Einsatz von Linearmotoren – ein Weg zur Wirtschaftlichkeitssteigerung in der Hochgeschwindigkeitszerspanung?

Mit der Hochgeschwindigkeitszerspanung steht aufgrund ihres Potentials zur Steigerung des Zeitspanungsvolumens bzw. der Fertigungsgenauigkeit eine Technologie zur Verfügung, die eine deutliche Wirtschaftlichkeitssteigerung in der zerspanenden Fertigung erwarten läßt. Voraussetzung hierfür ist jedoch der Einsatz hochdynamischer Vorschubantriebe, weswegen zu klären ist, inwiefern sich Linearmotoren hierzu eignen. Diese Thematik wird im Rahmen mehrerer Projekte an dem industrienahen Institut Zentrum Fertigungstechnik Stuttgart in enger Kooperation mit der Universität Stuttgart bearbeitet. – Von Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. U. Heisel, Dr.-Ing. H. Rudloff und Dipl.-Ing. A. Feinauer [1]).

Prozeßbedingte Forderungen an die Vorschubgeschwindigkeit und Fertigungsgenauigkeit

Zur Bestimmung der Eignung eines Antriebskonzeptes für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung ist es notwendig, die aus dem Fräsprozeß resultierenden Forderungen an die Vorschubantriebe abzuleiten und zu quantifizieren. Das Pflichtenheft eines Vorschubantriebes läßt sich hierfür in zwei Hauptanforderungen untergliedern:

- hohe Vorschubgeschwindigkeiten zur Umsetzung der hohen Spindeldrehzahlen bei gleichzeitig günstigem Vorschub je Zahn und hoher Bahngenauigkeit sowie
- ausreichende Vorschubkräfte zur Realisierung der Prozeßkräfte, die sich aus Schnitt- und Beschleunigungskräften zusammensetzen.

Vorschubgeschwindigkeiten

Bei den für das Hochgeschwindigkeitsfräsen (HGF) eingesetzten Hauptspindeln handelt es sich meist um wälzgelagerte Hochfrequenzspindeln mit einer Lagerkennzahl $n \cdot d_m = 1{,}5$ bis $2{,}5 \cdot 10^6$. Damit lassen sich Spindeldrehzahlen bis über 200 000 min^{-1} erzielen. Mit vom Werkzeugdurchmesser und von der Werkstoff-Schneidstoff-Kombination abhängigen Vorschüben je Zahn im Bereich von 0,03 bis 0,25 mm sind damit für zweischneidige Werkzeuge Vorschubgeschwindigkeiten von 6 bis 15 m/min gefordert. Eine Erhöhung der Schneidenanzahl führt zu entsprechend höheren Geschwindigkeiten.

Zur Realisierung dieser Vorschubgeschwindigkeiten, die sich als Vorschub an der Werkzeugschneide darstellen, sind weitaus höhere Achsgeschwindigkeiten gefordert, sofern eine konkave Kontur zu bearbeiten ist. In Abb. 1 sind exemplarisch für eine Vorschubgeschwindigkeit an der Schneide $v_s = 15$ m/min, die sich beim Außen-Zirkularfräsen ergebenden tatsächlichen Bahngeschwindigkeiten, bezogen auf den Fräsermittelpunkt, für unterschiedliche Werkzeugdurchmesser und Konturradien dargestellt.

Vorschubkräfte

Die sich für diese Vorschub- und die damit verbundenen Schnittgeschwindigkeiten ergebenden Schnittkräfte sind bis jetzt noch nicht hinreichend erforscht [1]. Eine Bestimmung der maximalen Schnittkräfte kann jedoch mit Hilfe der Leistungs- und Drehmomentcharakteristik der Hochfrequenz-Spindeln erfolgen. Abb. 2 zeigt hierzu die Schnittkräfte, wie sie sich entsprechend den Empfehlungen der Werkzeughersteller bezüglich der Prozeßparameter für unterschiedliche Werkstoffgruppen bei konventioneller Bearbeitung ergeben. Zusätzlich sind die erforderlichen Drehmomente in Abhängigkeit vom Werkzeugdurchmesser dargestellt. Während Hochfrequenzspindeln bei Spindeldrehzahlen n = 20 000 min^{-1} derzeit über Drehmomente ≤ 30 Nm verfügen, ergeben sich für Spindeldrehzahlen n > 40 000 meist Drehmomente von einigen wenigen Nm [2]. Spindelseitig können damit nur Schnittkräfte von 1 bis 2 kN aufgebracht werden.

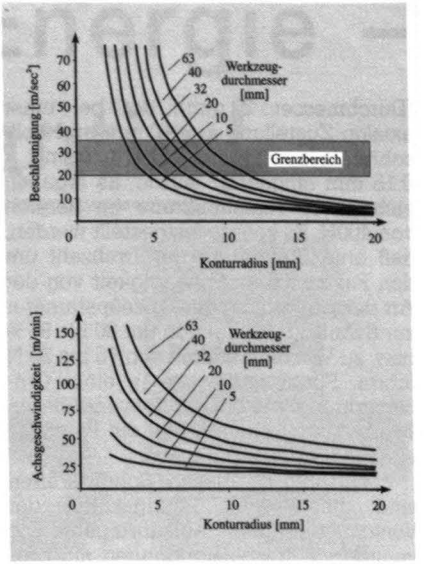
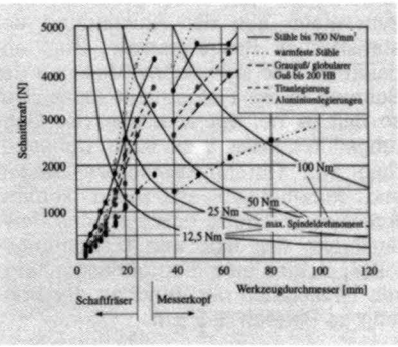


Abb. 1: Achsgeschwindigkeiten und -beschleunigungen beim Hochgeschwindigkeitsfräsen

Zur Bestimmung der Vorschubkräfte beim HGF von Aluminiumlegierungen wurden am ZFS Untersuchungen durchgeführt, bei denen für gleiches Zeitspanungsvolumen die Vorschubkräfte bei konventioneller Bearbeitung und beim HGF einander gegenüber gestellt wurden. Es wurde hier bewußt auf eine Produktivitätssteigerung verzichtet, um zu zeigen, inwieweit eine Steigerung der Schnittgeschwindigkeit zur Reduktion der Vorschubkräfte beiträgt. Zur Realisierung des identischen Zeitspanungsvolumens erfolgte eine Anpassung der Vorschubgeschwindigkeit bzw. der radialen und axialen Zustellung.

Ausgangslage war die konventionelle Zerspanung von AlCuMgPb mit einem zweischneidigen Vollhartmetallfräser

Abb. 2: Zerspanungskräfte beim Fräsen (Vollschnitt a_p = 1/2* D bzw. 2/3* Plattenhöhe)



[1]) Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. U. Heisel ist Mitglied des Direktoriums des Zentrum Fertigungstechnik Stuttgart. Dr.-Ing. H. Rudloff ist Geschäftsführer des Zentrum Fertigungstechnik Stuttgart (Vorstandssprecher Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. G. Pritschow) und Dipl.-Ing. A. Feinauer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Zentrum Fertigungstechnik Stuttgart im Arbeitsbereich Werkzeugmaschinen.

(Durchmesser 20 mm), der bei einer axialen Zustellung $a_p = 10$ mm und Vollschnitt mit einem Vorschub je Zahn $f_z = 0{,}15$ mm eingesetzt wurde. Es ergaben sich dabei Vorschubkräfte im Bereich von 400N. Es konnte festgestellt werden, daß eine Steigerung der Drehzahl um den Faktor 7,5 in Abhängigkeit von der Art der Anpassung der Prozeßparameter zur Schnittkraftreduktion um 80 bis 95 % bzw. zu Vorschubkräften von 75 bis 20 N führte. Für Schnittkräfte in einer Größenordnung wie bei der konventionellen Bearbeitung ist damit hier ein Produktivitätspotential > 5 gegeben.

Zusätzlich zu diesen Schnittkräften sind die Beschleunigungskräfte der Vorschubeinheiten aufzubringen. Die geforderten Beschleunigungen sind für eine Vorschubgeschwindigkeit $v_s = 15$ m/min ebenfalls in Abb. 1 dargestellt. Es wird deutlich, daß mit kleinerem Konturradius die Beschleunigungsforderungen progressiv zunehmen. Unter Berücksichtigung der mit hohen Beschleunigungen verbundenen Problematik bezüglich des schwingungstechnischen Aufbaus der Maschinenkomponenten und bei Beachtung der Hauptzeitanteile der Zerspanung kleinster Konturradien mit hoher Vorschubgeschwindigkeit sind aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten 2 bis 3 g als Obergrenze bezüglich des Achsbeschleunigungsvermögens zu nennen. Dabei kann davon ausgegangen werden, daß das maximale Beschleunigungsvermögen nicht ständig gefordert wird, so daß etwa 60 % der Spitzenbeschleunigungskraft als Dauerkraft angenommen werden können. Die sich damit ergebenden Beschleunigungskräfte sind von der Art und Größe der zu betrachtenden HGF-Maschine, also von dem Verhältnis Achsgewicht und maximaler Beschleunigung abhängig.

Genauigkeitsanforderungen

Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Eignung von Vorschubantrieben bei hohen Bahngeschwindigkeiten stellt die Maßhaltigkeit der Werkstücke dar. Hier werden z. B. im Werkzeuge- und Formenbau der Automobilindustrie Werkstückgenauigkeiten von ± 0,02 mm gefordert [3]. Im Getriebe- und Motorenbau stellt das Zirkularfräsen von Lagersitzen eines der Anwendungsgebiete beim HGF mit hohen Genauigkeitsanforderungen dar. Diese ergeben sich zum einen aus der Anwendung der statistischen Prozeßkontrolle. Zum anderen ist eine lagegleiche Messung der Bohrung in der Praxis nicht umsetzbar, so daß es bei der Messung des Bohrungsdurchmessers zu einer Überlagerung von Durchmesserschwankungen und Rundheitsabweichungen kommt. Aus diesem Grund erfordert eine Toleranzbreite von 0,02 mm (Zeichnungstoleranz) hier eine Fertigungsgenauigkeit hinsichtlich der Rundheit der Bohrung im Bereich ≤ 5 µm.

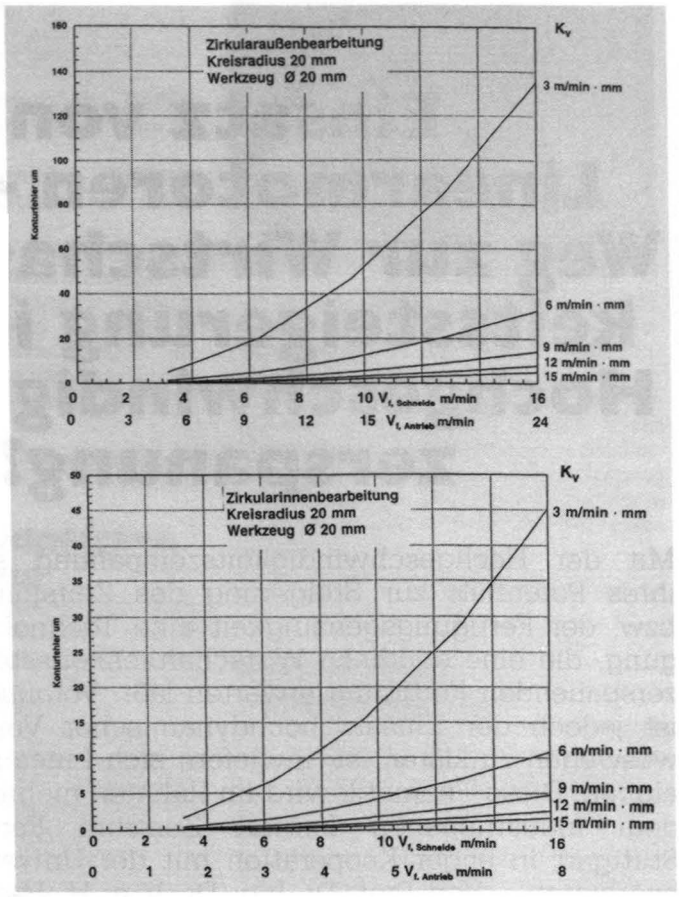


Abb. 3: Einfluß der Geschwindigkeitsverstärkung auf die Fertigungsgenauigkeit beim Zirkularfräsen

Dynamische Konturabweichungen und Gegenmaßnahmen

Gemäß Abschnitt 1 erfordert die vollständige Nutzung der Hochgeschwindigkeitsfrästechnologie nicht nur Spindeln mit einer ausreichenden Drehzahl-/Drehmomentcharakteristik; vielmehr muß die Leistungsfähigkeit der gesamten Maschine den gestiegenen Forderungen hinsichtlich Geschwindigkeit und Genauigkeit entsprechen. Folgende dynamische Konturabweichungen sind in hohem Maße von der Vorschubgeschwindigkeit abhängig und daher bei der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung besonders zu berücksichtigen:

- Führungsgrößenverzerrungen aufgrund des dynamischen Maschinenverhaltens und
- Reibungsumkehrspanne der Vorschubantriebe.

Führungsgrößenverzerrung aufgrund des dynamischen Maschinenverhaltens

Hierunter werden Bearbeitungsfehler verstanden, die entstehen, wenn die von der numerischen Steuerung vorgegebenen Positionssollwerte von der Maschine aufgrund deren begrenzten dynamischen Eigenschaften verfälscht auf das Werkstück übertragen werden. Bei Kreisbahnen äußert sich diese Führungsgrößenverzerrung beispielsweise in Radiusfehlern. Die Größe dieser Konturfehler hängt im wesentlichen von der Geschwindigkeitsverstärkung der Vorschubantriebe sowie von den Dämpfungen und Resonanzfrequenzen der Resonanzstellen der mechanischen Maschinenkomponenten ab. Zur Reduzierung solcher Bearbeitungsfehler werden steuerungsseits derzeit folgende Maßnahmen durchgeführt:

- schleppfehlerfreier Betrieb von Vorschubachsen durch Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvorsteuerung
- ruckbegrenzte Führungsgrößenerzeugung und
- Steigerung der Geschwindigkeitsverstärkung der Vorschubantriebsregelung.

Zum schleppfehlerfreien Betrieb von Vorschubachsen durch Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvorsteuerung ist anzumerken, daß dadurch zwar deutliche Verbesserungen der Konturgenauigkeit erzielt werden können; jedoch ist bei dieser Art der steuerungstechnischen Kompensation eine vollständige Vermeidung des Positionsfehlers der Antriebe nur bei konstanter Achsbeschleunigung bzw. -geschwindigkeit möglich. Bei Beschleunigungsänderungen, die beispielsweise bei Kreisbahnen permanent auftreten, kann der Konturfehler daher zwar reduziert, aber nicht vermieden werden. Dies äußert sich vor allem bei größeren Vorschubgeschwindigkeiten in Radiusfehlern, die trotz Vorsteuerung auftreten. Grundsätzlich gilt auch bei Verwendung solcher Vorsteuerungen: je größer die Geschwindigkeitsverstärkung der Vorschubantriebe um so kleiner ist der Konturfehler.

Die ruckbegrenzte Führungsgrößenerzeugung ist ein Steuerungskonzept, bei dem sprungförmige Änderungen der von der Steuerung vorgegebenen Achsbeschleunigungen und die damit verbundene Anregung mechanischer Reso-

nanzstellen vermieden werden können. Sie stellt somit ein wertvolles Hilfsmittel zur Genauigkeitssteigerung dar. Dadurch kann insbesondere bei den aus dynamischer Sicht kritischen Anfahrvorgängen oder unstetigen Richtungsänderungen der Vorschubbewegungen eine deutliche Reduzierung von Konturfehlern bewirkt werden. Bei anderen Bewegungsformen der Vorschubachsen ist jedoch keine Steigerung der Bearbeitungsgenauigkeit möglich. So hat die Ruckbegrenzung beispielsweise auf den Radiusfehler bei Kreisbahnen mit konstanter Bahngeschwindigkeiten keinen Einfluß.

Durch steuerungstechnische Maßnahmen ist somit die Möglichkeit gegeben, Bahnfehler deutlich zu reduzieren, und bei konventionellen Vorschubgeschwindigkeiten oftmals befriedigende Fertigungsgenauigkeiten zu realisieren. Bei größer werdenden Vorschubgeschwindigkeiten steigen jedoch trotz der heutzutage eingesetzten Steuerungskonzepte die verbleibenden Bahnfehler überproportional an und können zu unzureichenden Bearbeitungsergebnissen führen. Diese Bahnfehler sind in hohem Maße von der erreichbaren Geschwindigkeitsverstärkung der Lageregelkreise abhängig. Hierauf soll im folgenden näher eingegangen werden.

Für Kreisbewegungen, wie sie bei der Zirkularfräsbewegung auftreten, können sehr einfach Obergrenzen für die erreichbare Genauigkeit in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsverstärkung angegeben werden. Abb. 3a zeigt diese Zusammenhänge für die Zirkularfräsbearbeitung von Außenkonturen. Bei dieser simulativen Untersuchung wurde der Einsatz einer Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvorsteuerung zugrunde gelegt. Des weiteren wurden in der Praxis übliche Werte für die Schwankung der Kenngrößen von Lageregelkreisen berücksichtigt. Dem Diagramm sind folgende wesentliche Aussagen zu entnehmen:

- bei größeren Vorschubgeschwindigkeiten steigt der Konturfehler überproportional an und
- die Geschwindigkeitsverstärkung besitzt erwartungsgemäß einen signifikanten Einfluß auf die erreichbare Genauigkeit.

Es ist auch zu erkennen, daß bei den mit derzeitigen Bearbeitungszentren realisierbaren Geschwindigkeitsverstärkungen (meist im Bereich $K_v \leq 5$ m/min · mm [3]) die Forderungen entsprechend Abschnitt 1 hinsichtlich der Vorschubgeschwindigkeit nur unter großen Genauigkeitseinbußen erreichbar sind. Insgesamt läßt sich aus den obigen Betrachtungen für die Hochgeschwindigkeitszerspanung daher die Forderung nach größeren Geschwindigkeitsverstärkungen, als sie bei heutigen Bearbeitungszentren üblich sind, ableiten.

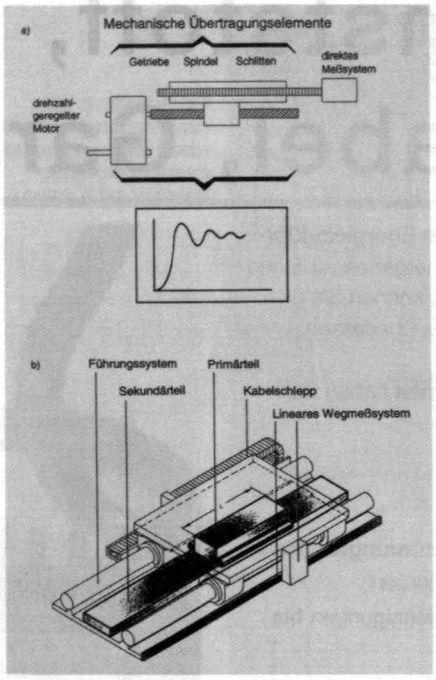


Abb. 4: Prinzipieller Aufbau von Vorschubantrieben.
a) mit Kugelgewindetrieb,
b) Asynchron-Linearmotor
(Quelle: Krauss-Maffai).

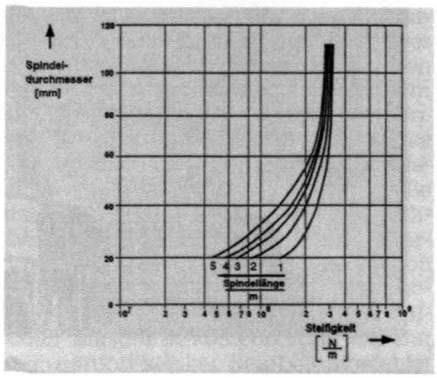
Reibungsumkehrspanne der Vorschubantriebe

Die Reibungsumkehrspanne der Vorschubantriebe äußert sich beispielsweise in Konturabweichungen bei Quadrantenübergängen von Kreisbewegungen und ist von der Vorschubgeschwindigkeit abhängig. Der Betrag der Reibungsumkehrspanne hängt bei Bearbeitungszentren im wesentlichen von folgenden Eigenschaften der Vorschubantriebe ab:

- Geschwindigkeitsverstärkung,
- Steifigkeit der mechanischen Übertragungselemente (z. B. Kugelgewindetrieb),
- Reibverhalten von Führungen bzw. Gewichtsausgleich und
- Regelkreisdynamik der Geschwindigkeitsregelung für die Vorschubantriebe.

Der Erhöhung der Steifigkeit mechanischer Übertragungselemente und der Verringerung der Reibkräfte von Führungen sowie der Bandbreite von Geschwindigkeitsregelkreisen sind Grenzen gesetzt. Es ergibt sich daher die Forderung nach einer möglichst großen Geschwindigkeitsverstärkung bzw. einer steuerungstechnischen Kompensation der Reibung. Eigene exemplarische Untersuchungen zur Reibungskompensation haben eine Verbesserung um bis zu 50 % gezeigt.

Abb. 5: Steifigkeit von Kugelgewindetrieben



Für eine weitergehende Kompensation der Reibungsumkehrspanne wäre eine genaue Kenntnis des Reibkraftverlaufs notwendig, die in der Regel nicht vorliegt. Wegen dem oben erwähnten Anstieg der Reibungsumkehrspanne bei größer werdenden Vorschubgeschwindigkeiten ergibt sich daher vor allem für die Hochgeschwindigkeitszerspanung auch hier die Forderung nach einer größtmöglichen Geschwindigkeitsverstärkung. Dadurch kann die trotz eingesetzter Kompensationsalgorithmen verbleibende Reibungsumkehrspanne reduziert werden.

Grundsätzliche Eigenschaften von Linearmotoren und von Antrieben mit mechanischen Übertragungselementen

Entsprechend Abschnitt 2 erfordert die optimale Nutzung des Potentials zur Wirtschaftlichkeitssteigerung durch den Einsatz der Hochgeschwindigkeitszerspanung größtmögliche Geschwindigkeitsverstärkungen der Antriebe. Aus diesem Grund sollen daher zunächst die Grenzen der erreichbaren Geschwindigkeitsverstärkung von Antrieben mit mechanischen Übertragungselementen (konventionelle Antriebe) denen von Linearmotoren (Direktantriebe) gegenübergestellt werden. Bei dem zuerst genannten Antriebstyp wird als mechanisches Übertragungselement der bei Bearbeitungszentren oft eingesetzte Kugelgewindetrieb betrachtet. Abb. 4 zeigt den prinzipiellen Aufbau der beiden Antriebskonzepte. Als grundsätzlich begrenzend für die erreichbare Geschwindigkeitsverstärkung konventioneller Antriebe ist die Nachgiebigkeit des Kugelgewindetriebs zu betrachten. Einer naheliegenden Vergrößerung der Steifigkeit des Kugelgewindetriebs durch die Wahl eines größeren Spindeldurchmessers zur Steigerung der ereichbaren Geschwindigkeitsverstärkung sind jedoch gemäß [4] die in Abb. 5 dargestellten Grenzen gesetzt.

So kann beispielsweise bereits theoretisch für Kugelgewindetriebe unter Berücksichtigung der in [5] beschriebenen Beziehungen für die Geschwindigkeitsverstärkung gezeigt werden, daß bei einer von den Vorschubantrieben zu bewegenden Tischmasse von 500 kg und einem Verfahrweg von 1 m für die maximale Geschwindigkeitsverstärkung $K_v \leq 5$ m/min · mm gilt.

Demgegenüber wird die mit Linearmotoren erzielbare Geschwindigkeitsverstärkung lediglich durch

- die Leistungsfähigkeit des Regelrechners,
- die Meßsystemauflösung sowie

– durch Resonanzstellen der Anbringung von Antriebselementen und
– durch außerhalb der Lagerregelkreise befindliche Resonanzstellen begrenzt.

Üblicherweise können mit diesen Antrieben Geschwindigkeitsverstärkungen im Lageregelkreis $K_v \leq 12$ m/min · mm eingestellt werden. Zu dem Beschleunigungsvermögen ist anzumerken, daß entsprechend Abb. 4 Linearmotoren den Vorteil haben, daß keine mechanischen Übertragungselemente zusätzlich zu dem Schlittengewicht beschleunigt werden müssen. Demgegenüber wirkt sich bei Antrieben mit mechanischen Übertragungselementen die Reduktion des vom Motor aufzubringenden Moments für die Schlittenbeschleunigung durch die Getriebeübersetzung positiv aus. Dies stellt vor allem bei großen Schlittengewichten einen Vorteil dar. Sofern das Schlittengewicht in Grenzen gehalten wird, ist jedoch der Einsatz von Linearmotoren hinsichtlich des Beschleunigungsvermögens von Vorteil.

Hinsichtlich der maximal erreichbaren Vorschubkräfte haben konventionelle Antriebe in der Regel zwar deutliche Vorteile gegenüber Direktantrieben, da jedoch gemäß Abschnitt 2 die Zerspanungskräfte bei der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung vergleichsweise gering sind, bestehen hierfür keine Einschränkungen durch den Einsatz von Direktantrieben.

Forderungen an mechanische Komponenten von Hochgeschwindigkeitsmaschinen

Unabhängig davon, welches Antriebsprinzip eingesetzt wird, ergeben sich bei Vorschubantrieben mit großen Geschwindigkeitsverstärkungen höhere Forderungen an das schwingungstechnische Verhalten der außerhalb der Lageregelkreise liegenden Maschinenkomponenten, als bei kleineren Geschwindigkeitsverstärkungen. Zur Verdeutlichung dieses Sachverhalts zeigt Abb. 6 beispielhaft die Darstellung des schwingungstechnischen Verhaltens einer das Werkzeug bewegenden Vorschubachse. Dabei wird davon ausgegangen, daß das Spindelgehäuse und seine Ankopplung an den Vorschubschlitten durch mechanische Resonanzfrequenzen charakterisiert wird und deren Anregung über den Vorschubantrieb zu unerwünschten Schwingbewegungen des Werkzeugs führen kann. Aus Abb. 6 wird ersichtlich, daß der Lageregelkreis wie ein Filter wirkt, das eine Anregung außerhalb des Lageregelkreises befindlicher Resonanzstellen verhindern kann.

Abb. 7 zeigt diesen Zusammenhang exemplarisch für eine in Vorschubrichtung außerhalb des Lageregelkreises befindliche mechanische Resonanzstelle. Die Schwingneigung wird für eine Geschwindigkeitsverstärkung von K_v = 15 m/min · mm erst bei mechanischen Resonanzfrequenzen oberhalb von

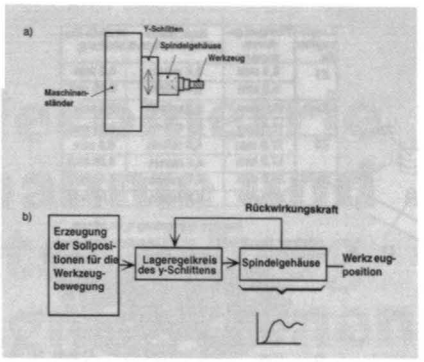


Abb. 6: Beispielhafte Darstellung des schwingungstechnischen Verhaltens einer Vorschubachse. a) Aufbau der Maschinenkomponenten, b) Blockschaltbild.

100 Hz ausreichend reduziert. Bei einer Geschwindigkeitsverstärkung von 5 m/min · mm werden Schwingungen bereits bei einer mechanischen Resonanzfrequenz von 50 Hz vermieden. Das Schwingungsverhalten hängt selbstverständlich nicht nur von dem Betrag der mechanischen Resonanzfrequenz, sondern auch von deren Dämpfung und den Masseverhältnissen ab; jedoch kann prinzipiell stets von solchen Zusammenhängen ausgegangen werden. Grundsätzlich ist daher vor allem bei Hochgeschwindigkeitsbearbeitungsmaschinen mit großen Forderungen an die Geschwindigkeitsverstärkung ein besonderes Augenmerk auf die gesamtheitliche Auslegung von Vorschubantrieben und die mechanischen Maschinenkomponenten zu legen. Das gilt in ganz besonderem Maße beim Einsatz von Direktantrieben. Hier ist mit konstruktiven Maßnahmen bzw. durch die in Abschnitt 2 beschriebene Ruckbegrenzung dafür zu sorgen, daß das Potential der Linearmotoren zur Leistungssteigerung genutzt werden kann.

Entwicklungsarbeiten und Ergebnisse mit direktangetriebenen Hochgeschwindigkeitsmaschinen

Die Entwicklungsarbeiten des ZFS und der kooperierenden Hochschulinstitute in Stuttgart auf dem Gebiet der Hochgeschwindigkeitszerspanungsmaschinen befassen sich u. a. mit
– der konstruktiven Maschinenoptimierung hinsichtlich statischer, dynamischer und thermischer Eigenschaften,
– der Optimierung der Antriebsstränge und
– den technologischen Untersuchungen.

So wird unter anderem im Rahmen eines vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg und zwölf Industrieunternehmen finanzierten Entwicklungsvorhabens das Potential zur Wirtschaftlichkeitssteigerung in der Hochgeschwindigkeitszerspanung durch den Einsatz von Bearbeitungsmaschinen auf Linearmotorbasis ermittelt.

Desweiteren wurde die entwicklungsbegleitende dynamische Optimierung des direktangetriebenen Bearbeitungszentrums XHC 240 der Firma Ex-Cell-O durchgeführt. Hierbei wurde das dynamische Verhalten sowohl der Antriebe

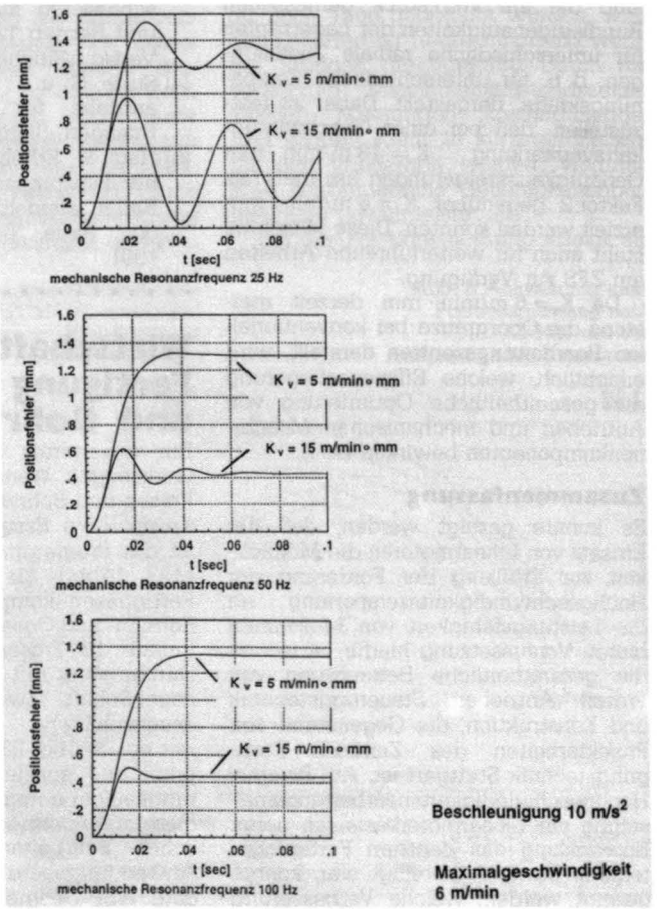
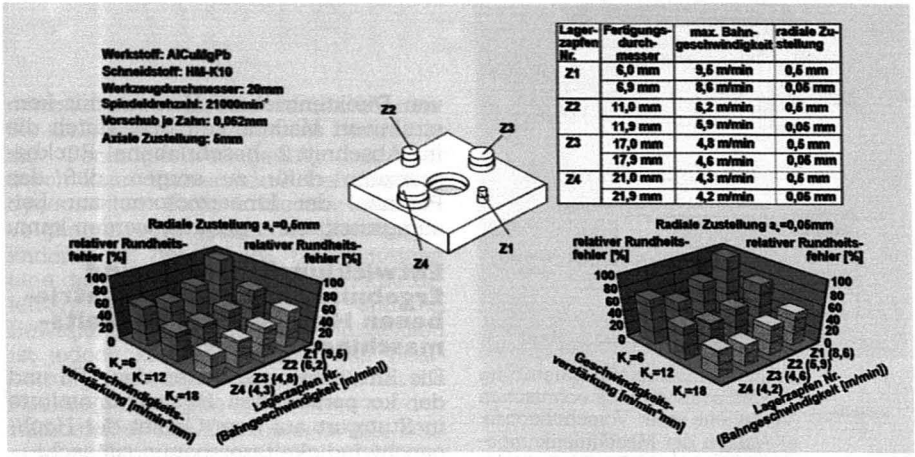


Abb. 7: Einfluß einer in Vorschubrichtung wirkenden mechanischen Resonanzstelle (Anfahrvorgang)



Lagerzapfen Nr.	Fertigungsdurchmesser	max. Bahngeschwindigkeit	radiale Zustellung
Z1	6,0 mm	9,5 m/min	0,5 mm
	6,9 mm	8,6 m/min	0,05 mm
Z2	11,0 mm	6,2 m/min	0,5 mm
	11,9 mm	5,9 m/min	0,05 mm
Z3	17,0 mm	4,8 m/min	0,5 mm
	17,9 mm	4,6 m/min	0,05 mm
Z4	21,0 mm	4,3 m/min	0,5 mm
	21,9 mm	4,2 m/min	0,05 mm

Abb. 8: Bestimmung des Potentials zur Genauigkeitssteigerung beim Einsatz von Direktantrieben (mit Vorsteuerung) am Beispiel des Außenzirkularfräsens von Lagerzapfen (Bildnachweis: ZFS)

als auch der mechanischen Maschinenkomponenten betrachtet. Auf der Basis dieser Maschine konnten bis jetzt Geschwindigkeitsverstärkungen K_v = 18 m/min · mm realisiert werden. Zur Bestimmung des mit der K_v-Steigerung verbundenen Genauigkeitspotentials bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten wurden am ZFS Zerspanungsuntersuchungen durchgeführt. Beim Außenzirkularfräsen von Lagerzapfen wurde dabei eine konstante Vorschubgeschwindigkeit an der Schneide entsprechend f_z = 0,052 mm gewählt. Bedingt durch unterschiedliche Zapfendurchmesser wurde dabei eine Bahngeschwindigkeit von bis zu 9,5 m/min realisiert. In Abb. 8 sind die am Werkstück gemessenen Rundlaufgenauigkeiten der Lagerzapfen für unterschiedliche radiale Zustellungen, d. h. für unterschiedliche Zerspanungskräfte, dargestellt. Dabei ist festzustellen, daß bei einer Geschwindigkeitsverstärkung K_v = 18 m/min · mm Genauigkeitssteigerungen um mehr als Faktor 2 gegenüber K_v = 6 m/min · mm erzielt werden konnten. Diese Maschine steht auch für weiterführende Arbeiten am ZFS zur Verfügung.

Da K_v = 6 m/min · mm derzeit meistens die Obergrenze bei konventionellen Bearbeitungszentren darstellt, wird ersichtlich, welche Effizienzsteigerung die gesamtheitliche Optimierung von Antrieben und mechanischen Maschinenkomponenten bewirken kann.

Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, daß der Einsatz von Linearmotoren die Möglichkeit zur Erfüllung der Forderung der Hochgeschwindigkeitszerspanung an die Leistungsfähigkeit von Maschinen bietet. Voraussetzung hierfür ist jedoch die gesamtheitliche Betrachtung von Prozeß, Antrieben, Steuerungstechnik und Konstruktion, die Gegenstand von Projektarbeiten des Zentrum Fertigungstechnik Stuttgart ist. Am Beispiel Hochgeschwindigkeitsbearbeitungsmaschine auf Linearmotorbasis, an deren Entwicklung das Zentrum Fertigungstechnik Stuttgart beteiligt war, konnte gezeigt werden, welche Verbesserung hinsichtlich Fertigungsgeschwindigkeit bzw. -genauigkeit durch eine über das derzeitige übliche Maß hinausgehende Steigerung der Geschwindigkeitsverstärkungen erreicht werden kann.

Literatur

[1] Heisel, U; Gringel, M.;Eichler, R.: Maschinenkonzepte für die Hochgeschwindigkeitsfräsbearbeitung, dima 9/94, AGT Verlag Thum, Ludwigsburg, S. 34 – 37.

[2] N.N.: Lagegeregelte Hochleistungsspindel für Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, dima 9/94, AGT Verlag Thum, Ludwigsburg, S. 51f.

[3] Gebert, K.; Wolff, N.: Wege zu schnelleren Steuerungen, Werkstatt und Betrieb 126 (1993), Carl Hanser Verlag München, S. 75 – 82.

[4] Stute, G. u. a.: Elektrische Vorschubantriebe für Werkzeugmaschinen, Erlangen, Siemens, 1981.

[5] Hagl, R.: Erhöhung der Verfügbarkeit mit selbstanpassender Lageregelung, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo: Springer-Verlag, 1991