

Auf der Suche nach dem besten Antriebselement

Beide Varianten, Direktantriebe und Kugelgewindetriebe, sind innovative Antriebselemente. Welches der Antriebssysteme das überlegene ist, entscheidet sich wesentlich an den Stückkosten, die vom gewählten Antriebselement stark abhängen. Da aber schon unter den Kugelgewindetrieben erhebliche Unterschiede bestehen, muss ein Vergleich auch zwischen Standard- und Hochleistungs-Kugelgewindetrieben differenzieren, um Aussagekraft zu erhalten.

WILHELM BRUNNER

► Bei Linearachsen in Werkzeugmaschinen für die Zerspanungstechnik besteht seit circa zehn Jahren ein starker Innovationswettbewerb zwischen dem Antriebselement ›Kugelgewindetrieb‹ und dem Antriebselement ›Lineardirektantrieb‹.

Vor- und Nachteile der beiden Antriebssysteme sind an unterschiedlichen Einzelbeispielen mit unterschiedlichen Schwerpunkten beschrieben. Dies gilt für Veröffentlichungen von Maschinenherstellern genauso wie für Veröffentlichungen von Hochschulinstituten und Forschungseinrichtungen.

Die Stückkosten sind das A & O für Produktionsunternehmen

Ist nun eine Maschine mit Kugelgewindetrieben besser oder eine Maschine mit Lineardirektantrieben?

Im Folgenden sollen aus der Sicht eines Produktionsunternehmens die für die Produktion relevanten Punkte dargestellt werden. Das Allerwichtigste für die Produktionsunternehmen sind die erzielbaren Stückkosten (kurz-, mittel- und langfristige). Nur wenn die Stückkosten ein Minimum betragen und vom Markt ak-

zeptiert werden, kann ein Produktionsunternehmen am Markt überleben. Den Kunden – egal, in welcher Stufe der Wertschöpfungskette er steht – interessieren letztendlich immer nur die Stückkosten. Die Qualität des Teils und die Liefertermintreue sind ebenfalls von hohem Gewicht, aber sie werden meistens von den Kunden als unabänderliche Basis vorausgesetzt.

Auf welcher Maschine ein Produktionsunternehmen den Auftrag bearbeitet, ist in den meisten Fällen für den Kunden genauso unbedeutend wie die Frage, welches Antriebselement beispielsweise in der X-Achse dieser Produktionsmaschine integriert ist. Noch einmal: Letztendlich entscheidend

sind die Stückkosten. Daher muss bei jeder neuen Maschine das Produktionsunternehmen sehr genau das Produkt von Maschinenstundensatz und Bearbeitungszeit, also die Stückkosten, betrachten. Keine Maschine ist zu 100 Prozent mit einer anderen vergleichbar. Da die Schnelligkeit und Genauig-

■ Leistet einen wesentlichen Beitrag zur Senkung der Stückkosten: der Hochleistungs-Kugelgewindetrieb von A. Mannesmann

keit vom gewählten Antriebselement abhängen, werden folgende Antriebselemente miteinander verglichen:

- der Standard-Kugelgewindetrieb,
- der Hochleistungs-Kugelgewindetrieb von A. Mannesmann (Bilder 1 und 2) und
- der Lineardirektantrieb.

Seit einigen Jahren haben sowohl die Maschinenhersteller als auch Forschungseinrichtungen erkannt, dass Kugelgewindetrieb nicht gleich Kugelgewindetrieb ist und dass es erhebliche Unterschiede zwischen Standard-Kugelgewindetrieben und Hochleistungs-Kugelgewindetrieben gibt.

Ein Standard-Kugelgewindetrieb verliert mit der Zeit an Leistung

In Tabelle 1 sind zum Vergleich einige wesentliche Unterscheidungsmerkmale aufgeführt. Der Standard-Kugelgewindetrieb ist relativ preiswert und für viele Maschinenachsen ein kostengünstiges Antriebselement. Die noch preiswerteren gerollten beziehungsweise ins Harte gewirbelten Kugelgewindetriebe sollen hier nicht betrachtet werden, da sie in hochwertigeren Maschinen üblicherweise ►►

i HERSTELLER

A. Mannesmann Maschinenfabrik GmbH
 42859 Remscheid
 Tel. 0 21 91/9 89-0
 Fax 0 21 91/9 89-2 01
 www.amannesmann.de
 EMO Halle 13/A41



Bilder: A. Mannesmann

▶▶ entweder überhaupt nicht oder nur in untergeordneten Achsen zum Einsatz kommen.

Ein Standard-Kugelgewindtrieb ist standardmäßig auf preiswerte Herstellung getrimmt – ein Hochleistungs-Kugelgewindtrieb ist für hohe Ansprüche konstruiert und gefertigt. Die Tabelle zeigt unterschiedliche Parameter, zum Beispiel absolute Drehmomenthöhe, Drehmomentschwankungen des Kugelgewindtriebs, Härte der Spindel und so weiter.

In allen Punkten besteht ein erheblicher Unterschied zwischen dem Standard-Kugelgewindtrieb und einem Hochleistungs-Kugelgewindtrieb. Für die Maschinen- und Achsdaten ist dies für das Produktionsunternehmen zunächst in der Regel nur an der Eilganggeschwindigkeit und an der Maximalbeschleunigung erkennbar. Hier unterscheidet sich der Standard-Kugelgewindtrieb vom Hochleistungs-Kugelgewindtrieb.

Entscheidend ist jedoch die Tatsache, dass ein Hochleistungs-Kugelgewinde-

trieb so konstruiert und gefertigt ist, dass er die einmal eingestellten Daten über die vorausberechnete Lebensdauer hält. Ein Standard-Kugelgewindtrieb verliert bei hoher Beanspruchung nach vergleichsweise kurzer Zeit seine Leistungsmerkmale. Das äußert sich beim Standard-Kugelgewindtrieb in Form von verstärkter Geräuschbildung, Umkehrspiel, Vibrieren einer Achse oder beispielsweise auch durch den Umstand, dass eine Zurücknahme von Ruckbegrenzungswerten erforderlich wird. ▶▶

Technische Merkmale von Standard-Kugelgewindtrieben und Hochleistungs-Kugelgewindtrieben			
	Standard-Kugelgewindtrieb	A.Mannesmann-Hochleistungs-Kugelgewindtrieb	Bemerkung
Spindel	geschliffen	geschliffen	entscheidend ist die Genauigkeit beim Schleifen und wo überall geschliffen wurde
Mutter	geschliffen	geschliffen	je präziser die Profilgenauigkeit, desto besser die Laufruhe
Drehmoment (absolute Höhe)	250 Ncm	140 Ncm	sehr wichtig bei Quadranten-Übergängen
Drehmomentschwankung	150 Ncm	50 Ncm	bedeutend bei Oberflächengenauigkeit von Werkstücken über Verfahrwege
Härte der Spindel	56 ./. 60 HRC	67 HRC	dies sind extreme (!) Unterschiede in der Verschleißfestigkeit
Betriebstemperatur (gemessen auf standardisiertem Prüfstand)	circa 70 bis 80° C	50 bis 55° C	die Summe aller Fehler im System führt zur Wärmeentwicklung
Steifigkeit des Mutternsystems	hohe Schwankungen	präzise einstellbar gemäß geforderter Belastung	entscheidend ist die Langzeitkonstanz der Steifigkeit
Eilgang maximal	60 m/min	100 m/min	
Beschleunigung maximal	< 6 m/sec ²	20 m/sec ²	
Drehzahlkennwert n • d (= Spindeldrehzahl mal Spindeldurchmesser)	130 000	230 000	erreicht wird dies durch Präzision an allen relevanten Stellen des Kugelgewindtriebs

Tabelle 1: Unterschiede zwischen Standard-Kugelgewindtrieben und Hochleistungs-Kugelgewindtrieben in den Hauptkriterien für Antriebselemente (am Beispiel eines Kugelgewindtriebs Ø 50 mm)

Bearbeitungszeit in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Antriebssysteme			
	Standard-Kugelgewindtrieb	A.Mannesmann-Hochleistungs-Kugelgewindtrieb	Lineardirektantrieb
Eilganggeschwindigkeit	+++ (< 60 m/m)	+++++ (bis 150 m/min)	+++++ (> 150 m/min)
Beschleunigungsvermögen	++ (< 6 m/sec ²)	++++ (bis 20 m/sec ²)	+++++ (bis 50 m/sec ²)
Arbeitsgenauigkeit/ Produktionsgenauigkeit Lastfrei	+++++ (< 1 µm)	+++++ (< 1 µm)	+++++ (< 1 µm)
Arbeitsgenauigkeit bei vorhandenen, variablen Lasten	+++ (am Anfang ausreichend, später oft Probleme)	+++++ (extrem hohe Gleichmäßigkeit von Axialsteifigkeit und Drehmoment)	+++ (sehr hoher Regelungsaufwand)
Lebensdauer/Langlebigkeit (bei gleicher!) Qualität	+++ (man lebt gut im Service-Geschäft)	+++++ (zigtausendfach bewiesen)	++ (wehe, eine Abdeckung ist defekt)
Fazit:	Bearbeitungszeit um circa 10 bis 30 Prozent höher (werkstückabhängig)	Bearbeitungszeit nahezu identisch	

Tabelle 2: Erfüllungsgrad der relevanten Anforderungen an Achsen und die Auswirkungen auf die Bearbeitungszeit

Maschinenstundensatz bei Betrachtung verschiedener Antriebselemente				
	Standard-Kugelgewindtrieb	Hochleistungs-Kugelgewindtrieb	Lineardirektantrieb	Bemerkung
Investitionshöhe	300 T€	310 T€	375 T€	
Maschinenstundensatz (€/Std.)				
- Abschreibungen	17,04	17,60	21,30	Nutzungsdauer 10 Jahre im 2-Schicht-Betrieb
- Zinsen	2,84	2,94	3,55	5 % der Investitionssumme
- Instandhaltung	3,98	2,94	7,10	Instandhaltungsbedarf bei Lineardirektantrieb höher bei hoher Komplexität der Maschine und hohem Vorbeugeaufwand
- Wartungskosten	1,06	1,06	1,06	Mittelwerte über mehrere Maschinen
- Energie	3,34	3,34	6,67	Energieverbrauch (einschl. Aufwand für Kühlung)
- Werkzeuge	8,00	8,00	8,00	Mittelwerte über mehrere Maschinen
- Lohn	5,65	5,65	5,65	1 Mitarbeiter bedient 3 Maschinen
- Lohnnebenkosten	4,90	4,90	4,90	
- Restfertigungsgemeinkosten	12,50	12,50	12,50	Arbeitsvorbereitung, Fertigungssteuerung, Meister, NC-Programmierung
Summe €/Stunde	59,31	58,93	70,73	
	in etwa identisch		20 % Differenz	

Tabelle 3: Bei einer Investition von circa 300000 Euro liegt der Maschinenstundensatz beim Lineardirektantrieb vorsichtig gerechnet 20 Prozent über dem Maschinenstundensatz der Kugelgewindtrieb-Maschine

►► Aus diesen Gründen wurde bei den Maschinen und der jeweiligen Antriebsachse zwischen dem Standard-Kugelgewindtrieb, dem Hochleistungs-Kugelgewindtrieb und dem Lineardirektantrieb unterschieden, da sie in unterschiedlicher Ausprägung Einfluss auf die Stückkosten nehmen.

Ein singulärer Vergleich einzelner Antriebselemente ist richtig und zugleich falsch. Richtig, weil man die Eigenschaften der Antriebseinheit separat prüfen, messen und bewerten kann, und zugleich falsch, weil eben nur in der gesamtheitlichen Integration in der Maschine mit den Wechselwirkungen zu den anderen Ach-

sen sich die tatsächliche Güte eines Antriebselements erweist (Stichwort Stückkosten!).

Wie beeinflusst nun in qualitativer wie auch quantitativer Hinsicht der Typ des Antriebselements die Bearbeitungszeit? Die Bearbeitungszeit wird kurz-, mittel- und langfristig von folgenden Achsparametern bestimmt: der Eilganggeschwindigkeit, dem Beschleunigungsvermögen, der Arbeitsgenauigkeit (lastfrei), der Arbeitsgenauigkeit bei variablen äußeren Lasten, der Lebensdauer – und Langlebigkeit – der Komponente sowie der Wartungsfreundlichkeit der Antriebskomponente.

Bei der Langzeitpräzision führt der Hochleistungs-Kugelgewindtrieb

In Tabelle 2 sind diese Parameter für den Standard-Kugelgewindtrieb, den Hochleistungs-Kugelgewindtrieb und den Lineardirektantrieb bezüglich ihres qualitativen Erfüllungsgrads bewertet, und es sind als Beispiele jeweils typische Werte angegeben, sofern möglich. Im Hinblick auf die Bearbeitungszeit lässt sich folgender Schluss ziehen:

- Die Stückzeiten zwischen einer Hochleistungsmaschine mit Lineardirektantrieb und mit Hochleistungs-Kugelgewindtrieben sind identisch.
- Die Stückzeiten, die sich auf einer Maschine mit Standard-Kugelgewin- ►►



■ Hochleistungs-Kugelgewindtriebe sind den Standard-Kugelgewindtrieben überlegen in der Arbeitsgenauigkeit bei variablen Lasten sowie in der Lebensdauer und Langzeitpräzision

- ▶▶▶ detrieben erreichen lassen, liegen um 10 bis 30 Prozent über den Zeiten einer Maschine mit Hochleistungs-Kugelgewindetrieben beziehungsweise Lineardirektantrieben (werkstückabhängig).
- Die Arbeitsgenauigkeit der drei Maschinen unterscheidet sich – Glasmaßstab vorausgesetzt – nicht. Dies gilt insbesondere für die Anfangsphase der Maschine.

scheidet sich ebenfalls in erheblichem Maße. Eine Störung oder ein Crash ist in jeder Produktionsmaschine möglich und lässt sich nie ausschließen. Beim Kugelgewindtrieb läuft die Maschine in spätestens einer Schicht wieder. Beim Lineardirektantrieb kann es Wochen dauern.

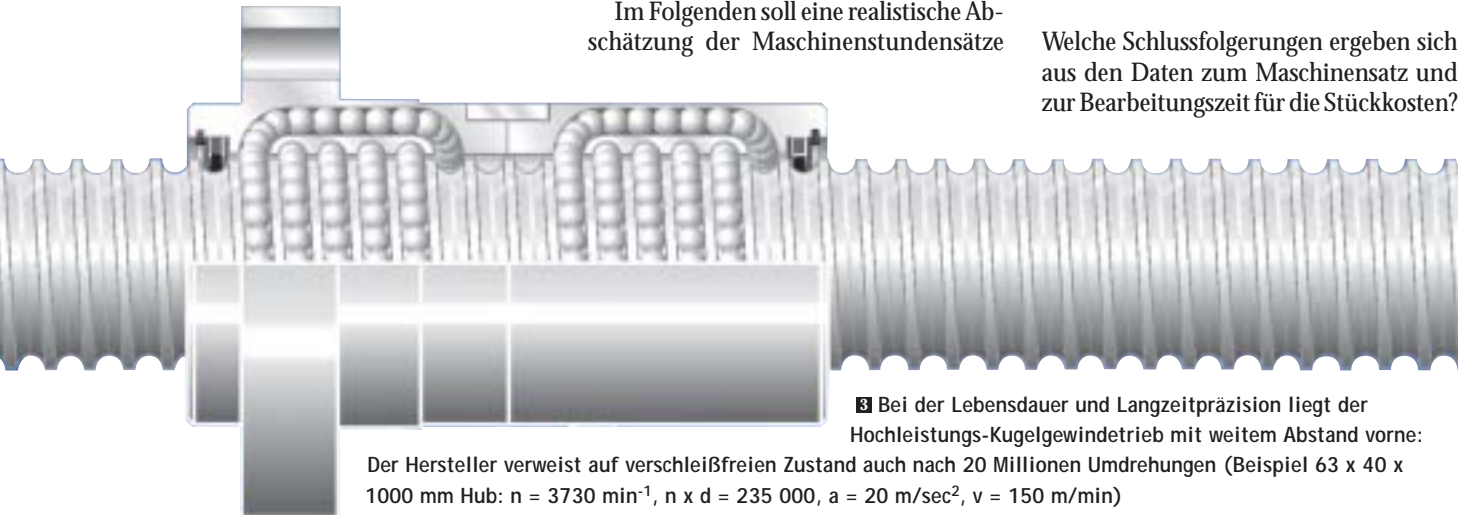
Obige Punkte beeinflussen sowohl die Bearbeitungszeit an dem einzelnen Werkstück als auch die Verfügbarkeit der Maschinen auf lange Sicht.

Im Folgenden soll eine realistische Abschätzung der Maschinenstundensätze

Schema berechnet. Als Ergebnis kommt heraus, dass die beiden Maschinen mit Standard-Kugelgewindtrieb und A. Mannesmann-Hochleistungs-Kugelgewindtrieb Maschinenstundensätze aufzuweisen haben, die nahezu identisch sind. Die Linearmotor-Maschine jedoch hat einen um circa 20 Prozent höheren Maschinenstundensatz.

Geringste Stückkosten mit Hochleistungs-Kugelgewindetrieben

Welche Schlussfolgerungen ergeben sich aus den Daten zum Maschinensatz und zur Bearbeitungszeit für die Stückkosten?



■ Bei der Lebensdauer und Langzeitpräzision liegt der Hochleistungs-Kugelgewindtrieb mit weitem Abstand vorne:

Der Hersteller verweist auf verschleißfreien Zustand auch nach 20 Millionen Umdrehungen (Beispiel 63 x 40 x 1000 mm Hub: $n = 3730 \text{ min}^{-1}$, $n \times d = 235\,000$, $a = 20 \text{ m/sec}^2$, $v = 150 \text{ m/min}$)

- Die Arbeitsgenauigkeit bei variablen Lasten ist beim Hochleistungs-Kugelgewindtrieb mit Abstand am höchsten. Sie ist am geringsten beim Standard-Kugelgewindtrieb, da er nach einer gewissen Zeit seine ursprünglich eingestellten Leistungsmerkmale verlieren kann.
- Bei der Lebensdauer und Langzeitpräzision liegt der Hochleistungs-Kugelgewindtrieb mit weitem Abstand vorne (Bild 3).
- Der Lineardirektantrieb hat zwar im eigentlichen Antriebsbereich keine verschleißenden Elemente, jedoch ist zu beachten, dass die etwa 10fach höheren Kräfte, die auf die Linearführungen wirken, diese Führungen schneller verschleiben lassen können. Darüber hinaus muss ein erheblicher Aufwand getrieben werden, um Abdeckungen und Dichtungen des gesamten Linearantriebs alljährlich zu erneuern. Geschieht dies nicht oder nur unzureichend, kann dies katastrophale Folgen nach sich ziehen.
- Die Lebensdauer eines Standard-Kugelgewindetriebs ist begrenzt. Sie hängt im Wesentlichen von der Leistung ab, die dem Standard-Kugelgewindtrieb abverlangt wird.
- Die Wartungsfreundlichkeit unter-

gegeben werden, damit sich eine Aussage über die Stückkosten treffen lässt.

Tabelle 3 nennt die Maschinenstundensätze in Abhängigkeit von dem jeweils gewählten Antriebselement für ein Bohr-/Fräsbearbeitungszentrum (circa 300 000 Euro Investition). Maschinen unter 250 000 Euro sollen nicht betrachtet werden, da bei diesen Maschinen ein Lineardirektantrieb nur in Ausnahmefällen überhaupt in Frage kommen dürfte.

Es gibt zwar am Markt Maschinen unter 250 000 Euro (in der Regel mit einem Linearmotor in einer Achse). Diese Maschinen haben jedoch vorrangig aus Marketing- und Imagegründen einen Linearmotor. (Dies ist eine Feststellung des Verfassers und keine Kritik an den Firmen, die diese Strategie verfolgen.)

Die preiswerteste Maschine erfordert einen Investitionsbetrag von 300 000 Euro; sie hat Standard-Kugelgewindtriebe und Eilgänge um 60 m/min sowie Beschleunigungswerte um $0,6 \text{ m/s}^2$.

Die Maschine mit Hochleistungs-Kugelgewindtrieb ist etwas teuer, erreicht aber in allen relevanten Parametern bezüglich Dynamik und Genauigkeit das Niveau der deutlich teureren Maschine mit Linearantrieben.

In Tabelle 3 sind die Maschinenstundensätze in Anlehnung an das VDMA-

Bei A. Mannesmann als Hersteller von Hochleistungs-Kugelgewindetrieben, der in seinem Maschinenpark alle drei verschiedenen Antriebssysteme hat, kommt man zu folgendem Ergebnis:

- Die Maschine mit Standard-Kugelgewindtrieb hat seine Berechtigung. Das Produktionsunternehmen muss jedoch bei höherwertigen Ansprüchen mit häufigerem Ersatz des Standard-Kugelgewindetriebs rechnen.
- Die Maschine mit Lineardirektantrieb ist eine technisch interessante Herausforderung, die durch kurze Bearbeitungszeiten besticht, allerdings auf Grund des deutlich höheren Maschinenstundensatzes zu hohen Stückkosten führt.
- In Produktionsunternehmen erreichen die Maschinen, die mit Hochleistungs-Kugelgewindetrieben bestückt sind, die geringsten Stückkosten. Der Hochleistungs-Kugelgewindtrieb erreicht mit minimalem Mehr-Invest gegenüber einer Maschine mit Standard-Kugelgewindtrieb ein Maximum an Leistungsausbeute. ◀

Dr.-Ing. Wilhelm Brunner ist Geschäftsführer bei der A. Mannesmann Maschinenfabrik GmbH in Remscheid; verkauf@amannesmann.de