

1 Steigende Anforderungen
bezüglich Genauigkeit und Oberflächengüte: Fräsen von
Aluminiumstrukturbauteilen aus dem Vollmaterial

Motorspindeln sind Schlüsselkomponenten

Ständiger Betrieb an der Leistungsgrenze stellt bei HPC-Motorspindeleinheiten höchste Anforderungen an die Wälzlager, Schmiersysteme, Drehdurchführungen, Werkzeugschnittstellen und Antriebsmotoren. Um Ausfälle der Spindeleinheiten, bedingt durch Schäden an ihren Komponenten, zu vermeiden, stehen den Spindelherstellern moderne Berechnungs- und Testverfahren bei der Entwicklung immer leistungsfähigerer Systeme zur Verfügung.

CHRISTIAN BRECHER, MARCUS QUEINS, MARTIN ESSER UND HORST VOLL

► Insbesondere in der Luftfahrtbranche, aber auch in anderen Produktionszweigen werden komplexe Strukturbauteile oft aus Vollmaterial herausgearbeitet (Bild 1). Auf Grund des geforderten Leichtbaus bestehen Flugzeugbauteile häufig aus Aluminium oder Titan. Sie unterliegen dabei steigenden Anforderungen bei Genauigkeit und Oberflächengüte und haben nicht selten Abmaße von mehreren Metern Rohteillänge. Entsprechend lassen sich die Stückkosten solcher Teile nur mit einer Senkung der Hauptzeit effektiv beeinflussen.

Die erforderliche Produktivitätssteigerung der Zerspanprozesse bedingt dabei die Optimierung der Fräsbahnen und Erhöhung der Bahngeschwindigkeit. Daraus abgeleitet ergeben sich steigende Anforderungen an die Schnittgeschwindigkeit und Fräserintauchtiefe, die zum Betrieb moderner Motorspindeln an deren Drehzahl- und Leistungsgrenzen führen. Die Folge sind extreme mechanische und thermische Belastungen der Wälzlager. Unter diesen extremen Einsatzbedingungen kommt es nicht selten zu einer Ver-

kürzung der Spindellebensdauer auf Grund von Lagerschäden.

Der Spindelhersteller sieht sich daher mit steigenden Anforderungen an die Robustheit der Konstruktion sowie Qualität der Fertigung und Montage konfrontiert. Allerdings sind auch die Anwender moderner Hochleistungsspindeln gehalten, übermäßige Belastungen – etwa bei Kollisionen oder bei anhaltendem Betrieb unter instabilen Prozessbedingungen (Ratterschwingungen) – zu vermeiden. Nur so lassen sich frühzeitige Lagerausfälle und damit ►►

© 2005 Carl Hanser Verlag, München www.metall-infocenter.de/WB Nicht zur Verwendung in Intranet- und Internet-Angeboten sowie elektronischen Verteilern.

►► Zusatzkosten für Maschinenstillstand, Montage und Wartung vermeiden.

Konstruktion und Fertigung der Motorspindel sind nicht alles

Um eine geforderte Betriebsdauer garantieren zu können, ist der Spindelhersteller in diesem Spannungsfeld mehr und mehr als Systemlieferant gefordert. So muss es das Ziel sein, für unterschiedliche Prozesse und Werkzeuge die stabilen Betriebspunkte einer Motorspindel vorhersagen zu können. Dies erleichtert dem Anwender die Prozessplanung und -optimierung und verhindert in vielen Fällen überhöhte mechanische Belastungen bei Instabilitäten während der Bearbeitung.

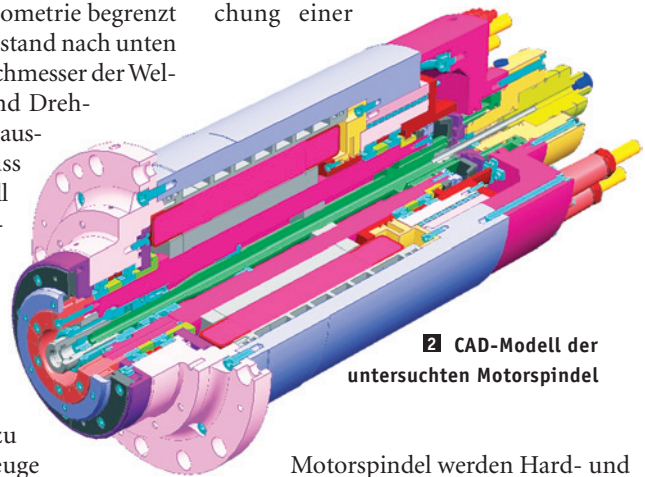
Dem Anwender muss ein Gesamtsystem angeboten werden, das trotz hoher Anforderungen an Präzision und Leistung robust und verlässlich arbeitet, die relevanten Prozesse mit definierten Parametern sicher beherrscht und wenig Aufwand für Wartung und Reparatur verursacht. Um dieses Ziel zu erreichen, muss das Leistungsspektrum des Spindelherstellers über die reine Konstruktion und Fertigung der Motorspindel hinaus erweitert werden. Zusätzlich muss der Kunde Informationen über erreichbare Zer-

dingungen der Welle von der Werkzeugschnittstelle – meist HSK – und den Motorabmaßen vorgegeben. Die Größe des Hohlchaftkegels bestimmt dabei den Bohrungsdurchmesser der arbeitsseitigen Wälzlager, die Motorgeometrie begrenzt den möglichen Lagerabstand nach unten und legt den Außendurchmesser der Welle fest. Um Leistung und Drehzahl des Antriebsmotors auszunutzen zu können, muss bei der Auslegung schnell drehender Motorspindeln sichergestellt werden, dass die maximale Betriebsdrehzahl einen ausreichenden Abstand zur ersten Eigenfrequenz der Spindelwelle hat [1]. Die zu verwendenden Werkzeuge sind hier mit zu berücksichtigen, da sie das Schwingungsverhalten des Systems beeinflussen. Für die Lagerung haben sich Öl-Luft-geschmierte Präzisions-Spindellager mit Keramikugeln in Tandem-O- Anordnung gut bewährt [2].

Die untersuchte Spindel (Bild 2) kann mit den verwendeten Werkzeugen (HSK-A63-Schnittstelle) von 16 000 min⁻¹ bis 30 000 min⁻¹ mit einer Motorleistung von 80 kW eingesetzt werden. Fräsversuche zeigen, dass ihr Asynchronmotor sich bis an seine Leistungsgrenze ausnutzen lässt. Ein weiterer Prototyp wurde deshalb mit einem noch kräftigeren, 100 kW leistenden Synchronmotor ausgestattet und wird zurzeit erprobt. Außerdem steht eine 130-kW-Spindel mit HSK-A100-Schnittstelle für einen ersten Testlauf bereit. Das nächste kurzfristige Entwicklungsziel ist die Steigerung der Drehzahl bis auf 40 000 min⁻¹, um eine noch größere Produktivität zu ermöglichen.

die Testergebnisse in hohen Drehzahlbereichen nur unwesentlich, sodass die gewonnenen Erkenntnisse direkt auf reale Produktionsanlagen übertragbar sind.

Für die Untersuchung einer



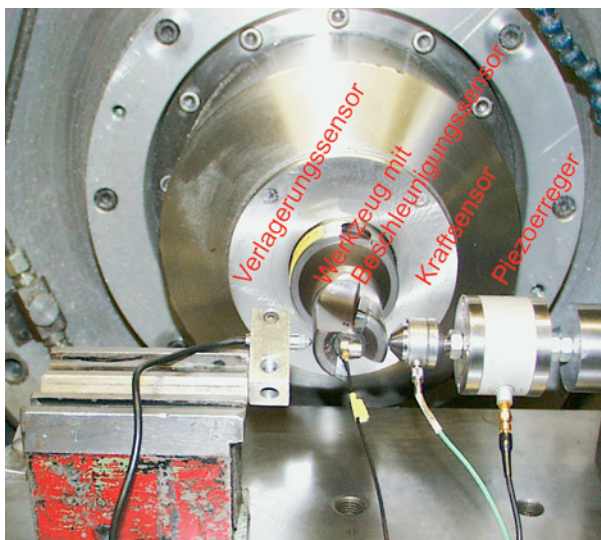
2 CAD-Modell der untersuchten Motorspindel

Motorspindel werden Hard- und Software der Maschine individuell angepasst. Spindelgehäusedurchmesser bis 320 mm lassen sich von der Arbeitsplattform des Hexapoden aufnehmen. Unterschiedliche Frequenzumrichterarten, die wahlweise eingesetzt werden, stellen bis zu 150 kW Dauerleistung zur Verfügung.

Die von der Firma Weiss, Schweinfurt, entwickelte Spindel wurde im Rahmen einer Optimierung der dynamischen Eigenschaften überarbeitet und vor dem Einsatz beim Anwender am WZL getestet.

Beim Abnahmelaufl wird auf gleichmäßiges Verhalten geachtet

Nach der Inbetriebnahme der Spindel wird zunächst ein Abnahmelaufl durchgeführt und ermittelt, ob sich das Temperatur- und Schwingungsverhalten unter definierten Bedingungen innerhalb vorgegebener Grenzwerte bewegt. Bei Einschaltdauern von mehreren Stunden und stufenweiser Steigerung der Drehzahl legt man besonderen Wert auf ein gleichmäßiges Verhalten. Sprünge in Tempera-



3 Messaufbau für die Messung des Nachgiebigkeitsfrequenzganges am Tool-Center-Point

spanleistungen und stabile Prozesspunkte erhalten. Ein Kriterium für die gelieferte Qualität sind ferner aussagekräftige Abnahmeprotokolle, die nur im Rahmen realitätsnaher Testläufe zu ermitteln sind.

Konstruktion

Bei der Auslegung einer Motorspindel werden die geometrischen Rahmenbe-

Am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen steht mit der parallelkinematischen Fräsmaschine ›Hexapod HOH 600‹ eine Testumgebung zur Verfügung, die es dem Spindelhersteller erlaubt, eine Neuentwicklung detailliert unter praxisnahen Bedingungen zu untersuchen. Die Maschine bietet mit ihrer hohen statischen und dynamischen Steifigkeit eine solide Basis und beeinflusst

Testergebnisse sind auf reale Anlagen übertragbar

i INSTITUT/HERSTELLER

WZL – Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der RWTH Aachen
 52074 Aachen
 Tel. 02 41/80-2 74 08
 Fax 02 41/8 02 22 93
 www.wzl.rwth-aachen.de

Weiss Spindeltechnik GmbH
 97424 Schweinfurt
 Tel. 0 97 21/77 01-0
 Fax 0 97 21/77 01-33
 www.weissgmbh.de

tur-, Schwingungs- oder Verlagerungs-schrieben deuten auf Verunreinigungen in der Spindel oder Verklemmungser-scheinungen durch thermische Dehnung hin. Fehler bei der Montage oder etwa die mangelnde Funktion des Loslagers lassen sich so ermitteln. Der Abnahmelauf fin-det standardmäßig auch beim Hersteller statt. Dennoch können je nach Einbausit-uation die Dämpfung von Schwingun-gen und die Wärmeableitung variieren,

sodass der Abgleich zwischen Prüfstands-versuch und realer Maschinenumgebung zur abschließenden Beurteilung nötig ist.

Nach längerem Stillstand zeigt ein Inter-valltest das Verhalten bei Beschleunigung der Spindelwelle auf Maximaldrehzahl. Temperatur- und Schwingungsspitzen di-rekt nach dem Hochlaufen deuteten beim ersten Prototypen der untersuchten Spin-del auf eine Übersmierung der Lager hin. Mit einer konstruktiven Optimie-

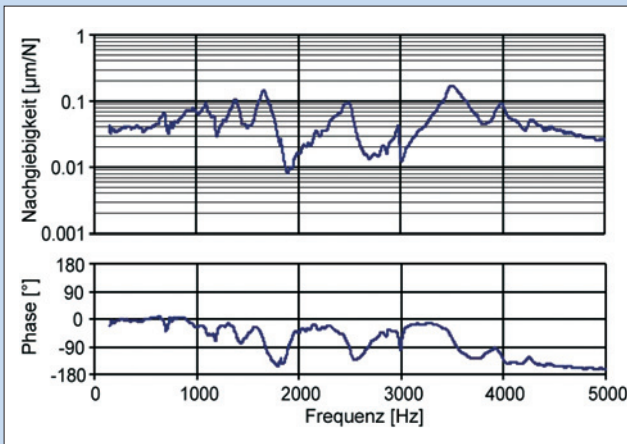
rung der Öl Ablaufbohrungen konnte die-se Schwierigkeit unterbunden werden. Erhöhten thermischen Belastungen der Lager im späteren Produktionsbetrieb ließ sich so effektiv vorbeugen.

Untersuchung der statischen und dynamischen Eigenschaften

Einen weiteren Untersuchungsschwer-punkt bilden die statischen und dynami-schen Eigenschaften der Motorspindel. Allgemein wird bei der Hochgeschwindig-keitsbearbeitung das Nachgiebigkeitsver-halten des Gesamtsystems hauptsächlich durch das Zusammenspiel von Wälzlage-rung, Spindelwelle und Werkzeug be-stimmt. Der Rotor des Motors wirkt durch seine Masse auf das Schwingungsverhal-ten, bringt aber keine zusätzliche Steifig-keit in das System ein. Der Aufbau des Spindelgehäuses und dessen Anbindung an die Werkzeugmaschine haben häufig weniger starken Einfluss auf die Prozess-stabilität. Ebenso sind die Charakteristika der Maschinenstruktur meist von unter-geordneter Bedeutung für die Beurteilung der Stabilität von HSC-Prozessen.

Eine Beurteilung des statischen und dynamischen Spindelverhaltens ist ►►

Beispiel einer Nachgiebigkeitsuntersuchung



4 Nachgiebigkeitsfrequenzgang bei Kräfteinleitung mit Piezoerreger, Wendeschneidplattenfräser, Durchmesser 32 mm, Gesamtlänge 110 mm; unten ist die Phasendrehung dargestellt

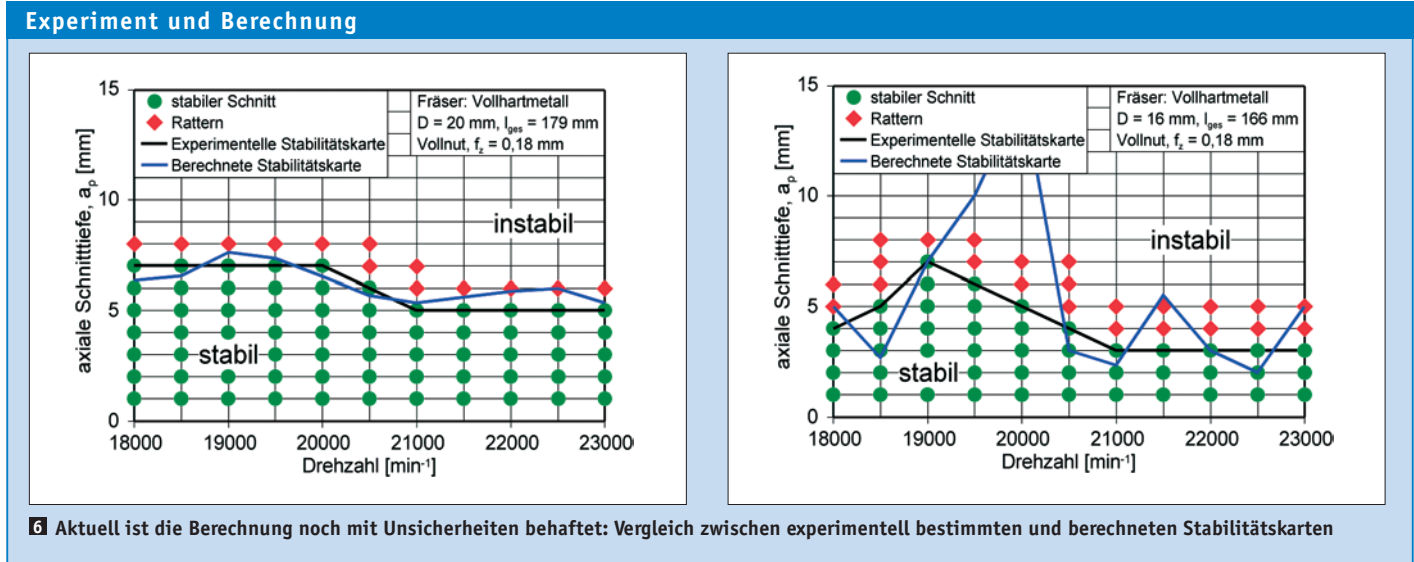
►► auf der Basis gemessener Nachgiebigkeitsfrequenzgänge am Tool Center Point möglich [3]. Dabei wird mittels eines Erregersystems (Impulshammer, piezoelektrischer Relativerreger) eine reproduzierbare Last in die Spindelstruktur eingeleitet. Die Reaktion der Struktur auf die Last wird parallel mit Wegaufnehmern oder Beschleunigungsaufnehmern erfasst und zu einem Nachgiebigkeitsfrequenzgang verrechnet (Bild 3). Beispielhaft ist das Ergebnis einer Nachgiebigkeitsuntersuchung

tematischer Variation der Drehzahl und der Schnitttiefe experimentell ermittelt werden. Bild 5 zeigt horizontale Nutenfräsversuche (links) und die daraus ermittelte Stabilitätskarte (rechts). Die hohe erreichbare Drehzahl der Spindel ermöglicht hier einen besonders produktiven Betrieb bei 29 000 min⁻¹ mit einer Zerspanrate von circa 4 l/min. Der große Nutzen der Stabilitätskarte wird im Vergleich deutlich: Bei gleichem Vorschub pro Zahn liegt die erreichbare Zerspanrate bei

der mechanischen Leistungsabgabe kann die Zerspanrate besonders bei hohen Drehzahlen weiter verbessern.

Vorhersage von Stabilitätsgrenzen auf Basis von Simulationen

Um die sehr zeitaufwändigen Fräsversuche zur Bestimmung der Stabilitätsgrenzen zu umgehen, wurden im Bereich der Forschung in der Vergangenheit Verfahren entwickelt, mit deren Hilfe die Be-

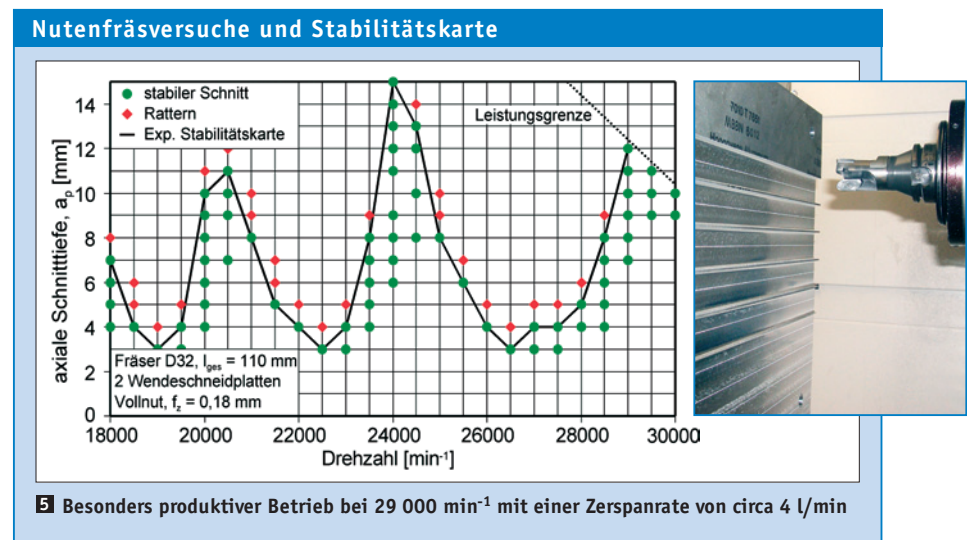


in Bild 4 dargestellt. Die Nachgiebigkeitsspitzen kennzeichnen Frequenzbereiche, in denen schon geringe Kräfte von außen starke Schwingungen verursachen können.

Fällt die dargestellte Phasendrehung gleichzeitig unter -90° ab, besteht grundsätzlich die Gefahr, dass während der Fräsbearbeitung regenerative Ratterschwingungen auftreten. Diese Erscheinung ist mit der Rückkopplung der dynamischen Kräfte und Verlagerungen zwischen Werkzeug und Werkstück zu erklären und ist selbsterregt, das heißt nicht von äußeren Einwirkungen verursacht. Je nach Fräserdrehzahl ändert sich die Schnitttiefe, die sich ohne das Auftreten von Ratterschwingungen, also im stabilen Prozess, einstellen lässt. Die Kenntnis der Stabilitätsgrenze über der Fräserdrehzahl ist daher wichtige Grundlage für eine hohe Produktivität.

Zerspanversuche ermitteln die Stabilitäts- und Leistungsgrenzen

Ein solcher Verlauf der erreichbaren Schnitttiefe über der Fräserdrehzahl wird als Stabilitätskarte bezeichnet. In Nutenfräsversuchen können Stabilitätskarten für unterschiedliche Werkzeuge bei sys-



27 000 min⁻¹ um fast 70 Prozent niedriger. Die Hauptzeit einer Zerspanaufgabe würde sich entsprechend verdreifachen.

Nur in Drehzahlbereichen, die eine stabile Bearbeitung mit hoher Zustellung erlauben, kann die Maximalleistung des Spindelantriebs in Späne umgesetzt werden. Dabei kann sich diese Grenze bei gleichen Nenndaten je nach Auslegung der Leistungselektronik des Frequenzumrichters verschieben. Eine Erhöhung

stimmung einer Stabilitätskarte rechnerisch möglich ist [4]. Hierzu wird das Zusammenwirken von Maschine und Prozess mit Hilfe regelungstechnischer Methoden modellhaft beschrieben und analysiert. Die wesentlichen Eingangsgrößen für eine solche Stabilitätssimulation sind zum einen der Nachgiebigkeitsfrequenzgang, dessen Messung weiter oben bereits beschrieben wurde. Zum anderen geht in die Berechnung der dyna-

mische Schnittkraftkoeffizient ein, welcher die Änderung der Schnittkraft bei schneller Änderung der Schnitttiefe beschreibt. Da beide Größen in hohen Frequenzbereichen noch nicht völlig fehlerfrei messbar sind, sind auch die berechneten Stabilitätskarten bei der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung aktuell noch mit Unsicherheiten behaftet. Bild 6 zeigt beispielhaft Berechnungsergebnisse im Vergleich mit experimentell ermittelten Stabilitätskarten. Wie im rechten Bild zu sehen, gibt es hier teilweise Abweichungen der Berechnungsergebnisse vom realen Prozessverhalten. Mögliche Ursachen sind dabei die Unkenntnis der genauen dynamischen Schnittsteifigkeiten moderner Werkstoffe aus dem Flugzeugbau und Änderungen in der dynamischen Nachgiebigkeit durch Prozesseinflüsse. Auf diesem Gebiet sind noch intensive Forschungsarbeiten notwendig, die am WZL im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Vorhabens durchgeführt werden sollen.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Ziel der Hauptzeitsenkung werden Drehzahl, Antriebsleistung und -moment von Motorspindeln für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von Aluminiumbauteilen weiter gesteigert werden. Um eine hohe Anlagenverfügbarkeit gewährleisten und große Bearbeitungszentren effizient einsetzen zu können, spielen die zielgerichtete Entwicklung und anschließend die ausführliche Untersuchung der Spindeln weiterhin entscheidende Rollen.

Durch eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Simulationstechnik soll es in Zukunft möglich sein, das dynamische Verhalten einer Motorspindel bereits während der Konstruktionsphase zu bestimmen [5]. Zeitaufwändige Zerspanversuche für jedes einzelne Fräswerkzeug könnten dann durch einen einmaligen Abgleich der Simulationsmodelle ersetzt werden. ◀

LITERATUR

- 1 Weck, M.: Werkzeugmaschinen Band 2, Konstruktion und Berechnung, 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2002
- 2 Tüllmann, U.: Das Verhalten axial verspannter, schnell-drehender Schrägkugellager, Shaker, Aachen 1999. Zugl: Dissertation, RWTH Aachen 1999
- 3 Weck, M.: Werkzeugmaschinen Band 5, Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, 6. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2001
- 4 Altintas, Y.; Weck, M.: Chatter Stability of Metal Cutting and Grinding, CIRP Keynote Paper, Annals of the CIRP, Vol. 53/2/2004
- 5 Weck, M.; Brecher, C.; Schulz, A.; Keiser, R.: Stabilitätsanalyse bei der HSC-Bearbeitung, in: wt Werkstattstechnik online, Heft 1, 2003

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher ist Inhaber des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen am Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre (WZL) der RWTH Aachen sowie Direktor und Leiter der Abteilung Produktionsmaschinen am Fraunhofer IPT;
c.brecher@wzl.rwth-aachen.de

Dipl.-Ing. Marcus Queins ist Oberingenieur der Abteilung Maschinentechnik am WZL;
m.queins@wzl.rwth-aachen.de

Dipl.-Ing. Martin Esser ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am WZL;
m.esser@wzl.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. Horst Voll war Entwicklungsleiter bei der Firma Weiss GmbH, a Siemens Company, in Schweinfurt und ist zurzeit bei diesem Unternehmen beratend tätig