

Schutz eines Harmonic-Drive-Getriebes durch eine integrierte Überlastkupplung

PETER WERNER GOLD, RALF SCHELENZ, HANS KOENEN

Bei CNC-Werkzeugmaschinen werden an die Zustellbewegung des Werkzeugträgers hohe Anforderungen bezüglich Positioniergenauigkeit und Steifigkeit gestellt. Das Harmonic-Drive-Getriebe wird häufig für die Lösung dieser Aufgabe verwendet. Im Antrieb eines solchen Systems soll eine Überlastkupplung das wertvolle Präzisionsgetriebe bei einer Störung schützen. Der Beitrag stellt die Forschungsergebnisse für eine im Getriebe integrierte Überlastkupplung vor.

Einleitung

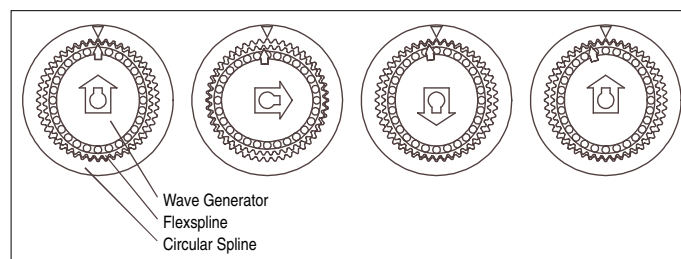
Moderne Produktionsanlagen unterliegen der Forderung nach fortwährender Steigerung der Produktivität. Diese wird vor allem durch kürzere Bearbeitungszeiten, höhere Verfügbarkeit der Anlagen, längere Maschinenlaufzeiten sowie geringere Betriebskosten erreicht. Hieraus resultieren Forderungen wie die Erhöhung der Antriebsleistung, der Dynamik und der Leistungsdichte bei gleichzeitiger Steigerung der Betriebssicherheit.

Im Hinblick auf diese Entwicklung besitzt der Bereich Antriebstechnik eine Schlüsselrolle. Für die einzelnen Komponenten der Antriebe bedeutet die Erhöhung des Wirkungsgrades eine möglichst steife sowie dämpfungsarme Auslegung bei gleichzeitiger Minimierung der bewegten Massen. Dies führt zu einer geringeren Sicherheit gegenüber Überlastereignissen, weil einerseits für die Dimensionierung der Bauteile möglichst nur mit der betrieblichen Nennlast gerechnet wird und andererseits die Lastamplituden durch eine geringere Dämpfung sowie durch eine höhere Steifigkeit und Geschwindigkeit ansteigen. Überlasten, die beispielsweise durch Störungen im Arbeitsprozess hervorgerufen werden, können Vorschädigungen erzeugen, die auch bei weiterem Betrieb der Anlage mit Nennlast zu Rissfortschritt und so zu einem Ausfall der gesamten Produktionsanlage führen können.

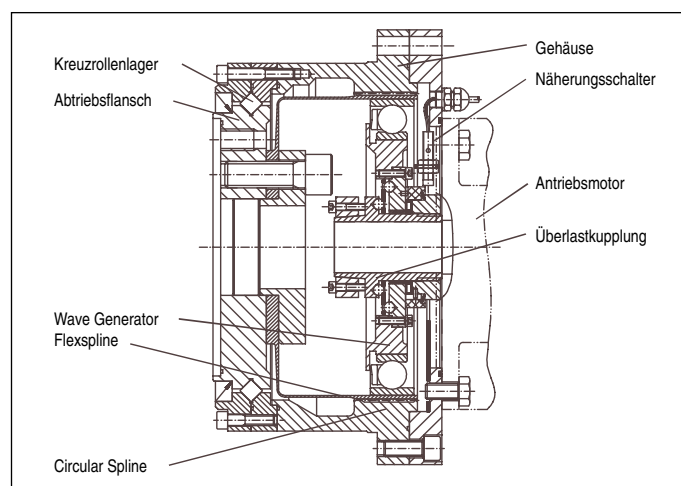
Bei CNC-Werkzeugmaschinen werden Störfälle häufig dadurch verursacht, dass sich Programmierfehler in den Steuerungsprogrammen nicht gänzlich vermeiden lassen. Aus diesem Grund kommt es regelmäßig zu Kollisionen, bei denen verfahrbare Komponenten beispielsweise gegen die Werkstückaufnahme gefahren werden. Wie zahlreiche Untersuchungen gezeigt haben, kann der Einbau einer mechanischen Überlastkupplung schädigende Beanspruchungen bei Störungen im Arbeitsprozess und die damit verbundenen Kosten vermindern [1].

Harmonic-Drive-Getriebe mit integrierter Überlastkupplung

Für Positionieraufgaben mit höchsten Anforderungen wird vielfach das Harmonic-Drive-Getriebe eingesetzt. Vorteilhaft sind die hohe Positionier- und Wiederholgenauigkeit sowie die große Überset-



1: Funktionsprinzip der Harmonic-Drive-Getriebe



2: Harmonic-Drive-Getriebe mit integrierter Überlastkupplung

zung in einer Stufe bei gleichzeitig hoher Leistungsdichte und hoher Torsionssteifigkeit. Die Entwicklung dieser 1955 von Walter Musser in den USA erfundenen Getriebeart erfolgte im Auftrag der NASA für den Einsatz in der Luft- und Raumfahrt. Angeregt durch die Anforderungen des Marktes wurden seitdem Harmonic-Drive-Getriebe in verschiedenen Bauformen und Baugrößen entwickelt. Das Nenn Drehmoment liegt mittlerweile zwischen 1,5 und 9000 Nm. Die heute weltweit von zwei Firmen hergestellten Getriebe finden zunehmend Verwendung auf dem Sektor der Industrieroboter, Werkzeug- und Druckmaschinen. Weitere Einsatzgebiete sind die Medizin-, Halbleiter- und Nachrichtentechnik sowie Verpackungs-, Textil- und Messmaschinen.

Die Harmonic-Drive-Getriebe bestehen im Wesentlichen aus den drei Komponenten Flexspline, Circular Spline und Wave Generator (Bild 1):

- Der Flexspline ist eine dünnwandige, zylindrische Stahlbüchse mit Außenverzahnung,
- der Circular Spline ist ein zylindrischer Ring mit Innenverzahnung und
- der Wave Generator ist eine elliptische Stahlscheibe mit zentrischer Nabe. Auf dieser elliptischen Stahlscheibe sitzt ein Kugellager mit dünnwandigem Innen- und Außenring.

Das Funktionsprinzip unterscheidet sich grundlegend von dem eines konventionellen Umlaufgetriebes. Der elliptische Wave Generator als angetriebenes Teil verformt den Flexspline, der sich in den Bereichen der großen Ellipsenachse mit dem innenverzahnten, feststehenden Circular Spline im Eingriff befindet. Durch Drehen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Werner Gold ist Leiter des Instituts für Maschinenelemente und Maschinengestaltung (IME) der RWTH Aachen in 52062 Aachen; Dr.-Ing. Ralf Schelenz ist Oberingenieur und Dipl.-Ing. Hans Koenen ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am IME

des Wave Generators verlagert sich die große Ellipsenachse und damit der Zahneingriffsbereich. Nach einer vollen Umdrehung des Wave Generators vollzieht sich eine Relativbewegung zwischen Flexspline und Circular Spline um die Größe zweier Zähne, da der Flexspline zwei Zähne weniger als der Circular Spline besitzt. Bei feststehendem Circular Spline dreht sich der Flexspline entgegengesetzt zum Antrieb.

Eine Überlastkupplung lässt sich platz sparend auf der Antriebsseite des Getriebes im Flexspline unterbringen (Bild 2). Ein Antrieb für die Werkzeugzustellung in einer Werkzeugmaschine wurde mit dieser Einheit aus Getriebe und Überlastkupplung versehen. Im Rahmen einer am Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung der RWTH Aachen (IME) durchgeführten Untersuchung ist die Eignung der integrierten Überlastkupplung zum Schutze des wertvollen Getriebes experimentell und rechnerisch überprüft worden. Darüber hinaus ist mittels Simulationsrechnungen die maximale Antriebsdrehzahl bestimmt worden, die im Falle einer Kollision des Abtriebs gerade keine Schädigung des Getriebes bewirkt.

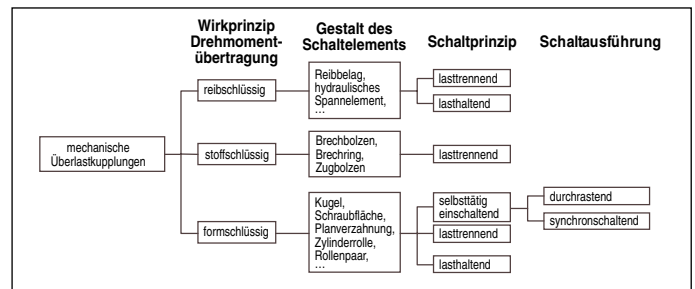
Verwendete Überlastkupplung

Bild 3 zeigt die Einteilung von mechanischen Überlastkupplungen nach den Kriterien Wirkprinzip der Drehmomentübertragung, Gestalt des Schaltelements, Schaltprinzip und Schaltausführung. Die Einteilung in der ersten Ebene erfolgt nach den Wirkprinzipien Reibschluss, Stoffschluss und Formschluss. Die zweite Ebene unterscheidet die Überlastkupplungen hinsichtlich der Gestalt des verwendeten Schaltelements. Bei handelsüblichen Kupplungen werden Schaltelemente in Form von Reibbelägen, Brechbolzen, Kugeln, Zylinderrollen usw. eingesetzt. In der dritten Ebene erfolgt die Gliederung nach den Schaltprinzipien lasttrennend, lasthaltend und selbsttätig einschaltend. Lasttrennende Kupplungen unterbrechen nach erfolgter Überlast den Drehmomentfluss im Antriebsstrang bleibend. Als bekanntes Beispiel sei hier die Brechbolzenkupplung genannt. Bei dem lasthaltenden Schaltprinzip geht der Kraftfluss während des Schaltens nicht verloren. Diese Art des Schaltprinzips gewährleistet somit die Lastsicherung. Eine selbsttätig einschaltende Überlastkupplung unterbricht wie die lasttrennende Kupplung den Drehmomentfluss bei einem Überlastereignis, schaltet aber bei weggefallener Überlast automatisch wieder ein.

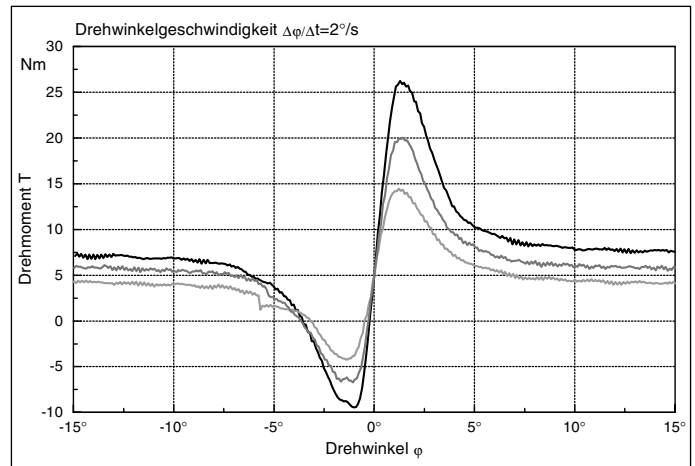
Die Unterscheidung zwischen den Schaltausführungen durchrastend und synchronschaltend bei den selbsttätig einschaltenden, formschlüssigen Kupplungen beruht auf der unterschiedlichen Anordnung der Schaltelemente. Bei der Durchrastkupplung sind die Schaltelemente regelmäßig über den Umfang der Kupplung verteilt: Nach Wegfall der Überlast rastet sie am nächsten Schaltelement wieder ein. Die Synchronkupplung besitzt eine unregelmäßige Verteilung der Schaltelemente, wodurch die Kupplung nur in einer Position wieder einschalten kann. Diese Kupplungsausführung findet dort Verwendung, wo die relative Winkellage der Elemente im Antriebsstrang exakt einzuhalten ist.

Die in das Harmonic-Drive-Getriebe eingebaute Kupplung gehört zur Gruppe der selbsttätig einschaltenden Überlastkupplungen. Sie ist erhältlich in den Schaltausführungen durchrastend und synchronschaltend. Im vorliegenden Fall wird die synchronschaltende Version verwendet.

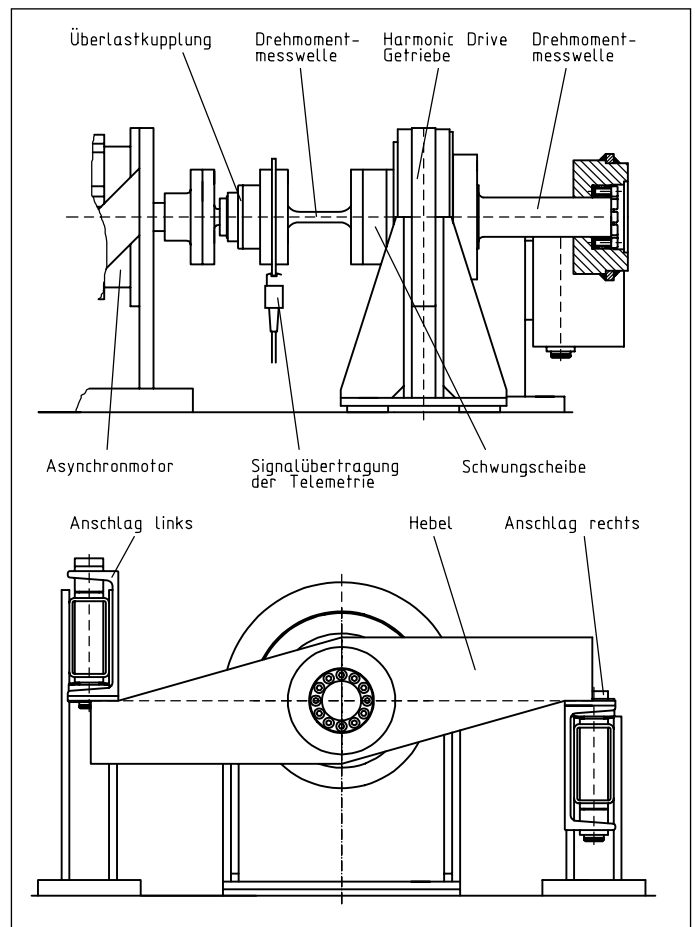
Die Untersuchung des Schaltverhaltens bei verschiedenen Auslösedrehmomenten geschieht auf einem servohydraulischen Drehzylinderprüfstand. Die Anlage wird bei den Versuchen in der Betriebsart Winkelregelung betrieben. Zu Anfang jeder Messung befindet sich die Kupplung im ausgerasteten Zustand, der relative Drehwinkel beider Kupplungshälften beträgt $\varphi = -20^\circ$. Das Sollwertsignal für die Winkelregelung bewirkt eine Drehbewegung des Zylinders mit der geringen konstanten Winkelgeschwindigkeit von $\Delta\varphi/\Delta t = 2 \text{ }^\circ/\text{s}$, bis der relative Drehwinkel 20° beträgt. Dabei werden die Bereiche Einschalten, Übertragungsbereich, Auslösen und Freischaltphase nacheinander durchfahren. Bei dieser geringen Winkelgeschwindigkeit sind die dynamischen Zusatzdrehmomente durch die schwingenden, angrenzenden Massenträgheitsmomente gering. Somit kann das gemessene Drehmoment mit dem Drehmoment in der Kupplung gleichgesetzt werden. Für verschiedene Messungen wird über die Veränderung der Federvorspannung das Auslösedrehmoment variiert. Eine Auswahl dieser Messungen mit



3: Einteilung von Überlastkupplungen



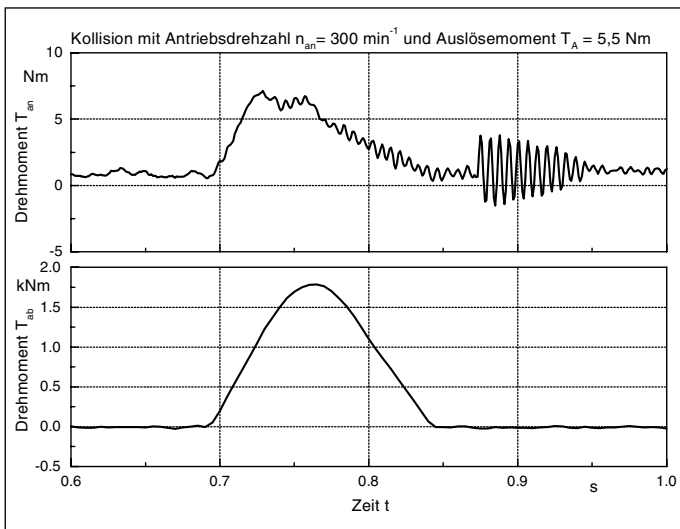
4: Schaltverhalten der verwendeten Überlastkupplung



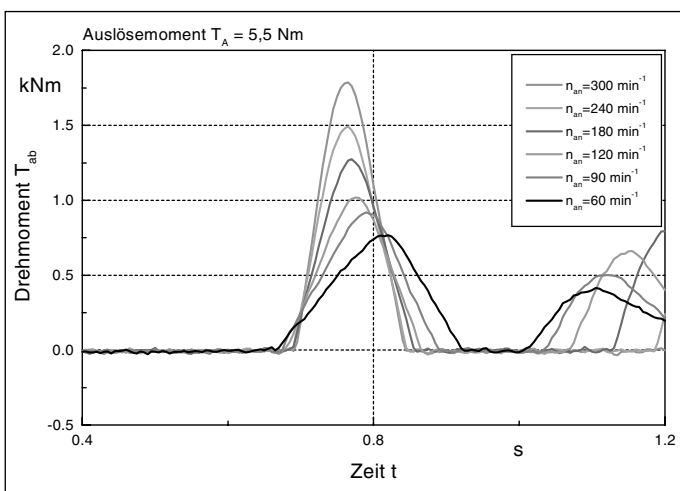
5: Versuchsaufbau für die Kollisionsversuche

dem Auslösedrehmoment zwischen 14 und 26 Nm ist in Bild 4 dargestellt.

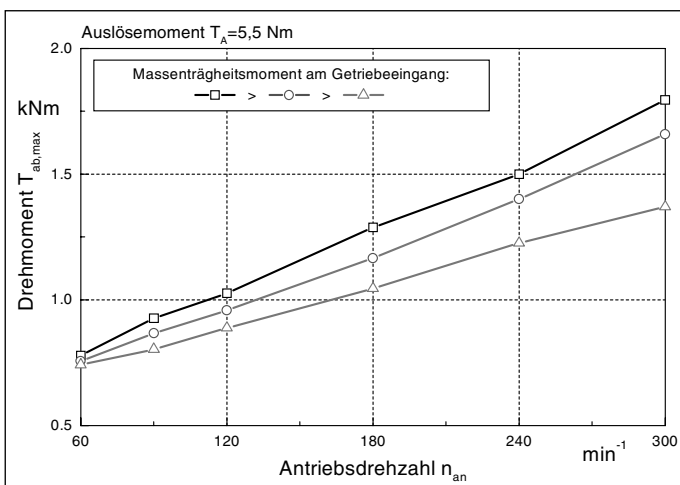
Qualitativ zeigt die Kupplung den für eine synchronschaltende Überlastkupplung charakteristischen Zusammenhang zwischen Drehmoment und Drehwinkel. Beim selbsttätigen Einschalten fal-



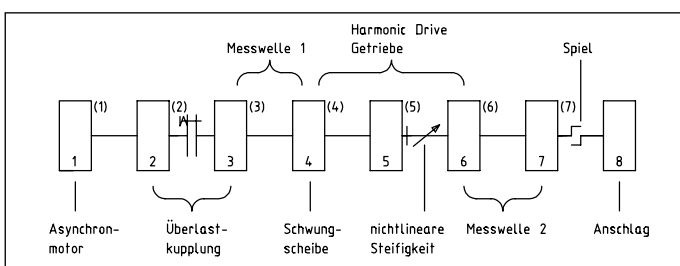
6: Gemessene Drehmomentverläufe



7: Drehmoment am Abtrieb bei Kollisionen mit unterschiedlichen Antriebsdrehzahlen



8: Maximales Drehmoment am Abtrieb in Abhängigkeit von der Antriebsdrehzahl und dem Massenträgheitsmoment am Antrieb



9: Simulationsmodell des Prüfstands

len die Drehmomentverläufe unter null ab. Im Übertragungsbereich zeigt die Kupplung lineares Verhalten, wobei die Steifigkeit der Kupplung umso größer ist, je höher das Auslösedrehmoment ist. Im Bereich des Auslösens fällt das übertragene Drehmoment auf ein niedriges Resttreibmoment ab. Dieses Resttreibmoment bleibt während der gesamten Freisaltphase konstant.

Kollisionsversuche

Die Kollisionsversuche fanden auf einem eigens gebauten Prüfstand (Bild 5) mit einem kleineren Getriebe statt. Der Prüfstand wird von einem Asynchronmotor angetrieben. Die Drehzahlsteuerung des Motors geschieht über einen nicht dargestellten Frequenzumrichter. Das Prüfgetriebe hat die Übersetzung $i = 121$, für das zulässige Grenzdrehmoment bei Kollision gilt: $T_{K,Grenz} = 2000 \text{ Nm}$. Die Überlastkupplung ist über eine Drehmomentmesswelle mit dem Getriebe verbunden. Das am Getriebeeingang wirksame Massenträgheitsmoment lässt sich durch Austauschen einer Schwungscheibe verändern. Am Getriebeausgang ist eine zweite Messwelle angebracht, an der ein Hebel befestigt ist. Die Kollision wird provoziert, indem die links und rechts angeordneten Anschläge in die Kreisbahn der beiden Hebelenden hineingeschwenkt werden. Weitere Versuchsparameter bei den Kollisionsversuchen sind die Antriebsdrehzahl, das Auslösedrehmoment der Kupplung und die Steifigkeit der Anschläge.

Bild 6 zeigt die gemessenen Drehmomentverläufe bei einer Kollision mit der Antriebsdrehzahl von 300 min^{-1} . Das Auslösedrehmoment der Kupplung beträgt $5,5 \text{ Nm}$. Zunächst überträgt die Messwelle am Antrieb das Reibmoment des Getriebes, der Abtrieb dreht frei. Zum Zeitpunkt $t \approx 0,69 \text{ s}$ schlägt der am Abtrieb befestigte Hebel auf die beiden Anschläge auf, das Drehmoment in beiden Messwellen steigt an. Zum Zeitpunkt $t \approx 0,73 \text{ s}$ wird in der Überlastkupplung das Auslösedrehmoment erreicht, das Drehmoment in der Antriebswelle sinkt. Das Drehmoment in der Abtriebswelle steigt weiter an, da die Massenträgheitsmomente vor dem Getriebe noch eine starke Verzögerung erfahren. Nachdem auch in der Abtriebswelle der Maximalwert erreicht ist, federt der Hebel zurück und das Drehmoment fällt auf null ab. Bei $t \approx 0,87 \text{ s}$ beträgt die relative Verdrehung der Kupplung 360° . Das selbsttätige Einschalten und das sofortige Auslösen der Überlastkupplung initiiert eine starke Schwingung in die Antriebswelle. Dies wirkt sich auf das Drehmoment im Abtrieb nicht aus, da der Hebel in diesem Augenblick keinen Kontakt zu den Anschlägen hat.

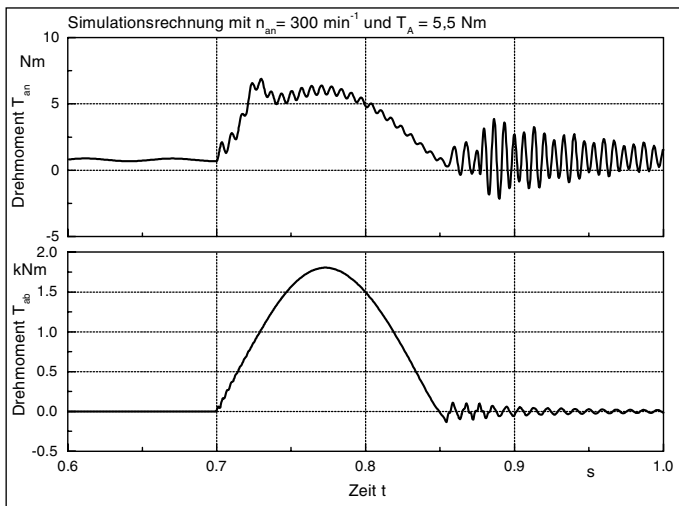
In Bild 7 sind beispielhaft einige Drehmomentverläufe am Abtrieb bei Kollisionen mit unterschiedlichen Antriebsdrehzahlen dargestellt. Nach dem ersten Aufprall auf die Anschläge federt der Hebel und damit das Getriebe zurück. Es folgen weitere Kollisionen, da der Antrieb weiter dreht und durch das Resttreibmoment der Kupplung die Drehrichtung des Getriebes wieder umkehrt. Die Maximaldrehmomente erreichen nicht mehr die Werte der ersten Kollisionen.

Bild 8 zeigt die Abhängigkeit des Maximaldrehmoments von der Antriebsdrehzahl sowie des Massenträgheitsmoments am Getriebeeingang. Die Maximaldrehmomente steigen erwartungsgemäß mit zunehmender Drehzahl und zunehmendem Massenträgheitsmoment an. Die weiteren Versuchsparameter weisen den gleichen eindeutigen Einfluss auf: Das gemessene Maximaldrehmoment nimmt mit dem Auslösedrehmoment der Kupplung und der Steifigkeit der Anschläge zu.

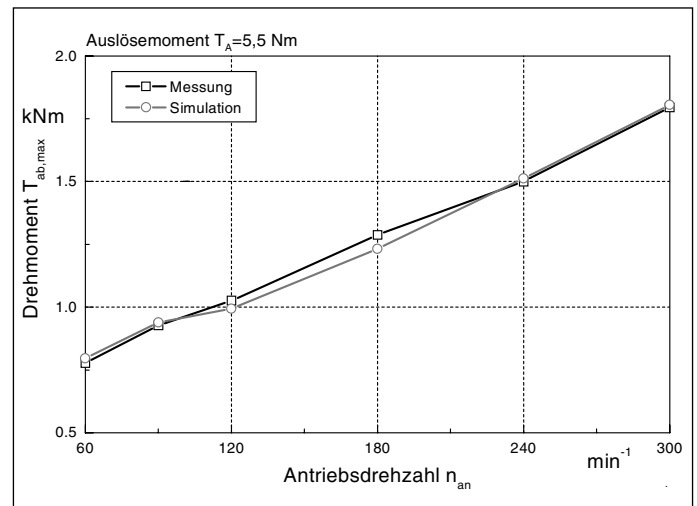
Simulationsrechnung

Das am IME entwickelte Simulationsprogramm DRESP stellt ein leistungsfähiges Programmpaket zur nichtlinearen Drehschwingungssimulation komplexer Antriebsstränge dar. Die unterschiedlichen Rechenmodule des Programms beschreiben das Verhalten der zur Auswahl stehenden Kopplungen zwischen zwei Massenträgheitsmomenten. Das Rechenmodul „Überlastkupplung“ bildet das Schaltverhalten von den verschiedenen Überlastkupplungen ab und bietet damit die Möglichkeit, bereits in der Konzeptionsphase die geeignete Überlastkupplung auszusuchen und den optimalen Einbauort zu ermitteln.

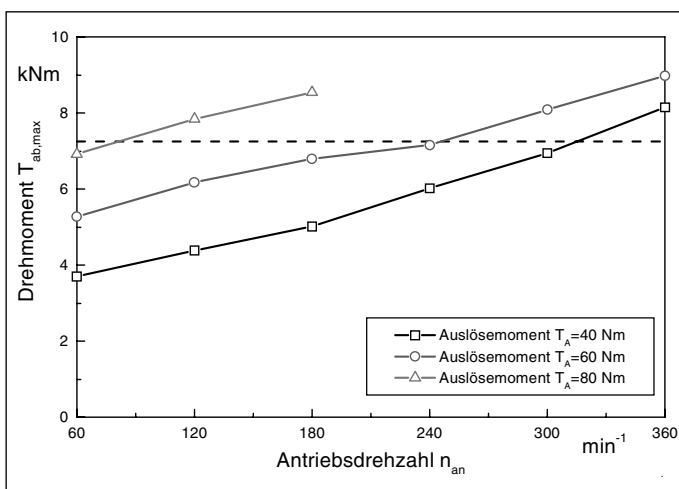
Der erste Schritt bei der Schwingungssimulation ist die Erstellung des Simulationsmodells. Aus Konstruktionsdaten, Herstellerangaben sowie vereinzelt Messungen sind die Werte für die Stei-



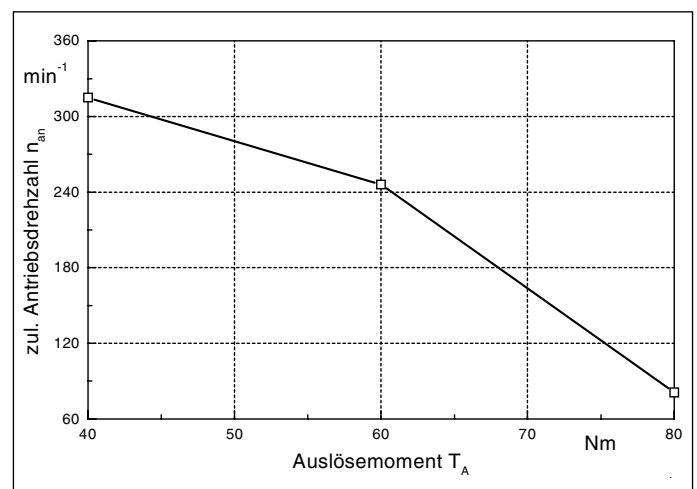
10: Berechnete Drehmomentverläufe



11: Gemessene und berechnete Drehmoment-Maximalwerte am Abtrieb über der Antriebsdrehzahl



12: Maximales Drehmoment am Abtrieb in Abhängigkeit des Auslösedrehmoments und der Antriebsdrehzahl



13: Zulässige Antriebsdrehzahl in Abhängigkeit des Auslösedrehmoments

figkeiten und die Massenträgheitsmomente bekannt. Die Parameter zur Beschreibung des Kupplungsverhaltens werden aus den in Bild 4 dargestellten Messungen ermittelt. Bild 9 zeigt das Simulationsmodell des Kollisionsprüfstands, es besteht aus insgesamt acht Massenträgheitsmomenten und sieben Kopplungen.

In Bild 10 sind die berechneten Drehmomentverläufe bei einer Kollision mit der Antriebsdrehzahl $n_{an} = 300 \text{ min}^{-1}$ und dem Auslösedrehmoment $T_A = 5,5 \text{ Nm}$ dargestellt. Die berechneten Kurven besitzen eine gute Übereinstimmung zu den gemessenen Verläufen (Bild 6).

In Bild 11 sind die gemessenen und die berechneten Maximalwerte für das Drehmoment am Abtrieb beim Auslösedrehmoment $T_A = 5,5 \text{ Nm}$ über der Antriebsdrehzahl dargestellt. Die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung sind gering, sie liegen für alle Werte unter 5 %.

Ermittlung der zulässigen Antriebsdrehzahl

Abschließend wurden Simulationsrechnungen für die existierende Anlage durchgeführt, mit dem Ziel, die zulässige Antriebsdrehzahl im Falle einer Kollision zu ermitteln. Der Antrieb enthält das in Bild 2 dargestellte Harmonic-Drive-Getriebe mit integrierter Überlastkupplung. Die Getriebeübersetzung ist $i = 80$, das zulässige Grenzdrehmoment bei Kollision beträgt: $T_{K,Grenz} = 7250 \text{ Nm}$. Gechnet wird mit drei verschiedenen Auslösedrehmomenten: $T_A = 40, 60 \text{ und } 80 \text{ Nm}$. Die Antriebsdrehzahl ist die variable Größe. Die horizontale, gestrichelte Linie in Bild 12 stellt das Grenzdrehmoment bei Kollision dar. Die Grenzdrehzahlen können aus den Schnittpunkten der Kurvenzüge mit dieser Linie abgelesen werden. Die daraus ermittelte Kurve für die zulässige Antriebsdrehzahl in Abhängigkeit des Auslösedrehmoments zeigt Bild 13.

Zusammenfassung

Programmierfehler können bei der Erstellung von Steuerungsprogrammen für Werkzeugmaschinen nicht zu 100 % vermieden werden. Unter anderem aus diesem Grund kommt es regelmäßig zu Kollisionen. Der Einbau einer mechanischen Überlastkupplung kann schädigende Beanspruchungen und die damit verbundenen Kosten vermindern.

Bei CNC-Werkzeugmaschinen werden an der Zustellbewegung des Werkzeugträgers hohe Anforderungen bezüglich Positioniergenauigkeit und Steifigkeit gestellt. Das Harmonic-Drive-Getriebe wird für die Lösung dieser Aufgabe häufig verwendet. Im Antrieb eines solchen Systems soll eine Überlastkupplung das wertvolle Getriebe bei einer Störung schützen. Die verwendete, selbsttätig einschaltende Überlastkupplung arbeitet nach dem synchrone schaltenden Schaltprinzip. Dies bedeutet, dass sie An- und Abtrieb bei Überlast voneinander trennt und anschließend nach einer relativen Verdrehung von 360° automatisch wieder betriebsbereit ist.

Im Rahmen einer am Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung der RWTH Aachen (IME) durchgeführten Untersuchung wurde die Eignung der im Getriebe integrierten Überlastkupplung experimentell überprüft. Die Untersuchung des Schaltverhaltens zeigte das für einen solchen Kupplungstyp charakteristische Verhalten. Aus Kollisionsversuchen mit einem vollständigen Antrieb ergab sich, dass die Kupplung das wertvolle Präzisionsgetriebe wirkungsvoll schützt.

Das am IME entwickelte Programm DRESP ermöglicht die Dreh-schwingungssimulation von Antrieben mit eingebauter Überlastkupplung. Mit dem Simulationsmodell des Kollisionsprüfstands wurde die gleiche Parametervariation durchgeführt wie bei den Experimenten. Die größte Abweichung zwischen Simulation und Messung betrug weniger als 5 %. Die dynamischen Vorgänge bei Kollisi-

sion des Abtriebs wurden mit großer Genauigkeit abgebildet. Daraufhin wurde mittels Simulationsrechnungen die zulässige Antriebsdrehzahl bestimmt, die im Falle einer Kollision des Abtriebs gerade keine Schädigung des Getriebes bewirkt.

Literaturhinweis:

[1] Gold, P. W.; Schelenz, R.; Koenen, H.: *Auslegung und Anwendung von Überlastkupplungen und die Auswirkungen des Schaltverhaltens auf den Antriebsstrang*. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., Forschungsheft Nr. 590, Frankfurt 1999

Anmerkung der Redaktion

Unsere Leser können sich ausführlicher über das Simulationsprogramm DRESP mittels der ersten Kennzahl informieren. Mit der zweiten Kennzahl fordert man ausführliche Informationen über die Harmonic-Drive-Getriebe von der Firma Harmonic Drive an.

IME	338
HARMONIC DRIVE	339