

# Auslegung von Hochgeschwindigkeits- Kugelgewindetrieben

Juan José Zulaika, Jokin Lekunberri, José Gorrotxategi

# Auslegung von Hochgeschwindigkeits-Kugelgewindetrieben

Juan José Zulaika, Jokin Lekunberri, José Gorrotxategi

## 1. Einführung

Bei der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung stellt die Entwicklung von hochdynamischen Antriebsachsen, auf Basis von Gewindetrieben, einen wesentlichen Aspekt dar. Die Leistungsfähigkeit dieser Antriebe liegt weit über den üblichen Betriebswerten, mit Geschwindigkeiten um 120 m/min und Beschleunigungen größer 1 g gegenüber den üblichen Geschwindigkeiten von 30 m/min und Beschleunigungen unter 1 g.

Ein Hochleistungsantrieb soll die Produktivität der Maschine erhöhen, indem die Vorschubgeschwindigkeit sowie die Beschleunigung maximiert und die Vorschubkraft aufrechterhalten wird. Ein weiterer Aspekt ist die Antriebsgenauigkeit, die im wesentlichen durch die folgenden zwei Punkte bestimmt wird:

- Die dynamische und statische Steifigkeit der mechanischen Antriebs Elemente
- Die Temperaturbeständigkeit.

Das Führungssystem ist so auszuwählen, daß es den hohen Ansprüchen des Antriebs genügt und die hohen Trägheitskräfte bei gleichbleibender Wiederholgenauigkeit aufnehmen kann.

Im vorliegenden Aufsatz der Firma Fatronik System, S.A., Elgoibar (Gipuzkoa), werden verschiedene Lösungen ausgewertet, die auf eine Verbesserung der mechanischen Konstruktion von Hochgeschwindigkeitsantrieben abzielen. Einige dieser Lösungen haben sich in Versuchen an einem spezifisch entwickelten Prüfstand bewährt.

## 2. Prüfstand

Der Prüfstand (Bilder 1 und 2) ist aus der Notwendigkeit entstanden, die praktischen Ergebnisse zu bewerten und zu überprüfen. Somit konnten Hypothesen analysiert werden.

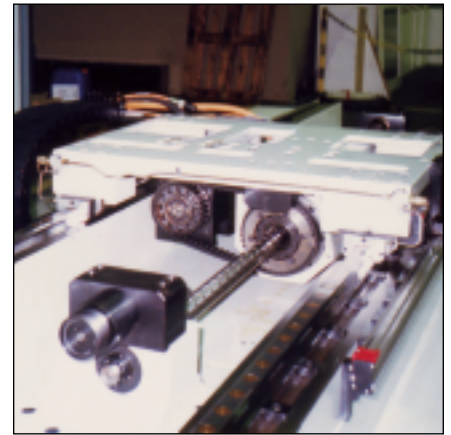
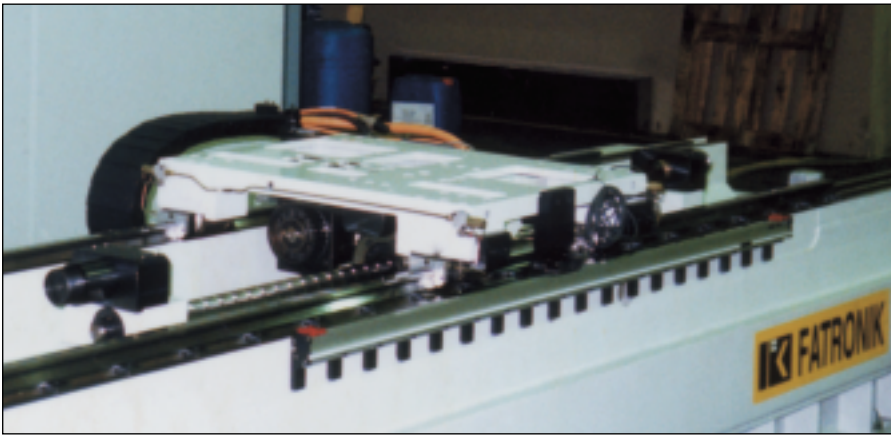
Der Prüfstand wurde äußerst flexibel ausgelegt, so daß seine Konstruktionsmerkmale den Einsatz verschiedener Antriebskonzepte mit Verfahrbereichen von bis zu 4 m ermöglichen, d. h. klassische Antriebe mit rotierender Spindel oder ortsfesten Gewindetrieben mit angetriebener Spindelmutter. Dies setzte ein großzügig dimensioniertes Gestell voraus.

Gemäß diesem Konzept wurde ein Hochleistungsantrieb ausgelegt, welcher folgender Spezifikation genügt:

- **max. Verfahrgeschwindigkeit: 120 m/min.**
- **Beschleunigung:  $\geq 14 \text{ m/s}^2$**
- **zu verfahrende Masse: 350 kg**
- **Abstand der Lagerstellen: 2.000 mm.**

Zur Umsetzung dieser Anforderungen waren folgende Vorauslegungsarbeiten erforderlich:

- Auswahl des Vorschubsystems: rotierende Spindel oder angetriebene Spindelmutter
- Auswahl der Parameter: Spindeldurchmesser und -steigung
- Auswahl des Führungssystems
- Auswahl der Motorkennlinien
- Auswahl der Scheibenübersetzung, falls Riemenscheiben erforderlich sind.



Bilder 1 und 2 Allgemeine Prüfstandansichten

Neben der beschriebenen Lösung mit einer rotierenden Spindelmutter mit hoher Spindeldrehzahl sind auch andere Lösungen auszuwerten. Hierzu wurde ein Berechnungsprogramm für die Auswahl der günstigsten Parameterkombination zur Vorauslegung entwickelt.

Aus den unterschiedlichen Lösungen, die die Prüfanforderungen erfüllten, wurden folgende Werte ausgewählt:

Antriebsart	rotierende Spindelmutter
Spindelsteigung	40 mm
Drehmoment	23 Nm
max. Drehmoment	82 Nm
max. zu verfahrende Masse	350 kg
Untersetzung	1,33

Für die ausgewählte Parameterkombination ergaben sich folgende Sollwerte, die nachträglich bestätigt wurden:

- Beschleunigung: 17,4 m/s<sup>2</sup>
- K<sub>y</sub>: 4

Nach Bestimmen der Antriebskennwerte war es notwendig, folgende Konstruktionsmerkmale festzulegen:

- Schmiersystem
- Spindelmutterlager
- Linearführungen
- Spindelendlagerung
- Numerische Steuerung, Regler, Motor und Längenmeßsystem.

## 2.1 Schmiersystem

Das Schmiersystem muß drei Schmierstellen mit Schmiermittel versorgen. Dies sind das Spindelmutterlager, das Linearführungssystem und die Spindelmutter selbst. Die zu verwendende Schmierungsart war durch die von der Lagerschmierung und insbesondere von der Spindelmutter zu erfüllenden Anforderungen mit bestimmt. Deshalb wurde eine Öl-Luft-Schmiereinrichtung für den gesamten Prüfstand ausgewählt.

Besonders schwierig ergab sich die Sicherstellung einer geeigneten Spindelmutterschmierung, da es sich um eine rotierende Spindelmutter handelt (Bild 3). Aus diesem Grund wurde ein System ausgelegt, in dem das Öl über eine Reihe von Bohrungen in die Spindelmutter gelangt. In eine Zwischenbüchse ist die Ölzuführung für die Spindelmutter integriert. Die Büchse wird über eine beidseitig abgedichtete Kammer mit Öl versorgt.

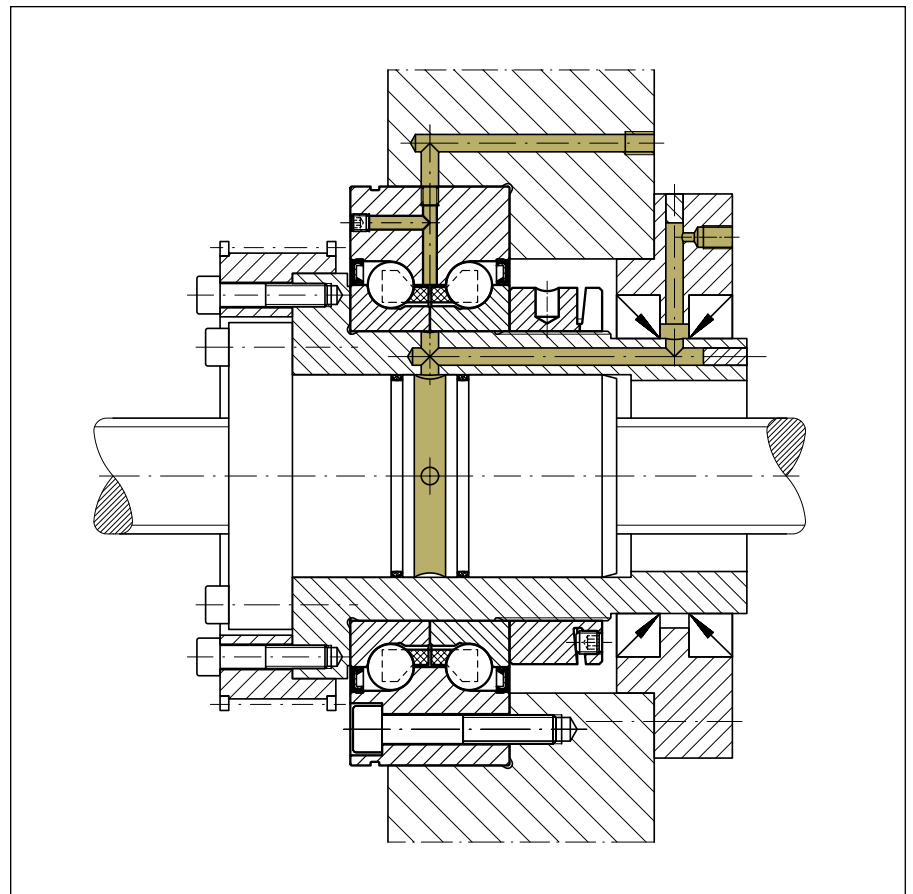


Bild 3 Schmierung für Spindelmutter und Lager

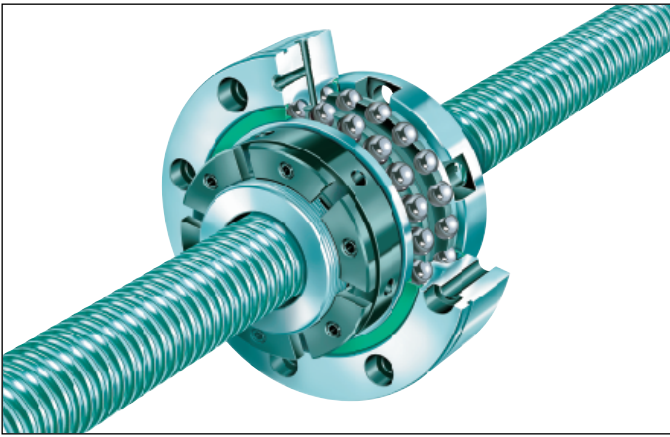


Bild 4 Zweireihiges Axial-Schrägkugellager ZKLF

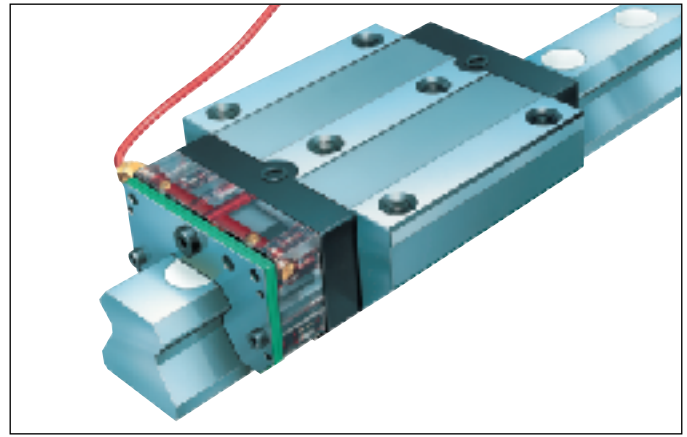


Bild 5 Rollenumlaufeinheit RUE..D mit SMDE

## 2.2 Spindelmutterlager

Bei dem verwendeten Spindelmutterlager handelt es sich um ein zweireihiges Axial-Schrägkugellager der Firma INA Wälzlager Schaeffler oHG, Typ ZKLF 100200.2Z, mit einem Druckwinkel von  $60^\circ$  (Bild 4).

Der zweiteilige Innenring dieses Lagers ist mit den beiden Kugelkränzen und dem Außenring so abgestimmt, daß beim Anziehen der Nutmutter mit dem vorgeschriebenen Anziehdrehmoment das Lager optimal vorgespannt wird, ohne daß weitere Einstellarbeiten notwendig sind.

Das INA-Wälzlager ZKLF 100200.2Z weist bei Fettschmierung eine Grenzdrehzahl von  $2150 \text{ min}^{-1}$  auf, die für den Geschwindigkeits-Sollwert von  $120 \text{ m/min}$  unzureichend war. Um diese Limitierung zu umgehen wurde von INA ein Axial-Schrägkugellager mit Keramikugeln als Sonderausführung entwickelt. In Verbindung mit der Öl-Luft-Schmierung konnte das Lager über einen längeren Zeitraum bei Drehzahlen von  $3000 \text{ min}^{-1}$  ohne nennenswerte Temperaturanstiege betrieben werden (Bild 6).

## 2.3 Linearführungen

Für das Verfahren des Tisches wurden vierreihige Rollenumlaufeinheiten der Baureihe RUE 45 D OE W2 der Firma INA Lineartechnik oHG, als Linearführungen ausgewählt (Bild 5). Das Führungssystem mit einer Länge von  $2.940 \text{ mm}$  war zusätzlich mit Minimal-schmiermengen-Dosiereinheiten SMDE ausgestattet. Diese standardmäßig vorgespannten Rollensysteme erfüllten die hohen Anforderungen hinsichtlich Steifigkeit und Genauigkeit.

## 2.4 Spindelendlagerung

Bei einem Antrieb dieser Art sind drei Spindelendlagerungen möglich:

- Feste Einspannung an dem einem und Loslager an dem anderem Spindelende
- Beidseitig feste Einspannung, mit hohlgebohrter Spindel, die zur Temperaturbeständigkeit von innen gekühlt wird
- Beidseitig feste Einspannung mit axial gereckter Spindel.

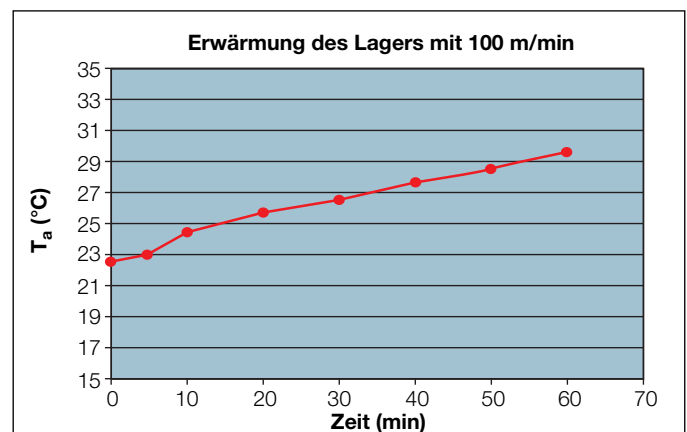


Bild 6 Erwärmung des Lagers. Prüfung bei  $100 \text{ m/min}$

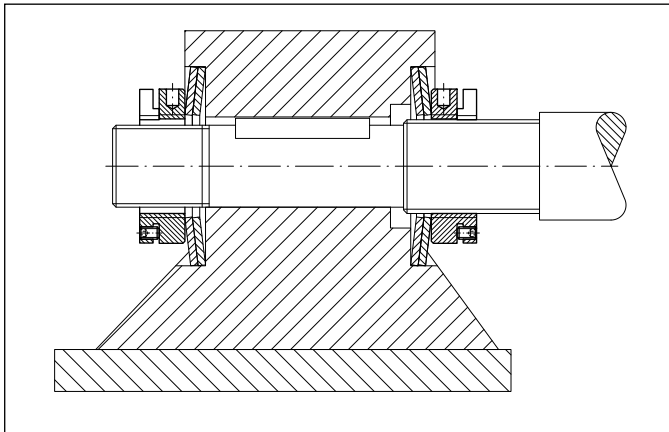


Bild 7 Spindelloslager mit INA-Präzisionsnutmutter, Baureihe AM

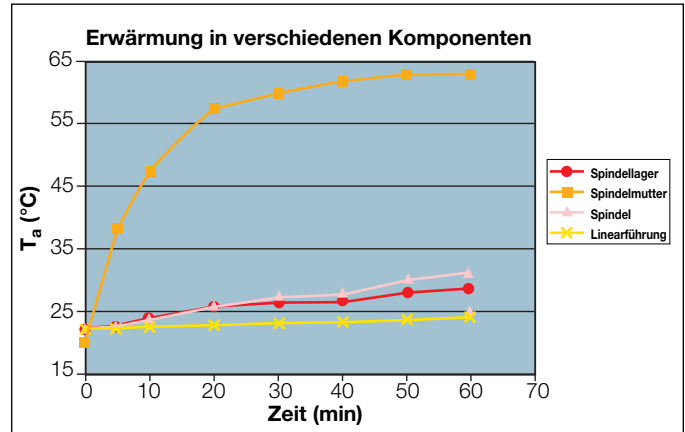


Bild 8 Prüfung bei 100 m/min

Die Umsetzung der dritten Lagerungsart ist aufgrund der hohen erforderlichen Reckung problematisch. Die zweite Lagerungsart ist praktikabel und hat sich bereits bei einigen Maschinen bewährt. Dennoch entschied man sich für die erste Lagerungsart, auch wenn es sich nicht um die optimale Lösung handelte. Ziel war es Erfahrungen zu sammeln, die für konventionelle Antriebslösungen verwertbar sind.

Die Spindel wurde also auf der einen Seite fest eingespannt und am anderen Ende wahlweise fest oder los gelagert. Dabei wurde eine einstellbare Klemm-

einrichtung verwendet, welche die aus der Erwärmung der Spindel entstehende Längendehnung aufnehmen kann.

Durch diese Anordnung wird die axiale Spindelsteifigkeit beeinflusst. Dabei ist die axiale Steifigkeit der Spindel von

$$K_{\min} = \pi \cdot E \cdot d^2/4 \cdot L$$

minimal, wenn sich die Spindelmutter am Loslager befindet.

Bei der ausgewählten Lösung wurde die Spindel axial in beiden Richtungen durch einen Federsatz axial eingespannt und damit der entstandene Steifigkeitsverlust kompensiert (Bild 7).

### 3. Versuche

Die Versuche waren Anfang 1999 noch nicht abgeschlossen. Die Priorität wurde auf die Versuche gelegt, die Aufschluß über das thermische Verhalten des Antriebs liefern.

Es wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Messung der Erwärmung von Prüfstandskomponenten
- Ermittlung der optimalen Schmiermittelmenge.

Zur Messung dieser Parameter wurden Widerstandstemperturfühler, IR-Temperturfühler, Näherungsschalter sowie ein A/D-Wandler eingesetzt.

#### 3.1 Untersuchung der Erwärmung von Prüfstandskomponenten

Zur Bewertung des thermischen Verhaltens des Prüfstandes wurden die Temperaturen folgender Komponenten gemessen:

- Spindelmutter
- Lager
- Spindel
- Linearführung.

In Bild 8 ist der Erwärmungsverlauf der einzelnen Komponenten über einen Zeitraum von 60 Minuten dargestellt. Die Vorschubgeschwindigkeit betrug dabei 100 m/min.

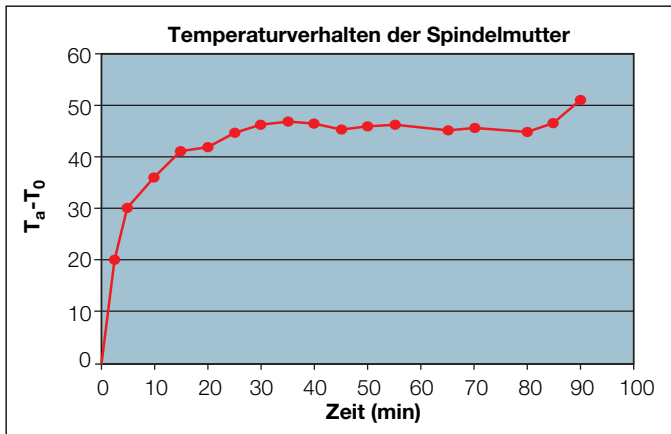


Bild 9 Erwärmung der Spindelmutter

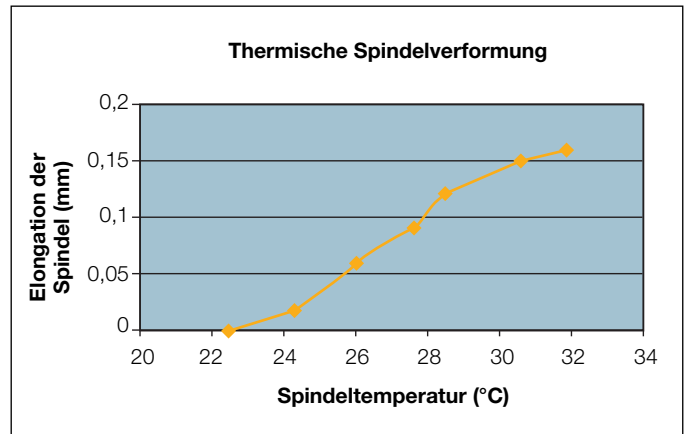


Bild 10 Längendehnung der Spindel

Erwartungsgemäß erwärmte sich die Spindelmutter am stärksten, während die Temperaturerhöhung der anderen Komponenten unkritisch war. Daher konzentrierten sich die weiteren Bemühungen auf die Verbesserung des thermischen Verhaltens der Spindelmutter.

Bild 9 zeigt den Verlauf der Spindelmuttertemperatur. Nach einer schnellen Erwärmung am Anfang bleibt die Temperatur annähernd gleich, wobei die konstante Temperatur durch eine bestimmte zugeführte Schmierölmenge beeinflusst wird.

Parallel dazu wurde die Längendehnung der Spindel ermittelt. Die Ergebnisse sind in Bild 10 dokumentiert.

### 3.2 Optimierung der Schmierung

Da der geprüfte Antrieb in erster Linie durch die schnelle Erwärmung der Spindelmutter bestimmt ist, war es erforderlich, die Schmierung der Spindelmutter zu optimieren.

Bei der gewählten Schmiereinrichtung handelte es sich um eine Öl-Luft-Anlage. Die Vorteile dieser Schmierungsart, die häufig zur Schmierung von Arbeitsspindel- oder Spindelstocklagerungen zur Anwendung kommt, sind z. B. hohe Geschwindigkeiten, niedrige Reibungsverluste sowie ein niedriger Ölverbrauch. Eine Schwierigkeit dieser Schmiermethode besteht darin, die optimale Ölmenge festzulegen. Gemäß den Empfehlungen des Schmiersystemlieferanten wurde ein Öl mit einer Viskosität ISO-VG 68 ausgewählt.

Um die optimale Ölmenge zu ermitteln, wurde eine separate Versuchsreihe durchgeführt, die zu folgenden Ergebnissen führte.

Bild 11 veranschaulicht die Zeit, nach der sich die Spindelmutter auf eine

Temperatur von 70 °C erwärmt hat, in Abhängigkeit von der zugeführten Ölmenge. Die Vorschubgeschwindigkeit betrug bei diesem Versuch 100 m/min.

Aus dem Diagramm geht hervor, daß sich die Spindel bei einer Ölmenge von ca. 2 mm<sup>3</sup>/min am langsamsten erwärmt. Die bei anderen Vorschubgeschwindigkeiten durchgeführten Versuche ergaben ein sehr ähnliches Ergebnis.

In Bild 12 ist dargestellt, wie sich die Temperatur der Spindelmutter bei unterschiedlichen Ölmenngen ändert. Die Temperatur der Spindelmutter wurde dabei bei allen Prüfungen nach Ablauf einer bestimmten Zeit erfaßt. Die Basis für die Meßergebnisse in Bild 12 war ein Zeitraum von 20 Minuten bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 100 m/min.

Die optimale Ölmenge stimmt mit dem in Bild 11 gezeigten Wert überein, d. h. ca. 2 mm<sup>3</sup>/min. Für größere Ölmenngen ergeben sich ebenfalls relative Minimalwerte, die jedoch über dem absoluten Optimum von 2 mm<sup>3</sup>/min liegen.

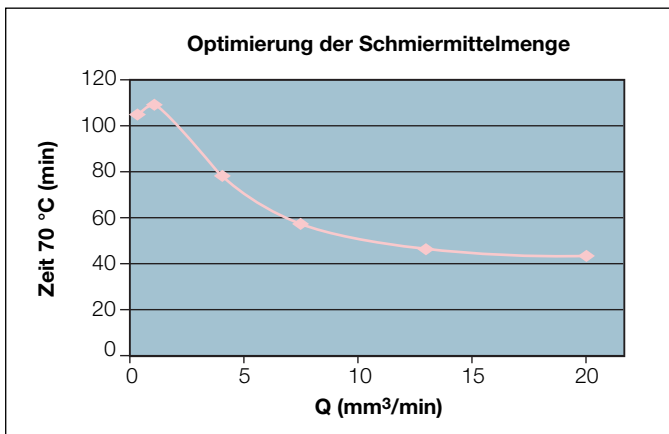


Bild 11 Zeit zum Erreichen einer Temperatur von 70 °C, bei unterschiedlichen zugeführten Ölmengen

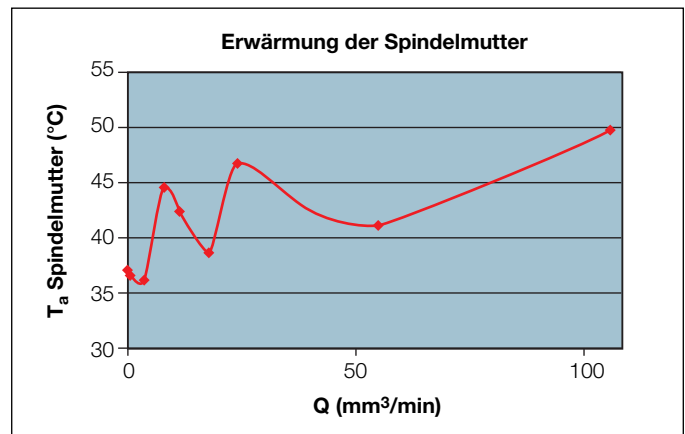


Bild 12 Erwärmung der Spindelmutter bei unterschiedlichen Ölmengen

#### 4. Zusammenfassung

Dieser Aufsatz stellt eine Reihe von Lösungsansätzen für Hochgeschwindigkeitstriebvorrichtungen vor. Im wesentlichen handelt es sich dabei um mechanisch-konstruktive Verbesserungen, die in Verbindung mit der Erhöhung von dynamischer und statischer Steifigkeit der Maschinenelemente stehen.

Dieser neue Lösungsansatz zur Lagerung von Gewindetrieben eröffnet einen vielversprechenden Anwendungsbereich. Dieser umfaßt den gesamten Werkzeugmaschinenbereich und schließt die Möglichkeit ein, schon bestehende elektomechanische Antriebe auf dieses Konzept umzurüsten.

#### Literaturverzeichnis

- [1] Weck M.: „Werkzeugmaschinen“, VDI Vlg., Bde. 2 und 3
- [2] Schulz H.: „Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. High Speed Machining“, Carl Hanser Verlag
- [3] Schulz H.: „High Speed Milling of Metal and Nonmetal Materials“, Carl Hanser Verlag
- [4] Ogata K.: „Modern Control Engineering“, Prentice Hall, 1993
- [5] Lorosh H.: „Reliable Lubrication of Machine Tool Bearings“, FAG WL 02 113 E
- [6] Koren Y., Lo C.C.: „Advanced Controllers for Feed Drives“, Annals of the CIRP, Vol. 41/2/1992
- [7] Uriarte L.G.: „Ensayo de accionamientos“ Jornadas sobre Control y Accionamientos. Fundación Tekniker, Nov. 1996
- [8] T. Frank und E. Lunz: „Hochgeschwindigkeits-Kugelmutter-Antriebsachse“, Aufsatz der „Antriebstechnik“, Ausgabe 1, Januar 1998, verfaßt von INA

#### Autorenhinweis:

Maschineningenieur Juan José Zulaika und die Maschinenbauingenieure Jokin Lekunberri und José Gorrotxategi sind Mitarbeiter der Firma Fatronik System, S.A., Elgoibar (Gipuzkoa) in Spanien.

Kontaktperson: Maschineningenieur José Miguel Azkoitia

Das Projekt wurde von Dipl.-Ing. (FH) Martin Schreiber, Referent in der Anwendungstechnik im Branchenmanagement Produktionsmaschinen und Systeme bei der Firma INA Wälzlager Schaeffler oHG, Herzogenaurach, begleitet.



**INA Wälzlager Schaeffler oHG**

D-91072 Herzogenaurach  
Telefon (0 91 32) 82-0  
Telefax (0 91 32) 82-49 50  
<http://www.ina.com>