglereinstellungen und von den Eigenschaften des Mess-Systems abhängt. Die Modellierung des Rundtisches zeigte darüber hinaus, dass die Verlustleistung

des momentbildenden Stromes im Motor abhängig vom Belastungsmoment ein Mehrfaches des Beitrages der Verlustleistung durch das Stromrauschen beträgt. Die Motorkühlung dürfte im realen Betrieb noch zu einer zusätzlichen Verringerung der Motorwicklungs-erwärmung führen, die durch das Stromrauschen verursacht wird.

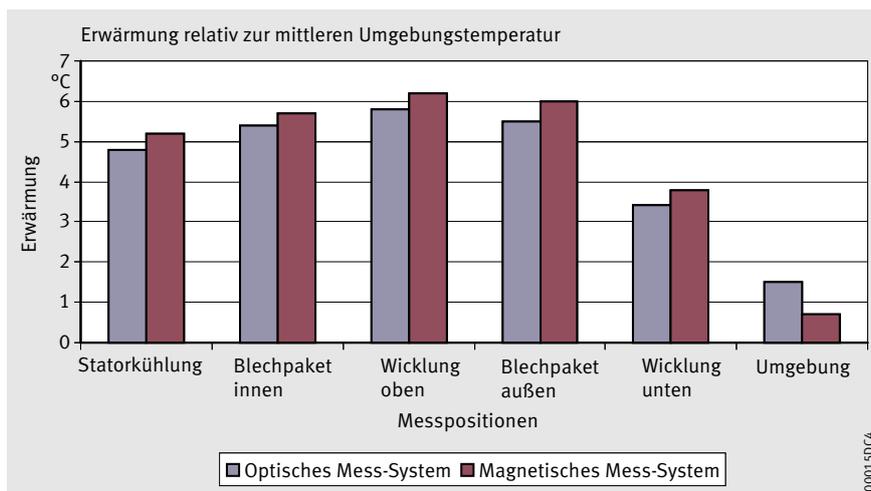


Bild 7: Erwärmung der Motorwicklung mit beiden Mess-Systemen im Vergleich

Zusammenstellung der ermittelten Reglereinstellungen bei beiden Mess-Systemen			
Magnetisches Mess-System		Optisches Mess-System	
Moderate Einstellung	Maximale Einstellung	Moderate Einstellung	Maximale Einstellung
$K_v = 2,0$	$K_v = 2,5$	$K_v = 1,9$	$K_v = 2,5$
$K_p = 1\ 200$	$K_p = 2\ 300$	$K_p = 1\ 000$	$K_p = 1\ 700$
$T_p = 7,5\ ms$	$T_p = 7,5\ ms$	$T_p = 7,5\ ms$	$T_p = 7,5\ ms$
$K_i = 10\ V/A$	$K_i = 10,4\ V/A$	$K_i = 10\ V/A$	$K_i = 10,4\ V/A$
$T_i = 2\ 000\ \mu s$	$T_i = 2\ 000\ \mu s$	$T_i = 2\ 000\ \mu$	$T_i = 2\ 000\ \mu$
Stromsollwertfilter: <input type="checkbox"/> Tiefpass bei 1 kHz <input type="checkbox"/> Keine Bandsperrern		Erläuterungen: <input type="checkbox"/> K_v entspricht P-Faktor Lageregler <input type="checkbox"/> K_p entspricht P-Faktor Geschwindigkeitsregler <input type="checkbox"/> T_p entspricht Zeitkonstante I-Anteil Geschwindigkeitsregler <input type="checkbox"/> K_i entspricht P-Faktor Stromregler <input type="checkbox"/> T_i entspricht Zeitkonstante I-Anteil Stromregler	

Zusammenfassung

Für einen direkten Vergleich wurde eine mit einem optischen Drehgeber ausgeführte Rundtischachse von der Schaeffler KG mit dem magnetoresistiven Winkel-Mess-System YRTSM ergänzt. Die Durchführung einer Regler- und Filteroptimierung, einer Untersuchung des dynamischen Verhaltens sowie einer Modalanalyse der Tischstruktur und des Erwärmungsverhaltens im Dauerbetrieb in Zusammenarbeit mit dem WZL ergab ein insgesamt vergleichbares Verhalten des Rundtisches mit beiden Mess-Systemen. Für eine Vielzahl von Anwendungen bietet das in den Lagerbauraum vollständig integrierte Winkel-Mess-System YRTSM auf magnetoresistiver Basis eine wirtschaftliche Lösung mit konstruktiven Vorteilen, ohne dass Einbußen bezüglich der Dynamik des Rundtischsystems oder messbar höhere Verlustleistungen im Torquemotor in Kauf genommen werden müssen. Bei höchsten Gleichlaufanforderungen, wie beispielsweise Ultrapräzisionsanwendungen, kann jedoch in direkt angetriebenen Rundtischachsen von Werkzeugmaschinen unter Umständen der Einsatz von hochauflösenden, optischen Einbaudrehgebern notwendig sein.

Literaturhinweise:

- [1] Weck, M.; Brecher, C.; Krüger, P.: Grenzen für die Reglereinstellung bei elektrischen Lineardirektantrieben. Vereinigte Fachverlage, antriebstechnik 38 (1999), Nr. 2 und Nr. 3, S. 55-58 und 71-76.
- [2] N.N.: Siemens-Handbuch: Sinumerik 840Di. Ausgabe 01/2005, S. 10-327.

Die Autoren dieses Beitrages:

- **Dipl.-Ing. Andreas Schmidt** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Gruppe Antriebe & Diagnose am Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen der RWTH Aachen.
- **Dipl.-Ing. Thorsten Ostermann** ist Leiter der Gruppe Antriebe & Diagnose am Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen.
- **Dipl.-Ing. Werner Herfs** ist Oberingenieur der Abteilung Steuerungstechnik und Automatisierung am Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen.
- **Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher** ist Inhaber des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen.
- **Dipl.-Ing. (FH) Günter Schmid** ist Projektleiter für mechatronische Systeme im Bereich Produktionsmaschinen bei der Schaeffler KG.

Erstveröffentlichung

Der Aufsatz erschien in der „Antriebstechnik 1-2/2008“.

Hohe Belastbarkeit bei höchster Präzision

Winkel-Mess-System für direkt angetriebene Präzisions-Rundachsen

Die AXA Entwicklungs- und Maschinenbau GmbH setzt beim neuen Dreh-/Fräszentrum VHC50-D zur Erzielung hoher Drehzahlen, hoher Belastbarkeit bei höchster Präzision, Steifigkeit und Dynamik auf die Lagerbaureihe mit integriertem Winkel-Mess-System der Schaeffler Gruppe Industrie.

Hohes Drehzahlvermögen und hohe Belastbarkeit bei höchster Präzision, Steifigkeit und Dynamik: Diese herausfordernden Ziele stellte sich die AXA Maschinenbau GmbH in Schöppingen bei der Entwicklung einer neuen Mehrachsbearbeitungsmaschine, *Bild 8*. Zentrale Aufgabe dabei war die Neuentwicklung eines Rundtisches, *Bild 9*, der sowohl zum Bohren und 5-Achs-Fräsen als auch zur Drehbearbeitung eingesetzt werden kann. Dadurch werden Senkrecht- und Plan-drehen sowie Fräsen und Bohren in einer einzigen Aufspannung ermöglicht. Bei der Auswahl der Antriebskomponenten für diesen Rundtisch ging AXA Maschinenbau keine Kompromisse ein. Neben einem Torquemotor wurde das HIGH-SPEED Axial-/Radialzylinderrollenlager YRTSM460 der Schaeffler Gruppe Industrie ausgewählt. Die neue Lagerbaureihe mit integriertem Winkel-Mess-System ist speziell für direkt angetriebene, hochdynamische und präzise Rundachsen entwickelt worden.

Die Vorteile sind höchste Präzision bei der Bearbeitung und eine äußerst wirtschaftliche Fertigung komplexer Bauteile.

Rundtischlager mit integriertem, magnetoresistiven Winkel-Mess-System

Das Lager ist mit einem in den Lagerbauraum integrierten, magnetoresistiven Winkel-Mess-System ausgestattet und gezielt auf direkt angetriebene Rundtische für Werkzeugmaschinen abgestimmt. Die magnetische Winkelteilung ist bei diesem System stoffschlüssig und stoßfrei auf der drehenden Wellenscheibe des Lagers aufgebracht. Diese wird von zwei Sensorköpfen abgetastet, die um 180° winkelfersetzt angeordnet sind und direkt an das Grundgestell des Rundtisches angeflanscht werden. Die Zweikopfabtastung stellt sicher, dass eventuell durch Bearbeitungskräfte auftretende Mittenverlagerungen systemintern kompensiert werden. Damit werden absolute Messgenauigkeiten von kleiner $\pm 3''$ erreicht. Zudem verdoppelt diese Art der Abtastung die Winkelauflösung und überträgt insgesamt analoge Signale aus 7 008 Strichen pro Umdrehung an die Steuerung.

Die Signale der beiden Köpfe werden in einer Auswerte-Elektronik zusammengefasst, die dann an die NC-Steuerung angeschlossen wird.

Auswerte-Elektronik mit kürzest möglicher Rechentaktzeit

Für maximale Regelgüte wurde bei der Entwicklung der Auswerte-Elektronik der Fokus auf eine kürzest mögliche Rechentaktzeit gelegt. Diese äußerst schnell arbeitende Auswerte-Elektronik und die besondere Lagerkonstruktion ermöglichen bei der gewählten Lagergröße eine Grenzdrehzahl von 560 Umdrehungen pro Minute. Beide Sensorköpfe werden an das Grundgestell des Rundtisches mechanisch steif angeflanscht und verschraubt. Infolge der steifen Ankopplung der Winkelteilung an den drehenden Rundtisch und aufgrund der robusten, schwingungsstabilen Anbindung der Sensorköpfe an das Grundgestell werden höchste Verstärkungsfaktoren im Regelkreis erzielt und damit bestmögliche Regelgüten, Regelsteifigkeiten und Dynamik ermöglicht. Darüber hinaus ist diese konstruktive Ausführung platzsparend in den Lagerbauraum integriert, wodurch die Rundtischmitte für Leitungsdurchführungen frei zur Verfügung steht. Kompaktere Maschinenbaugruppen und Kosteneinsparungen in Konstruktion, Beschaffung und Montage sind die Folge.

Unempfindlich gegen Wälzlagerfette, -öle, Kühlschmierstoffe

Die Sensorköpfe und die Auswerte-Elektronik sind gegen chemische, mechanische und elektrische Einwirkungen aus der Umgebung



Bild 8: Dreh-/Fräszentrum Typ VHC50-D der AXA Maschinenbau GmbH

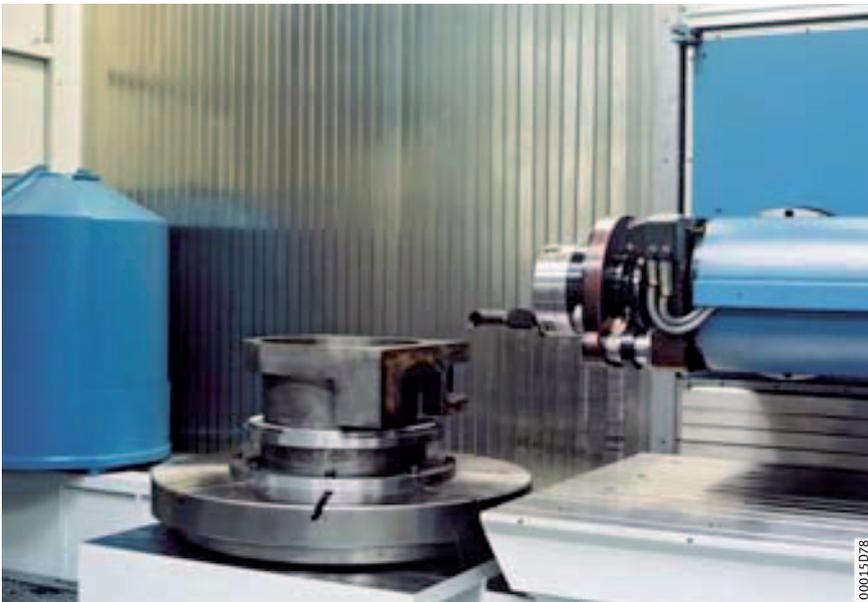


Bild 9: Rundtisch für Dreh-/Fräsbearbeitung in einer einzigen Aufspannung

geschützt, was in umfangreichen Umweltsimulationen nachgewiesen wurde. Insbesondere das magnetoresistive Messprinzip erwies sich gegen Wälzlagerfette und -öle sowie gegen Kühlschmierstoffe als unempfindlich. Der Einsatz des Winkel-Mess-Systems in Werkzeugmaschinen unter Produktionsbedingungen zeigte die Praxistauglichkeit auf. Bei Zerspanungsversuchen wurden Konturabweichungen von kleiner als 2" ermittelt.

Für äußerst steife und dynamische Reglereinstellungen

Mit der neuen Lagerbaureihe YRTSM hat die Schaeffler Gruppe Industrie ein Winkel-Mess-System entwickelt, das optimal auf die Anforderungen direkt angetriebener Rundachsen für Werkzeugmaschinen abgestimmt ist. Es ist für Lagerinnendurchmesser von 200 mm bis 460 mm verfügbar und ermöglicht abhängig von der Baugröße Grenzdrehzahlen von bis zu 1 160 Umdrehungen pro Minute. Das Mess-System vereint höchste Messgeschwindigkeit und Grenzdrehzahl mit hoher Messgenauigkeit, und ermöglicht zudem äußerst steife und dynamische Reglereinstellungen für den Torquemotor-Antrieb. Dem Trend nach schnell drehenden Rundtischen für die wirtschaftliche Fräs-/Dreh-Komplettbearbeitung wird damit voll entsprochen.

Erstveröffentlichung

Der Aufsatz erschien in der „*mav*, 2/2008“.



Ihr Ansprechpartner

Dipl.-Ing. (FH) Robert Jung
Telefon +49 9132 82-2631
E-Mail
Robert.Jung@schaeffler.com

Schaeffler KG

Industriestraße 1–3
91074 Herzogenaurach