

Maschinenkonzepte für die Hochgeschwindigkeitsfräsbearbeitung

Die derzeitige Marktsituation im Maschinen- und Anlagenbau ist dadurch gekennzeichnet, daß sowohl Hersteller als auch Lohnfertiger sich gezwungen sehen, dem steigenden Angebots- und Preisdruck durch Senkung ihrer Produktionskosten Rechnung zu tragen und Wettbewerbsvorteile durch Erhöhung der Flexibilität und Qualität ihrer Fertigung zu erzielen. Bei der mechanischen Bearbeitung bietet der Einsatz der Hochgeschwindigkeitszerspanung ein bislang gering genutztes Potential an Rationalisierungsmöglichkeiten. Durch Erhöhung der Vorschub- und Schnittgeschwindigkeiten um den Faktor 5 bis 10 im Vergleich zur konventionellen Zerspanung wird eine erhebliche Reduzierung der Hauptzeitanteile bei zerspanungsintensiven Fertigungsprozessen erreicht. Die wesentlichen Merkmale einer Fräsbearbeitung mit gesteigerten Schnittgeschwindigkeiten sind die sinkenden Schnittkräfte und die hohen erreichbaren Oberflächenqualitäten. Bei konstantem Vorschub pro Zahn können deutlich größere Vorschubgeschwindigkeiten realisiert werden, mit denen sich hohe Zeitspannungsvolumina erzielen lassen. Die Haupteinsatzgebiete der HSC-Bearbeitung liegen in der Komplettbearbeitung von Leichtmetall-Legierungen und Kunststoffen sowie beim Schlichten in der Stahl- und Gußbearbeitung, beispielsweise im Werkzeugbau. – Von Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c.U. Heisel, Dipl.-Ing. M. Gringel und Dipl.-Ing. R. Eichler¹⁾.

Problemstellung

Schwerpunkte im Bereich der industriell anwendbaren Hochgeschwindigkeitszerspanung liegen u.a. in der Entwicklung von leistungsfähigen Spindelsystemen und werkzeugseitig in der Erprobung von neuen Hochleistungsschneidstoffen (z.B. CBN, PKD).

Das Maschinenkonzept für die HSC-Fräsbearbeitung wurde weitgehend von bestehenden Bearbeitungsmaschinen abgeleitet. Deshalb konnten die hohen Anforderungen an die Maschinendynamik bei der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung bisher nicht vollständig umgesetzt werden.

Lösungsansätze hin zu Maschinen, mit denen hohe Bahngeschwindigkeiten realisiert werden können, gehen von der Direktantriebstechnik mit entsprechenden Steuerungs- und Regelungssystemen aus [1]. Die Direktantriebstechnik in Verbindung mit einer geeigneten Maschinenkinematik (Achsanordnungen und Bauweisen) mit minimiert bewegten Massen und Leichtbaukonzepten für bewegte Maschinenbaugruppen zeigt neue Wege im Werkzeugmaschinenbau auf [2].

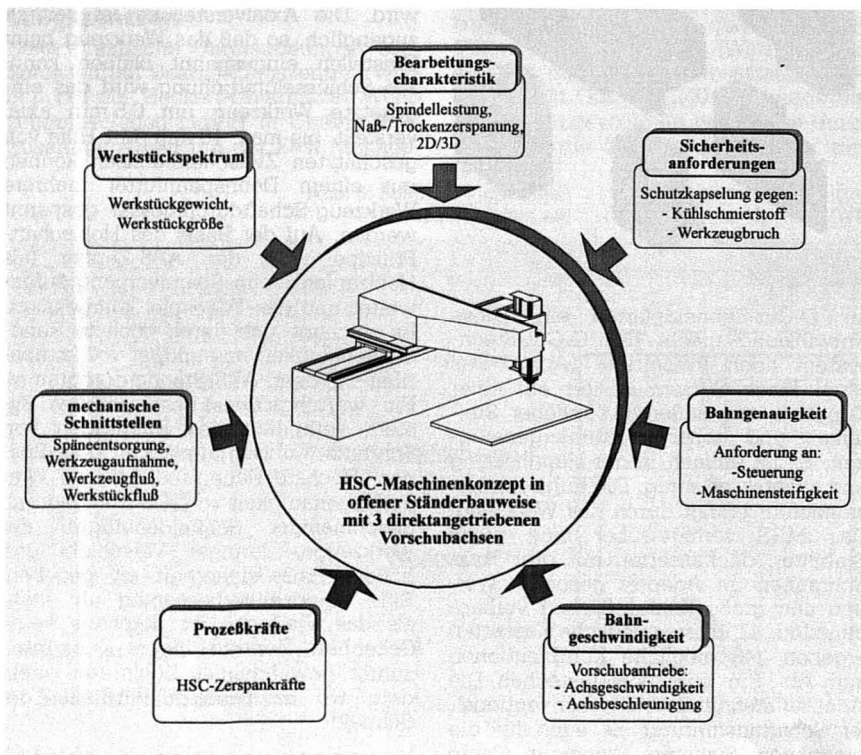
Ziel der Arbeiten am Institut für Werkzeugmaschinen ist die Entwicklung innovativer Maschinenkonzepte mit Direktantriebstechnik für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung sowie die Untersuchung und Beurteilung von Maschinenbaugruppen hinsichtlich ihrer Eignung für die Realisierung dieser neuen Maschinenkonzeptionen.

Kriterien für die Auslegung von HSC-Maschinen

Die Erstellung eines Lasten- bzw. Pflichtenheftes von hochdynamischen Bearbeitungsmaschinen ist die Voraussetzung für die Auslegung neuer Maschinenkonzepte zur Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. Kriterien, wie die Analyse des Werkstückspektrums, Berücksichtigung der Sicherheitsanforderungen, die Anforderungen hinsichtlich einer Prozeßauslegung usw. sind dabei von entscheidender Bedeutung (Abb. 1).

Bekannt ist in der Regel das zu bearbeitende Werkstückspektrum, so daß hieraus der erforderliche Arbeitsraum und die Mindestanzahl an Bewegungsfreiheitsgraden durch entsprechende Vorschubachsen der Maschine abgeleitet werden können. Die Möglichkeit für den Einsatz von Kühlschmierstoff ist durch entsprechende Anlagen, mit denen sich ausreichend hohe Drücke und Volumenströme realisieren las-

Abb. 1: Kriterien für die Konzeption von HSC-Bearbeitungsmaschinen



¹⁾ Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c.U. Heisel ist Leiter des Institutes für Werkzeugmaschinen (IfW) an der Universität Stuttgart, Dipl.-Ing. M. Gringel und Dipl.-Ing. R. Eichler sind wissenschaftliche Mitarbeiter am selben Institut.

sen, vorzusehen. Konstruktiv sind sicherheitstechnische Einrichtungen in Form von Kapselungen an der Maschine notwendig, welche vorrangig dem Schutz des Bedienpersonals bei Werkzeugbruch und der Umwelt bei Kühlschmierstoffemission und Lärm dienen. Ebenso beeinflussen mechanische Schnittstellen innerhalb des Werkzeug- und Werkstückflusses sowie für die Späneentsorgung das Maschinenkonzept. Besonders hohe Anforderungen hinsichtlich Unwucht, Rund- und Planlaufgenauigkeit werden an die Schnittstelle zwischen Spindel und Werkzeug gestellt. Aus der Prozeßauslegung, d. h. Schnittparameter, Bearbeitungsstrategie, 3-Achs- oder 5-Achsbearbeitung usw. ergeben sich die notwendigen Bahngeschwindigkeiten und -beschleunigungen bei geforderten Bahngenauigkeiten.

Wichtiges Kriterium für die Maschinenauslegung bei der spanenden Bearbeitung ist die Kenntnis der auftretenden Zerspankräfte, da sie als Belastungskräfte auf die Vorschubantriebe bzw. auf den gesamten mechanischen Aufbau der Bearbeitungsmaschine wirken. Im Gegensatz zu berechenbaren Belastungskräften wie Massenträgheitskräften, Unwuchtkräften schnelldrehender Spindel-Werkzeugsysteme und Gewichtskräfte liegen für die HSC-Bearbeitung nur unzureichende Erkenntnisse über den Einfluß von Zerspankräften auf das dynamische Verhalten der Maschine bzw. deren Baugruppen vor.

Die Berücksichtigung der Zerspankräfte und ihre Auswirkungen auf das Genauigkeitsverhalten ist insbesondere im Hinblick auf die Auslegung der Vorschubantriebe sowie die Beurteilung von Maschinenbaugruppen bzw. -elementen hinsichtlich ihrer Eignung für die Realisierung dieser neuen Konzepte erforderlich. In Abbildung 2 sind die wesentlichen, für die Maschinenauslegung relevanten Belastungskräfte dargestellt.

Während die Maschinenkinematik in erster Linie die Achsanordnung und den Arbeitsraum festlegt, wird das dynamische Verhalten der Bearbeitungsmaschine im wesentlichen durch die wirkenden Belastungskräfte, die eingesetzte Antriebstechnik mit Steuerung und Regelung, den bewegten Massen der Verfahrsachsen und dem Steifigkeits- und Dämpfungsverhalten der Baugruppen bzw. des gesamten Maschinenaufbaus bestimmt. Konventionelle Methoden der Maschinenauslegung nach Gesichtspunkten der statischen Steifigkeit sind für die HSC-Maschinenauslegung ungeeignet, da die hierbei vorherrschende massive Bauweise mit ihren hohen Bauteilmassen zu einem schlechteren dynamischen Verhalten der Maschine führt.

Versuchsmaschine

Im Rahmen umfangreicher Forschungsarbeiten zum Thema „Auslegung von

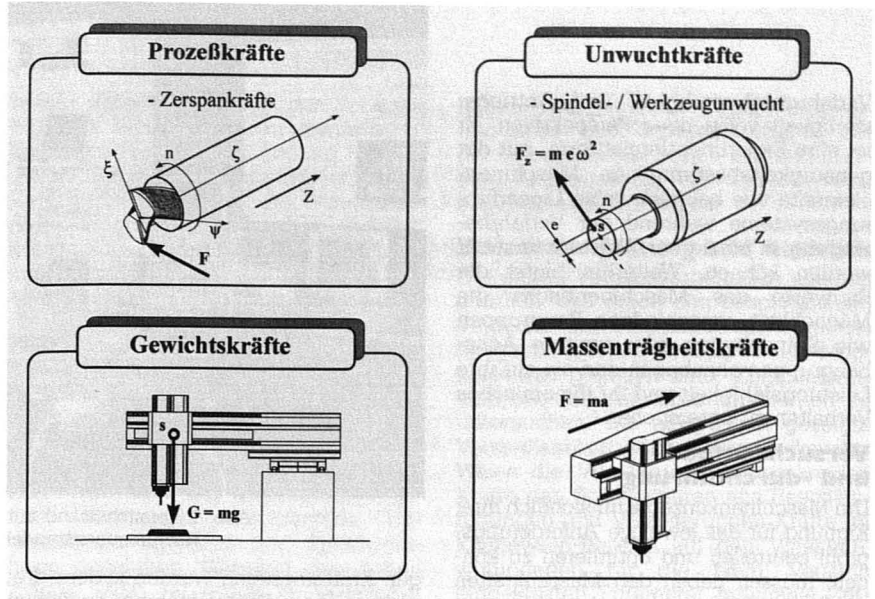


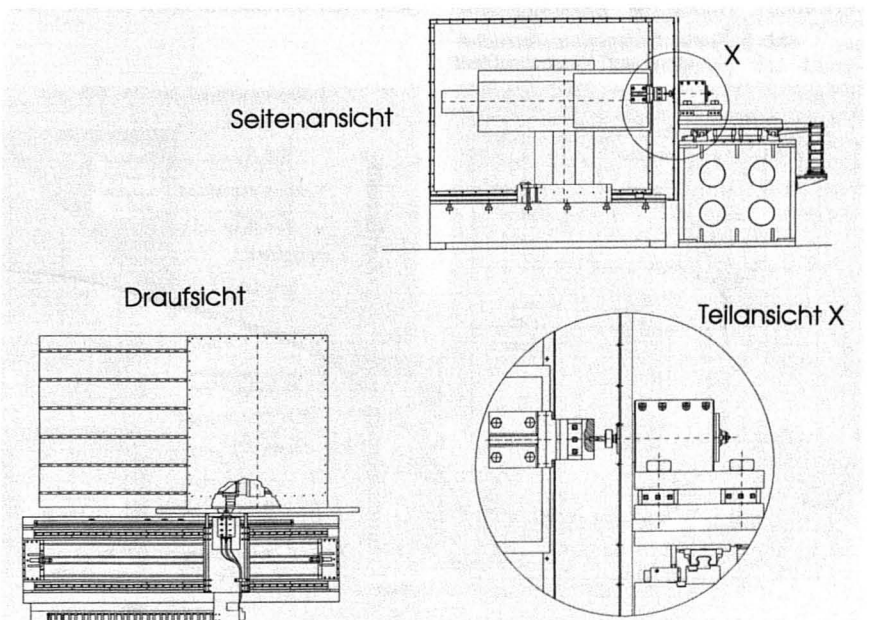
Abb. 2: Belastungskräfte

hochdynamischen Bearbeitungsmaschinen“ wurde am IfW ein Versuchsstand für experimentelle Untersuchungen von Baugruppen und Elementen an hochdynamischen Fertigungseinrichtungen aufgebaut. Der Versuchsstand ist die erste Ausbaustufe einer hochdynamischen Bearbeitungsmaschine in offener Ständerbauweise mit Direktantrieben, welche im Rahmen eines Sonderforschungsbereichs realisiert wird. Auf der Basis eines in Polymerbetonbauweise gefertigten Maschinengestells wurde die Grundachse in Form einer direktangetriebenen, wälzgelagerten Linearachse mit Versuchstisch konstruiert (Abb. 3). Für die Ermittlung von Zerspankräften bei der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung und deren Auswirkungen auf die Antriebs- und mechanische Struktur auslegung wurde auf dem Versuchstisch eine HSC-Spindel montiert (Abb. 4).

Der Versuchsstand am IfW weist folgende technische Daten auf:

- Abmessungen des Maschinengestells (B x H x L) 900 x 820 x 3400 mm
 - Masse (Polymerbetonguß mit integrierten Stahlteilen zur Montage von Maschinenelementen) 6,5 t
 - Antriebsdaten des Versuchstisches mit HSC-Spindel bewegte Tischmasse
 - $m_{\text{Tisch}} = \text{ca. } 200 \text{ kg}$
 - max. Vorschubkraft $F_{\text{Vorschub}} = 4 \text{ kN}$
 - max. Tischbeschleunigung
 - $a_{\text{max}} = 20 \text{ m/s}^2$
 - max. Vorschubgeschwindigkeit
 - $v_{\text{max}} = 100 \text{ m/min}$
 - max. Verfahrweg
 - $s_{\text{max}} = 2,5 \text{ m}$
 - Spindelaten (HSC-Spindel der Firma Fischer; Typ EV70/70-2WB):
 - $P = 3,4 - 4,6 \text{ kW}$
 - $n_{\text{max}} = 58900 \text{ min}^{-1}$
- Dieser Versuchsstand eröffnet hinsichtlich Beschleunigungsvermögen,

Abb. 3: Maschinenkonstruktion



Verfahrensgeschwindigkeit und Antriebssteifigkeit völlig neue Perspektiven. Er ist eine Experimentierplattform, mit der genauigkeitsbestimmende Maschinenelemente wie beispielsweise Linearführungssysteme während der Verfahrensbewegung in effizienter Weise untersucht werden können. Weiterhin bietet die Bauweise des Maschinentischs die Möglichkeit, verschiedene Baugruppen wie Spindeltypen oder weitere Achsbaugruppen anzubauen und sie auf ihre Leistungsfähigkeit und ihr dynamisches Verhalten zu untersuchen.

Versuchsaufbau und -durchführung

Um Maschinenkonzepte hinsichtlich ihrer Eignung für das jeweilige Anforderungsprofil beurteilen und optimieren zu können, müssen neben den Massenkräften die Zerspankräfte und ihre Auswirkungen auf das statische und dynamische Maschinen- bzw. Werkzeugverhalten bekannt sein. Deshalb ist es das Ziel der ersten Versuche, den Einfluß der Zerspankraft auf die Vorschubkraft des linearen Direktantriebs meßtechnisch zu ermitteln.

Für die Integration von Kraftmeßkomponenten in den Kraftfluß über Zerspanungsstelle-Werkzeug-Spindel-Maschine-Spanntisch-Werkstück zur Messung von Zerspankräften ist zu berücksichtigen, daß das statische und dynamische Verhalten des Gesamtsystems nur unwesentlich verändert werden darf. Die Forderung für die Meßeinrichtung nach großer Steifigkeit bei gleichzeitigem hohen Auflösungsvermögen erfüllen piezoelektrische Kraft-Meßplattformen [3]. Für die am Institut durchgeführten Zerspanversuche wurde u.a. eine Kistler-Meßplattform (Typ 9257 A) zwischen Aufspanntisch und Werkstück eingebaut. Weiterhin wurde für kleine Werkstückabmessungen ein hochsteifer 3-Komponentenaufnehmer (Typ 9068) mit einer Eigenfrequenz von 17 kHz verwendet. Außer der werkstückseiti-

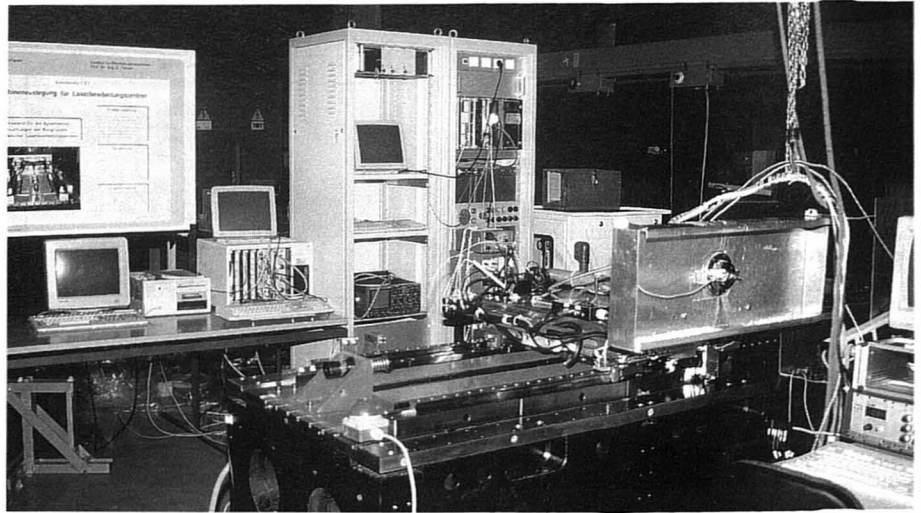


Abb. 4: Versuchsstand mit Hochfrequenzspindel

gen Kräftemessung wurden zudem drei weitere Piezo-Kraftaufnehmer zwischen Spindel und Maschinentisch integriert (Abb. 5).

Die Voraussetzung für das Messen von dynamischen Kräften beim Fräsen ist, daß während des Prozesses die Anregungsfrequenzen unter den Eigenfrequenzen der Meßeinrichtung liegen. Bei kleinen Werkzeugdurchmessern oder durch eine große Zahl von Schneiden werden beim Hochgeschwindigkeitsfräsen jedoch Anregungsfrequenzen erreicht, die im Bereich der Eigenfrequenz des Systems Meßplattform-Werkstück oder darüber liegen. Daher wurde am Institut für Werkzeugmaschinen eine Methode für die Auswertung der Signale der Meßplattform entwickelt, bei der mit einer mathematischen Kompensation die tatsächlichen Zerspankräfte ermittelt werden können (Abb. 6). Die mathematische Kompensation ergibt sich aus dem Übertragungsverhalten des Meßsystems Meßplattform-Werkstück-Aufspannung, das bei diesem Verfahren für jede Meßreihe neu ermittelt wird. Die parallel dazu durchgeführten Untersuchungen [4] am Insti-

tut für Produktionstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen in Darmstadt bestätigen diesen Lösungsansatz. Außer dem zeitlichen Verlauf der Zerspankraftkomponenten kann mit den unter der Spindel integrierten Kraftaufnehmern die Kraftwirkung der Spindel auf den Antriebsschlitten ermittelt werden.

Die gegenseitige Beeinflussung des dynamischen Werkzeug- und Maschinenverhaltens und damit die auftretenden Schnittkraftschwankungen können durch konstruktive Maßnahmen verändert werden. Die Zerspankraftverläufe im Zeitbereich sowie im Frequenzbereich sind vor allem von Bearbeitungsbedingungen wie Zähnezahl, Schnittbogenwinkel usw. abhängig. Weitere Abhängigkeiten für die Zerspankraftverläufe ergeben sich aus den Schnittkraftschwankungen durch Spannungsdickenänderungen und Abweichungen vom idealen Fräsprozeß. Für die Zerspanversuche wurden zweischneidige Vollhartmetallschaftfräser mit 8 mm Durchmesser eingesetzt. Mit der zunächst eingesetzten Hochfrequenzspindel konnte eine maximale Drehzahl bis etwa 60 000 min⁻¹ und damit Schnittge-

Abb. 5: Kraftaufnehmer am Versuchsstand und Versuchsablauf

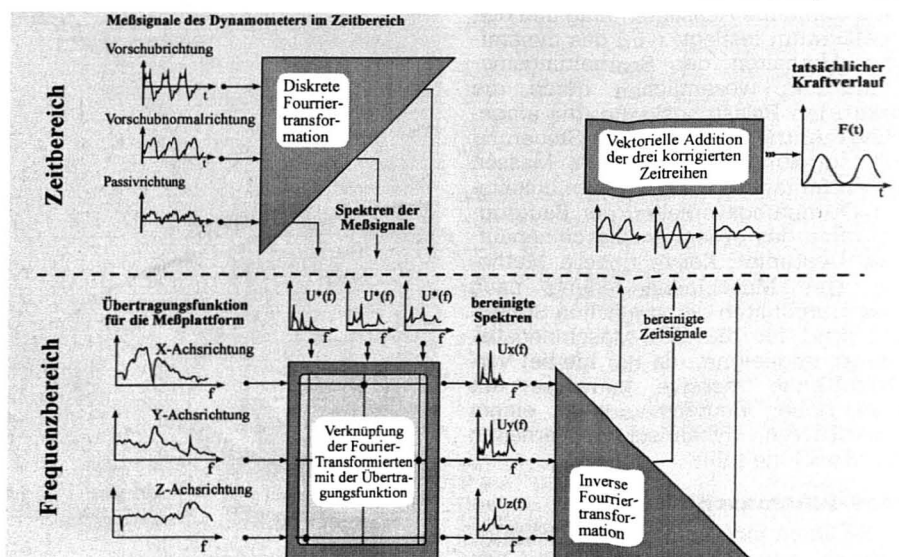
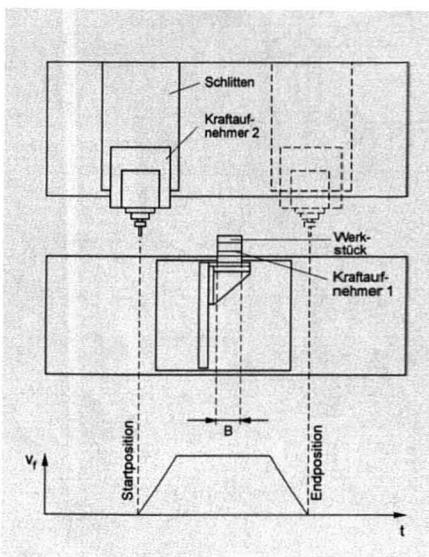


Abb. 6: Ermittlung der tatsächlichen Zerspankräfte

schwindigkeiten bis zu ca. 1500 m/min erreicht werden. Der Zahnvorschub wurde von 0,05 bis 0,6 mm variiert. Damit ergaben sich für die Versuche bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 1500$ m/min und einem Zahnvorschub von $f_z = 0,6$ mm Vorschubgeschwindigkeiten von $v_f = 72$ m/min. Als Versuchswerkstückstoff wurde zunächst eine Aluminiumknetlegierung verwendet. Neben Versuchsreihen, bei denen im Vollschnitt gefräst wurde, ist bei kleineren radialen Zustellungen als $a_e = d/2$ im Gegenlauf bearbeitet worden (axiale Zustellung 0,6 mm).

Versuchsergebnisse

Um den Einfluß des Zerspanprozesses auf die notwendige Vorschubkraft des Vorschubantriebs zu bestimmen, wurden Versuchsreihen durchgeführt, bei denen das Kraftsignal des werkstückseitigen Kraftaufnehmers 1 (Abb. 5) in Vorschubrichtung aufgezeichnet wurde. Dabei befand sich der Aufnehmer zwischen dem zylinderförmigen Werkstück ($D \times L = 60$ mm \times 30 mm) und dem Aufspanntisch. Neben dem zeitlichen Verlauf der Vorschubzerspankraft wurde die Kraftwirkung zwischen Spindel und Vorschubschlitten gemessen.

Abbildung 5 verdeutlicht ebenfalls den Versuchsablauf, bei dem der Schlitten mit der Beschleunigung von 1 g aus seiner Startposition auf eine konstante Vorschubgeschwindigkeit beschleunigt

wurde. Gebremst wurde der Schlitten mit einer Verzögerung von ebenfalls 1 g. Der Kurvenverlauf in Abbildung 7a zeigt die auf den Schlitten wirkenden Kräfte in Vorschubrichtung bei oben beschriebenen Verfahrzyklus mit einer Spindeldrehzahl $n = 0$ min^{-1} und einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 36$ m/min. Die bei der Schlittenbeschleunigung gegen die Antriebskraft gerichtete Massenträgheitskraft resultiert aus $F = m \cdot a$, wobei die Spindelmasse ca. 100 kg beträgt. Damit ergibt sich eine Kraft von etwa 1000 N. Der Meßschrieb in 7b ergibt sich bei dem gleichen Verfahrzyklus mit einer Spindeldrehzahl von $n = 60000$ min^{-1} . Hier wird eine der Beschleunigungskraft überlagerte alternierende Unwuchtkraft aufgrund der Spindeldrehung ersichtlich. Während des dritten Zyklus' (Abb. 7e) wurde im Vollschnitt zerspannt. Mit den Meßergebnissen aus dem werkstückseitigen Aufnehmer 1 und dem Aufnehmer 2 zwischen Spindel und Schlittentisch lassen sich die bei der Zerspanung entstehenden Kräfte und ihre Auswirkungen auf den Antrieb beurteilen. Bei dem Vergleich der Mittelwerte (Mean-Werte) zeigen sich für beide Meßkanäle gleiche mittlere Zerspankräfte in Vorschubrichtung von ca. 15 N. Deutlich wird, daß die an der Zerspanungsstelle wirkenden Kraftspitzen bei diesen Versuchsparametern keine Auswirkungen auf den Verlauf der Kraft zwischen Spindel und Tisch

haben. Hier wirken vor allem sinusförmig umlaufende Unwuchtkräfte, die bei der Spindeldrehzahl von $n = 60000$ min^{-1} eine Kraftamplitude von 180 N in Vorschubrichtung aufweisen.

Zusammenfassung und Ausblick

Die ersten Versuchsergebnisse machen deutlich, daß durch den beschriebenen Versuchs- und Meßaufbau sowie mit der hochdynamischen Maschine die Möglichkeiten gegeben sind, Zerspankrafteinflüsse auf Antriebskomponenten zu untersuchen. Der beispielhaft gezeigte Versuchsablauf stellt in eindrucksvoller Weise die Verhältnisse der wirkenden Kräfte dar. So resultieren aus Beschleunigungen und Verzögerungen Kräfte im Kilonewton-Bereich auf den Vorschub, wohingegen für die beim Versuch eingestellten Parameter maximale Zerspankräfte von nur ca. 80 N wirken. Im Vergleich zu den Zerspankräften weist die Amplitude der umlaufenden Unwuchtkraft durch die Spindel 180 N auf (Abb. 8). Ein weiteres wichtiges Ergebnis ist die Erkenntnis, daß sich auf den Vorschubantrieb nur die mittleren Zerspankräfte auswirken.

Ziel weiterer Untersuchungen ist die Messung von Zerspankräften und ihrer Auswirkungen auf den Vorschubantrieb bei höheren Schnittgeschwindigkeiten und bei der Bearbeitung von Guß und Stahl. Hierfür soll eine leistungsstärkere Spindel eingesetzt werden.

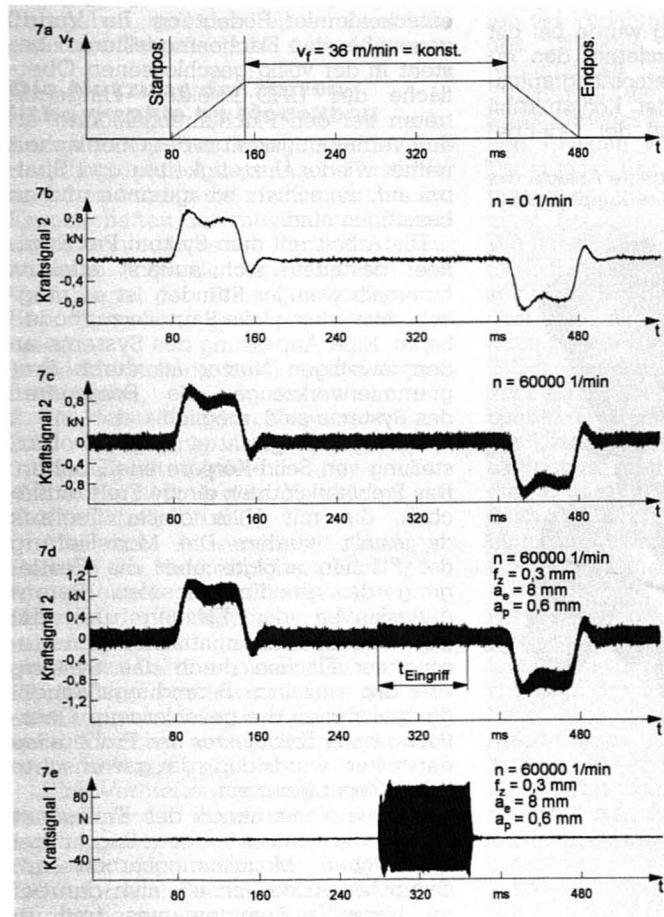


Abb. 7: Kraftverläufe

Literatur

- [1] Philipp, W.: Regelung mechanisch steifer Direktantriebe für Werkzeugmaschinen. Dissertation TU Stuttgart, 1992.
- [2] Heisel, U.; Gringel, M.: Maschinenauslegung für Laserbearbeitungszentren. In: Ergebnisbericht des Sonderforschungsbereichs 349, 1993, S. 371 bis 392.
- [3] Kauffeld, M.: Hochgeschwindigkeitsfräsen und Fertigungsgenauigkeit dünnwandiger Werkstücke aus Leichtguß. Dissertation TU Darmstadt, 1989.
- [4] Schulz, H.; Herget, T.: Simulation and Measurement of Transient Cutting Force Signal in High-Speed-Milling. In: Annals of the German Academic Society for Production Engineering, Vol. 1/2, (1994), S. 19 bis 22.

Abb. 8: Kräftevergleich (Bildnachweis: IFW)

