

Elektrotechnik/Elektronik, Werkzeugmaschinenbau, Messen/Steuern/Regeln

Adaptronische biegesteife Strebe *

Kompensation geometrischer Maschinenfehler in parallelkinematischen Werkzeugmaschinen

C. Munzinger, S. Herder, M. Weis, J. Wauer, W. Seemann, C. Rudolf

Werkzeugmaschinen (WZM) weisen im Betrieb Verlagerungen sowohl im quasi-/statischen als auch im dynamischen Bereich auf. Durch die Integration adaptronischer Kompensationseinheiten in die Streben einer parallelkinematischen WZM wird deren Biegesteifigkeit erhöht.

Für den Produktionseinsatz sind die Funktion der Kompensationseinheit selbst sowie das Zusammenwirken mehrerer Streben darzustellen. Zudem sind Maßnahmen zur Reduktion des Spannungsniveaus notwendig, um ein sicheres Arbeitsumfeld zu schaffen.

Dr.-Ing. Christian Munzinger,
Dipl.-Ing. Stefan Herder, Dipl.-Ing. Martin Weis
Institut für Produktionstechnik (wbk)
Universität Karlsruhe (TH)
Kaiserstr. 12, D-76128 Karlsruhe
Tel. +49 (0)721 / 608-2449, Fax +49 721 / 699 503
E-Mail: weis@wbk.uka.de
Internet: www.wbk-ka.de

Prof. Dr.-Ing. Jörg Wauer, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Seemann,
Dipl.-Ing. Christian Rudolf
Institut für Technische Mechanik (itm)
Universität Karlsruhe (TH)
Kaiserstr. 12, D-76128 Karlsruhe
Tel. +49 (0)721 / 608-2397, Fax +49 / 721 / 608-6070
E-Mail: itm@uni-karlsruhe.de
Internet: www.itm.uni-karlsruhe.de

Info 1

Die Arbeiten zur adaptronischen Strebe werden im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1156 „Adaptronik für Werkzeugmaschinen“ gefördert.

Info 2

* Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen „reviewten“ Fachaufsatz: Autoren-unabhängig von Experten auf diesem Fachgebiet wissenschaftlich begutachtet und freigegeben.

Adaptronical strut with flexural rigidity – Compensation of geometrical errors in parallel kinematic machine tools

Machine tools show displacements in the quasi-/static and dynamic range. By integrating a compensating unit into the struts of a parallel kinematic Machine Tool their flexural rigidity is being increased. For the operation in the production environment the function of the compensation unit itself as well as the co-operation between several struts has to be estimated and realized. Additionally the high voltages have to be reduced for on-job-safety reasons.

1 Einleitung

Allgemein zeigen Werkzeugmaschinen Verlagerungen im statisch/quasistatischen und im dynamischen Lastbereich auf. Ziel des Projekts ist die adaptronische Kompensation dieser Verlagerungen mit paralleler Bewältigung von Sensor- und Aktorfunktion. In den ersten zwei Projektphasen wurde dazu bis heute auf den statisch/quasistatischen Bereich fokussiert, um in einer weiteren dritten Phase die Ausweitung des Konzepts auf den dynamischen Bereich anzugehen. Unter Ausnutzung des Prinzips einer Schwingensaitenwaage werden statische Verformungszustände zur Messung in ein dynamisches Eingangssignal für piezoelektrische Wandler gewandelt. **Bild 1** verdeutlicht hierzu den prinzipiellen Aufbau des Systems.

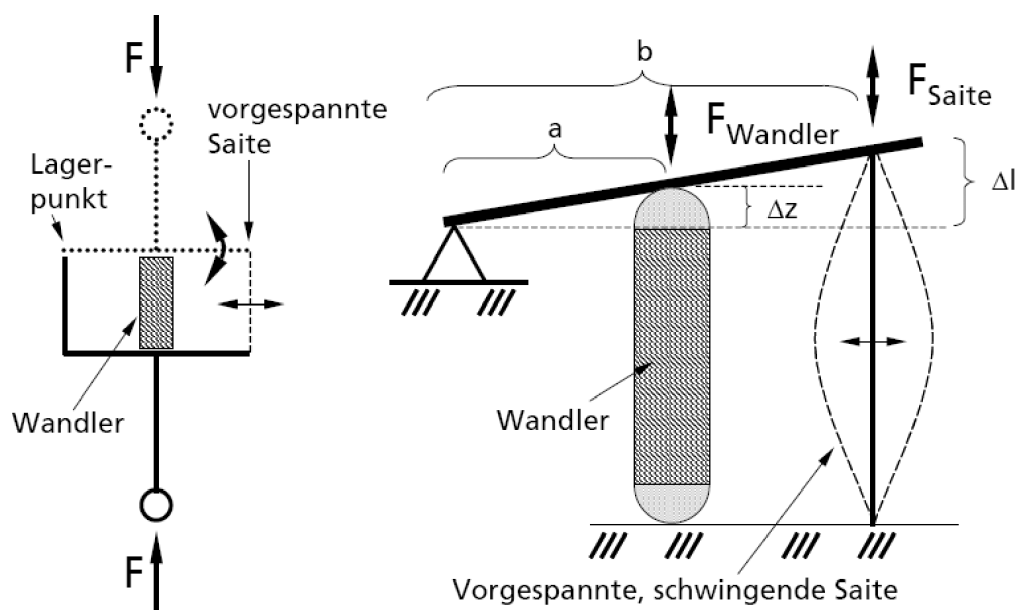


Bild 1. Prinzip der adaptronischen Strebe [1]

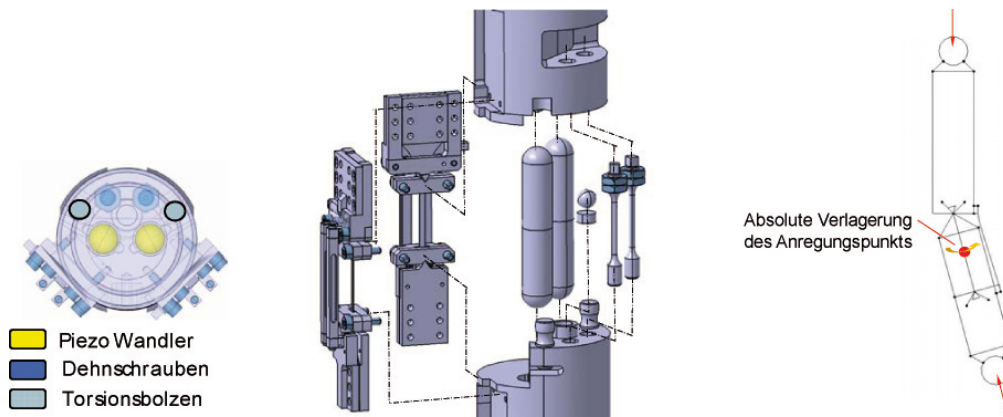


Bild 2. Aufbau der biegesteifen Strebe (links, Mitte) sowie Verlagerung des Anregungspunkts im Betrieb (rechts)

Der nach dem Abbeschen Komparatorprinzip in den Kraftfluss der Strebe eingebrachte piezoelektrische Wandler bildet zusammen mit dem abgebildeten Festkörpergelenk und der schwingenden Saite ein Hebelsystem. Dieses wirkt bezüglich der Übertragung des Messsignals von der Saite auf den Wandler als mechanischer Verstärker. Die Saite, deren Schwingung als Wechselkraftsignal über den entstehenden Kniehebel auf den Wandler wirkt, wird elektromagnetisch resonant angeregt, sodass prinzipbedingt sehr wenig Energie für diese Anregung erforderlich ist.

2 Ziel

Zur Darstellung einer geregelten Steifigkeit in beide Biegerichtungen einer Strebe wurde ein weiterer Wandler so integriert, dass aufbauend auf dem zuvor entwickelten Prinzip die gleichzeitige Verwendung der piezoelektrischen Wandler als Sensor und Aktor erhalten bleibt. Die hierbei notwendige Einführung einer weiteren schwingenden Saite zur dynamischen Vorspannung des Systems wurde konstruktiv so gelöst, dass einerseits der einfache Zusammenhang zwischen Eigenfrequenz der Saite und ihrer Längenänderung unter Last erhalten bleibt, und andererseits die Saiten so an den Strebenteilen befestigt wurden, dass sie sich gegenseitig nicht in ihrer Wirkung als Maßverkörperungen beeinflussen. Hinsichtlich der Torsionssteifigkeit der Gesamtstrebe wurde zur Einhaltung der gegebenen Bauraumgrenzen der zunächst angedachte Einsatz eines Faltenbalgs verworfen. Stattdessen wurden an die kinematischen Bedingungen angepasste Bolzen verwendet, die hinsichtlich der erreichbaren Steifigkeit vergleichbare Werte liefern (siehe auch **Bild 2**).

Im Rahmen der Umsetzung des biegesteifen Strebenkonzepts sind für den Einsatz in einer realen Maschine drei wesentliche Schwerpunkte von Bedeutung. Zunächst ist die Funktion der Kompensationseinheit selbst zu zeigen. Ein wesentlicher Bestandteil ist dabei die resonante Anregung der Saiten durch jeweils einen Elektromagnet. Weiterhin ist gerade für den produktionsnahen Betrieb das Absenken der Betriebsspannung der piezoelektrischen Wandler ein wesentliches Kriterium, um die Betriebssicherheit zu erhöhen. Auf Seite der technologischen Nutzbarkeit ist als weiterer Punkt die Anzahl und Position der aktiven Streben im bestehenden Maschinenkonzept zu bewerten.

Die konstruktive Ausgestaltung der schwingenden Saiten inklusive ihrer Aufnahmen zeigen deutlich den Unterschied zum bisherigen Konzept, bei dem sich im Betrieb die Winkel-lage der Saite zur Gesamtstrebe nicht ändert. Beiden Konzepten ist hingegen gemeinsam, dass sich der Luftspalt zwischen Saite und Magnet über den Arbeitshub der Kompensationseinheit ändert. Dieser Umstand muss bei der Auslegung des Systems berücksichtigt werden. Als größter Abstand lässt sich aus den Abmessungen der Gesamtkonstruktion ein Luftspalt von 2,5 mm errechnen, bei dem der Magnet eine ausreichende Anregung der Saite leisten muss. Die schwingenden Saiten werden auch im erweiterten Konzept durch Elektromagneten angeregt. Der im ersten Konzept verwendete Magnet ist jedoch durch die Einführung eines weiteren Freiheitsgrades je Saite nicht mehr verwendbar. Einerseits ist wegen der Verdopplung der Funktionsdichte im gleichen Bauraum nicht mehr ausreichend Platz vorhanden, andererseits ist durch den Magnet eine stets senkrechte Anregung der Saite zu gewährleisten.

Im Auslegungsprozess der piezoelektrischen Wandler, die gleichzeitig sensorisch als auch aktorisch genutzt werden, stellen die geometrischen Parameter der Keramiken die variablen Größen dar, die nach Wahl einer geeigneten Keramik zu bestimmen sind [1]. Insgesamt ist dabei ein ausreichend hohes sensorisches Signal zu erreichen, wobei auch die projektierte aktorische Längung der Wandler erreicht werden muss. Über Variation der geometrischen Parameter – in Kombination mit der konservativen Abschätzung einer realisierbaren Verstärkertechnik – gilt es, die maximale Betriebsspannung abzusenken. Für die Darstellung der aktorischen Funktion ist insbesondere die Einhaltung des zu Verfügung stehenden Bauraums als limitierender Faktor zu nennen. Dieser ist im vorliegenden Fall durch die umgebende Konstruktion begrenzt. Somit wird zu Beginn der spannungsreduzierten Auslegung die Wandlerfläche ausgewählt. Auf der sensorischen Seite hingegen ist bei gewähltem Durchmesser die Plattendicke entscheidend. Sie muss so groß gewählt werden, dass die in der Regelungselektronik verarbeiteten Spannungen in ausreichender Güte vorliegen.

Für den Einsatz des vorgestellten Konzepts der biegesteifen adaptiven Strebe stellt sich überdies die Frage, wie viele Streben in eine Maschine integriert werden müssen, um die Kompensation geometrischer Maschinenfehler darzustellen. Mit Hilfe der Mehrkörpersimulation sind dazu Unter-

suchungen notwendig, mit denen die Frequenzantwort der Beispielmachine ermittelt wird. Unter Variation der Bearbeitungsaufgabe lassen sich damit die optimale Position und die Anzahl der erforderlichen Streben bestimmen.

3 Optimierte magnetische Anregung

Die für die Anregung der Saiten erforderlichen Elektromagnete stellen im Gesamtkonzept ein wesentliches Glied für die Funktionsfähigkeit der adaptiven biegesteifen Strebe dar. Neben der Forderung, das am jeweiligen piezoelektrischen Wandler gemessene Spannungssignal phasenrichtig zurück zu koppeln, ist insbesondere die senkrechte Anregung der Saiten erforderlich, um einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Wandlersignal und Längenänderung zu gewährleisten.

Im vorliegenden Konzept muss hierzu die Verlagerung der Saiten Berücksichtigung finden. Ebenso ist der veränderliche, magnetisch wirksame Luftspalt über den Arbeitshub der Wandler in die Auslegung der elektromagnetischen Anregung einzubeziehen.

Eine Analyse des im ersten Konzept verwendeten Magneten zeigt, dass die Saite als Anker im magnetischen Kreis einen sehr geringen Anteil am magnetischen Flussweg hat. Zudem ist außerhalb des Arbeitsluftspalts eine weitere, größere Strecke ohne Eisenschluss zu überbrücken. Aus diesem Grund kann bereits festgehalten werden, dass der relativ große Bauraum des Magneten aus der nicht optimalen Flussführung resultiert. Eine Drehung des Konzepts um 90° hingegen bewirkt eine deutliche Reduzierung der magnetischen Widerstände, sodass sich damit eine kleine Bauform erreichen lässt.

Die in Bild 1 dargestellte Verkipfung der Saite zur Strebenachse erfordert eine weitere Veränderung des magnetischen Aufbaus. Nach [2] stellt sich die Kraftwirkung eines Elektromagneten stets senkrecht zu den Feldlinien ein. Im Fall der seitlichen Verkipfung einer Saite ist also zu gewährleisten, dass auch in diesem Betriebsfall die Feldlinien senkrecht auf die Saite treffen. Ausgehend von der ursprünglich kreisförmigen Gestalt der Magnetspule wird dies erreicht, indem zu einer quaderartigen Wicklung – sowie einem entsprechend angepassten Kern – übergegangen wird. **Bild 3** zeigt neben der ersten Spule die letztlich gewählte Konfiguration zusammen mit der jeweiligen angeordneten Saite.

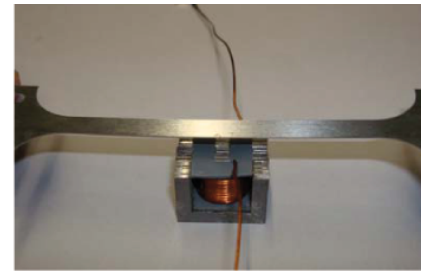
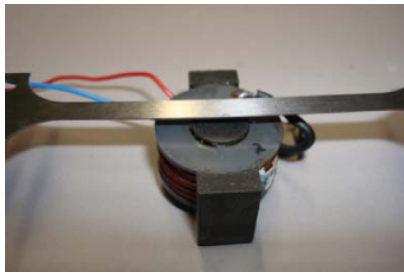


Bild 3. Elektromagnete und Lage der Saite: alter Magnet (links), neuer Magnet (rechts)

Zu erkennen ist die geblechte Ausführung des neuen Magnetkerns. Aufgrund der erhöhten Leistungsdichte muss hierbei spezielles Elektroblech verwendet werden, das eine möglichst hohe Sättigungsmagnetisierung aufweist. In [2] findet sich hierzu eine Übersicht prinzipiell verfügbarer Werkstoffe. Im konkreten Fall wird eine FeSi-Legierung eingesetzt. Die Blechdicke beträgt 0,35 mm.

Die geometrischen Abmessungen des neu entwickelten Elektromagneten erlauben den Einsatz im dafür zur Verfügung stehenden Bauraum. Speziell für das erweiterte Strebenkonzept für die Kompensation in beide Biegerichtungen wird damit das Ziel einer räumlichen Integration der funktionsrelevanten Komponenten erreicht. Für den Leistungsvergleich wurden der alte und der neue Magnet im Versuchstand zum ersten Strebenkonzept untersucht. Aufgrund des Einflusses der Messeinrichtung auf die Funktion der beiden Magnete konnte keine direkte Leistungsmessung durchgeführt werden. Vielmehr wird als Vergleichskriterium die am piezoelektrischen Wandler messbare Spannung ermittelt, welche durch die elektromagnetische Anregung der Saite erzeugt wird. **Bild 4** zeigt hierzu zwei exemplarische Messungen, die bei einem Luftspalt von 2,5 mm zwischen Magnet und Saite entstanden.

Zur Anregung wurde dabei für den ersten Magneten eine symmetrische Rechteckspannung mit $\pm 7,5V$ und für den neuen Magneten mit $\pm 2V$ als Eingangsspannung für die Leistungsverstärkung verwendet. Die Eingangsempfindlichkeit der zur Verstärkung verwendeten Endstufe, die nach dem Klasse A/B-Prinzip funktioniert (vergleiche beispielsweise [3]), wurde dabei nicht verändert. Aus den verwendeten Eingangsspannungen lässt sich schließen, dass der neue Magnet die Wandlung elektrischer Energie in magnetische Feldenergie deutlich effizienter ausführt, als dies mit dem alten Magnet möglich ist.

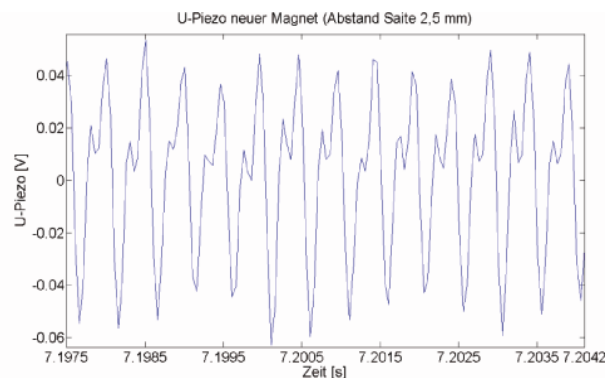
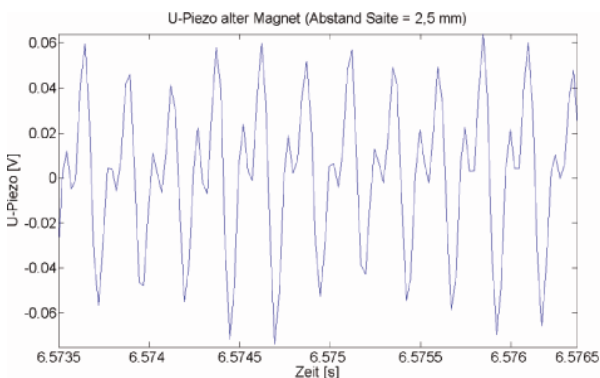


Bild 4. Spannungssignal am piezoelektrischen Wandler: alter (links) und neuer Magnet (rechts)

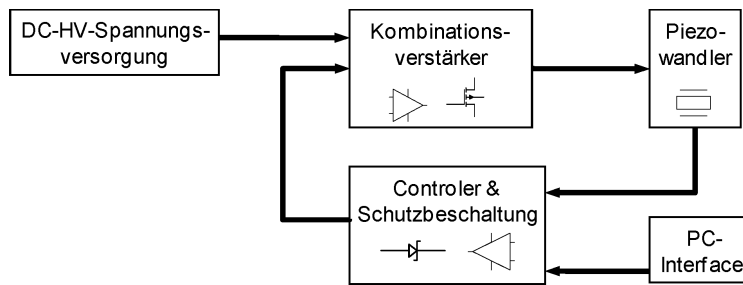


Bild 5. Blockschaltbild des kombinierten Verstärkers für sensorisch/aktorisch integrierten Betrieb der piezoelektrische Wandler

4 Arbeitssichere Auslegung des Hochspannungsteils

Für den sensorisch/aktorisch integrierten Betrieb der piezoelektrische Wandler werden Hochspannungsverstärker benötigt, die folgende Eigenschaften besitzen müssen:

- minimale Ausgangsspannung von 400 V bei 200 mA Ausgangsstrom;
- hohe Dynamik im Bereich der Betriebsfrequenzen von 2 kHz;
- geringe Verlustleistung, kleine Restwelligkeit sowie
- hoher Ausgangswiderstand des Verstärkers für eine kontinuierliche Erfassung des Sensorsignals im Aktorbetrieb.

Schaltverstärker, die aus zwei Transistor-Schaltstufen aufgebaut sind, bieten einen ausreichend hohen Ausgangswiderstand bei einfacher, kostengünstiger Realisierung sowie geringer Verlustleistung [4]. Nachteilig ist der hohe Oberwellengehalt der Ausgangsspannung. Analogverstärker besitzen hingegen eine sehr hohe Dynamik und liefern eine Ausgangsspannung hoher Güte, die übertragbare Leistung ist jedoch begrenzt. Zudem sind die Bauteilkosten sehr hoch.

Eine Lösung, beide Verstärkerarten miteinander zu verbinden, findet sich in dem in **Bild 5** gezeigten Konzept eines kombinierten Verstärkers für sensorisch-aktorisch-integrierten Betrieb der Piezowandler wieder. Der schaltende Verstärker wird dabei für das Bereitstellen der erforderlichen elektrischen Leistung genutzt, der analoge Teil für die Ansteuerung der Schalttransistoren.

Im Gegensatz zu dem bisherigen, integrierten Sensor-Aktor-Wandlerkonzept wird für den Betrieb des Wandlers mit niedriger Betriebsspannung dieser in einen sensorisch-aktorisch genutzten Bereich (l_2) sowie einen rein aktorisch betriebenen Bereich (l_3) aufgeteilt (**Bild 6**). Mit dieser Maßnahme erhöht sich die Steifigkeit des Wandlers und daraus folgernd die Dynamik des Bauelements. Darüber hinaus kann die Betriebsspannung des Wandlers signifikant herabgesetzt und somit die Arbeitssicherheit erhöht werden. Der Auslegungsprozess für dieses Wandlerkonzept gliedert sich nach [5] in drei Schritte:

a) Sensorischer Teil: Hier gilt es, gemäß Gleichung (1) das geometrische Verhältnis h zu A an die erforderliche Sensorspannung von 0,15 V/N [1] anzupassen:

$$U = -d_{33} \frac{F}{\epsilon^T} \frac{h}{A} \tag{1}$$

b) Die maximale Längung des sensorisch/aktorisch genutzten Bereiches ergibt sich im Aktorbetrieb aus den sensorischen Randbedingungen.

c) Rein aktorischer Teil: Die Anzahl n der Scheiben des Stapelwandlers ergibt sich aus der für den Betrieb notwendigen Längung z sowie der gewünschten maximalen Wandlerspannung U_{max} :

$$z_{max} = nd_{33} U_{max} \tag{2}$$

$$F_{Klemm} = \frac{d_{33}}{s_{33}^E} \frac{A}{h} U_{max} \tag{3}$$

$$c_{mech} = \frac{\Delta F}{\Delta z} = \frac{A}{h} \frac{1}{ns_{33}^E} \tag{4}$$

Mit Hilfe der erläuterten Methode wird der Wandler mit dem besonderen Fokus auf eine reduzierte Wandlerspannung ausgelegt.

Mit dem beschriebenen kombinierten Verstärkerprinzip sowie dem dargestellten Prozess zur Auslegung des Wandlers werden die erforderlichen Piezokeramiken für die Strebe sowie deren elektrische Ansteuerung ausgelegt. Ausgehend von einer maximalen Betriebsspannung (450 V) ergibt sich für den sensorischen Teil ein Verhältnis von Scheibendicke zu Durchmesser von $2,45 \cdot 10^3$. Die Klemmkraft sowie der aktorische Hub dieses Teils berechnet sich zu 7100 N und 0,2 μ m. Der größte Teil des erforderlichen Gesamthubs der Wandler von 40 μ m wird somit im rein aktorisch genutzten Bereich erzeugt.

5 Implementierung der adaptronischen Strebe in die Beispielmachine

Zur Bestimmung der optimalen Anzahl und Position der adaptronischen Streben für den Einsatz in der Beispielmachine wurde ein variables Modell der Werkzeugmaschine

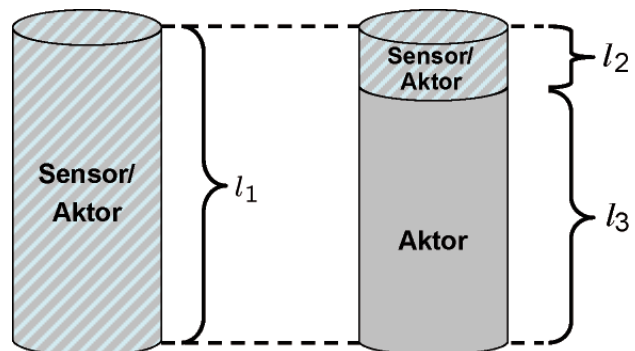


Bild 6. Aufteilung des piezoelektrischen Wandlers in zwei Bereiche

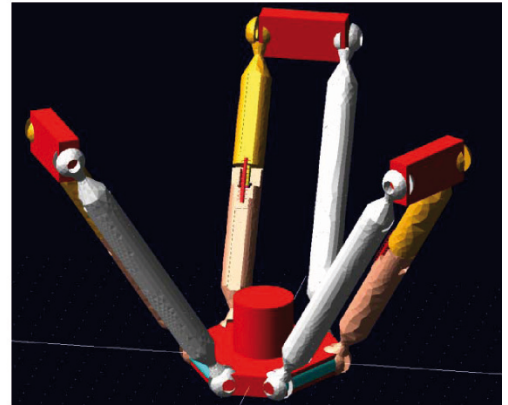
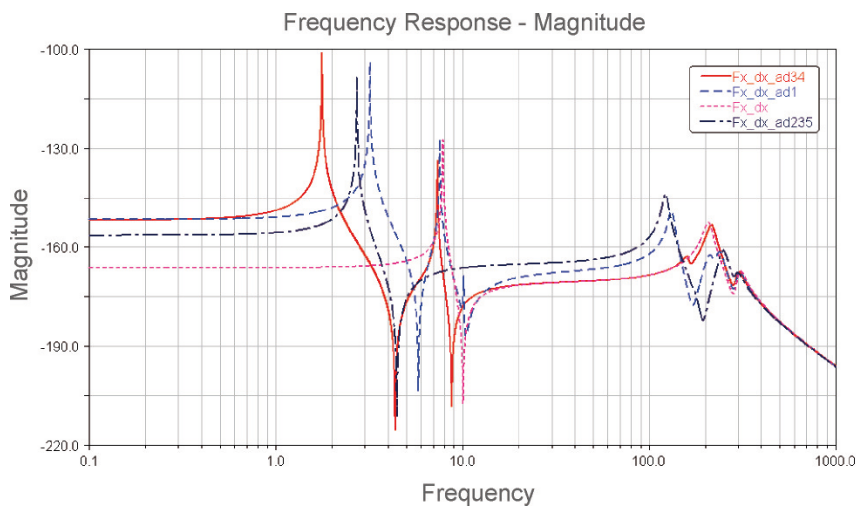


Bild 7. Frequenzantwort der Beispielmachine bei Austausch verschiedener Streben durch adaptronische Streben [6]

in MSC.Adams aufgebaut. Mit diesem wurden verschiedene simulative Untersuchungen durchgeführt. Das Modell ermöglicht dabei die Simulation unterschiedlicher Störeinflüsse wie Lastangriffe im Tool-Center-Point oder auch fertigungs- und Montagefehler.

Anhand der Frequenzantworten der Werkzeugmaschine auf vorgegebene Prozesslasten, wie **Bild 7** exemplarisch zeigt, lässt sich eine Aussage über den Einfluss der adaptronischen Streben im Einsatz in der Werkzeugmaschine auf die Position und Orientierung des Tool-Center-Points sowie auf die Steifigkeit der Werkzeugmaschine treffen. Mit diesen Ergebnissen kann bestimmt werden, welche Streben in den einzelnen Bearbeitungsprozessen und zur Kompensation der einzelnen geometrischen Fehler ausgetauscht werden müssen.

Mit Hilfe dieser Untersuchungen wird auch klar, dass höchstens drei der Streben durch adaptronische Streben auszutauschen sind, um die Gesamtsteifigkeit der Gesamtmaschine nicht negativ zu beeinflussen. Der Austausch muss dabei stets an unterschiedlichen Schlitten erfolgen.

Im Fall von drei ausgetauschten Streben lassen sich dabei Längentoleranzen der passiven Streben adaptronisch ausgleichen. Die kardanisch gelagerten Streben sind somit mit verhältnismäßig großen Toleranzen zu fertigen, was insgesamt zu einer vereinfachten Produktion der passiven Streben führt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Fachbeitrag beschreibt, wie der Aufbau einer adaptronischen biegesteifen Strebe zur Kompensation geometrischer Maschinenfehler in parallelkinematischen Werkzeugmaschinen erfolgt. Ausgehend von einem ersten Prototyp für einen Biegefreiheitsgrad wurden die erforderlichen Erweiterungen dargestellt. Mit dem Fokus auf eine stabile Anregung der schwingenden Saite wurde weiterhin die Auslegung eines geeigneten Elektromagneten gezeigt. Zusätzlich geht der Beitrag auf eine Auslegung der piezoelektrischen Wandler für minimale Betriebsspannung ein. Abschließend wurde anhand eines Simulationsmodells die optimale Anzahl adaptronischer Streben unter Berücksichtigung der Bearbeitungsaufgabe innerhalb einer Maschine bestimmt. Die beschriebenen Untersuchungen zeigen einerseits den Aufwand für den Ein-

satz einer adaptronischen Strebe auf, verdeutlichen andererseits aber auch die möglichen Vorteile des Konzepts.

Fortführende, anstehende und geplante Untersuchungen beinhalten die Umsetzung des Regelungskonzepts in der Gesamtmaschine, insbesondere in standardisierten Bearbeitungsprozessen wie Drehen oder Fräsen, sowie eine Beurteilung des gesamten Funktionsprinzips – auch im Hinblick auf den Einsatz in anderen Anwendungsgebieten.

Im Fokus weitergehender Untersuchungen steht die Erweiterung des Ansatzes zur Kompensation von Verlagerungen über den statisch/quasistatischen Bereich hinaus. Hierzu wird einerseits der direkte piezoelektrische Effekt in Kombination mit der erarbeiteten Methode genutzt, andererseits werden Phasenregelkreise zum Erhöhen der Messgeschwindigkeit des dynamischen Signals eingesetzt, sodass der Betrieb der Saite in einen Bereich höherer Frequenzen verschoben werden kann. Zum Abschluss der Arbeiten liegt somit insgesamt eine Kompensationseinheit für die im Werkzeugmaschinenbau üblichen Anregungsfrequenzen vor.

Literatur

- [1] Munzinger, C.: Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen. Universität Karlsruhe (TH), 2007
- [2] Kallenbach, E.; Eick, R.; Quendt, P.; Ströhla, T.; Feindt, K.; Kallenbach, M.: Elektromagnete. 2., überarbeitete und ergänzte Auflage. Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag 2003
- [3] Tietze, U.; Schenk, C.: Halbleiter-Schaltungstechnik. 12. Auflage. Heidelberg: Springer-Verlag 2002
- [4] Jendritza, D. J.: Piezoaktoren für den Großsignalbetrieb. Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 1995
- [5] Munzinger, C.; Weis, M.; Herder, S.: Dimensioning of multifunctional piezoelectric transducers for machine tools in consideration of minimal operating voltage. Proc. of Adaptronic Congress 2007, Göttingen
- [6] Rudolf, C.; Wauer, J.; Munzinger, C.; Weis, M.: Piezoelectric control of a machine tool with parallel kinematics; Proceedings of the SPIE, 2007