

# Modellierung einer adaptronischen Kompensationseinheit für Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematiken

Christian Rudolf\* und Jörg Wauer

Institut für Technische Mechanik, Universität Karlsruhe (TH), 76128 Karlsruhe

Bei Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematiken mit zwei bzw. drei translatorischen Freiheitsgraden sind die rotatorischen Freiheitsgrade kinematisch gesperrt. Aufgrund von Fertigungs- und Montageungenauigkeiten kommt es zu Verspannungen in der Kinematikstruktur. Daraus resultieren Verlagerungen des Werkzeug- bzw. des Werkstückhalters und die Fertigungsge-nauigkeit der Maschine und damit die Werkstückqualität werden reduziert. Der translatorische Anteil dieser Maschinenfehler kann durch die genannte Kinematikkategorie korrigiert werden, der rotatorische Anteil nur sehr begrenzt.

Durch den Einsatz kraft geregelter Piezoaktoren in den Streben sollen die rotatorischen Maschinenfehler im laufenden Betrieb korrigiert werden. Ein erster Schritt hierzu ist die Modellbildung einer beliebigen Strebe, in die ein Modell eines Piezoaktors integriert ist. Die Strebe wird am Kopfende geführt und soll am Fußende eine Kraft erfahren. Durch Analyse und Simulation können die Einflüsse verschiedener Maschinen- und Prozessparameter untersucht werden.

© 2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

## 1 Konzept der adaptronischen Strebe

Ausgehend von einer Strebe aus einer handelsüblichen Werkzeugmaschine wurde die adaptronische Strebe konzipiert. Die Originalstrebe wurde in zwei Hälften geteilt, die über ein Festkörpergelenk und eine Dehnschraube miteinander verbunden sind. Zwischen den beiden Hälften wurde eine Piezokeramik eingesetzt, die in zwei Abschnitte aufgeteilt ist, von denen der eine als Aktor und der andere als Sensor eingesetzt wird. Außen auf der Strebe wurde eine Saite montiert, deren Länge durch eine entsprechende Anpassung der Halterung modifiziert werden kann. Die Saite kann durch einen Elektromagneten in Schwingungen versetzt werden. Diese Schwingungen können von dem Piezosensor erfasst werden. Damit konnte die Messeinschränkung des Piezosensors, der keine tieffrequenten Schwingungen oder statische Signale erfassen kann, mit Hilfe des Prinzips einer Schwingensaitenwaage umgangen werden. Der prinzipielle Aufbau und die zugehörige Umsetzung sind in Abbildung 1, links, zu sehen.

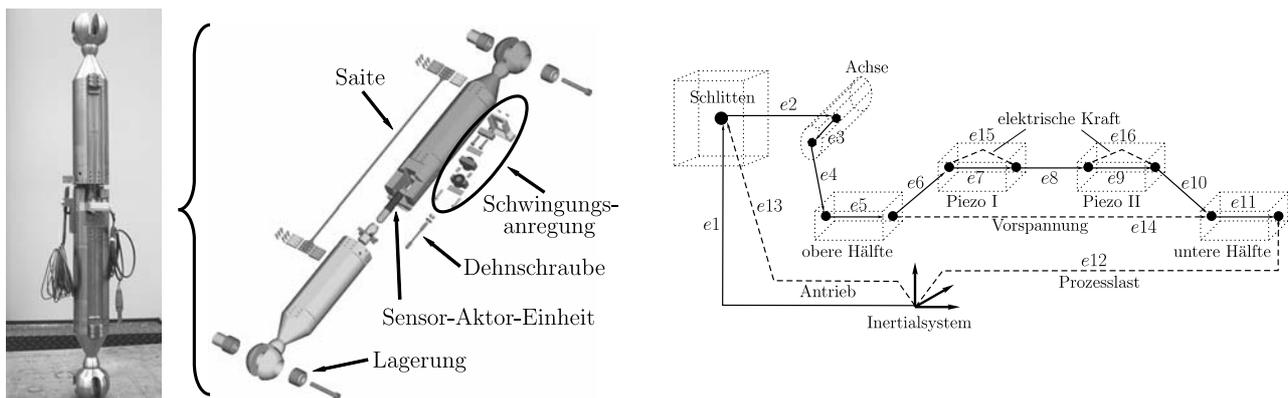


Abb. 1 Adaptronische Strebe mit Saite und Schwingungsanregung.

Linearer Graph der Strebe.

## 2 Strebenmodellierung unter Verwendung linearer Graphen

Zur Untersuchung des Bewegungsverhaltens der adaptronischen Strebe wurden mit Hilfe des Mehrkörpersystemprogramms DynaFlex [1] die Bewegungsgleichungen ermittelt. Das betrachtete System besteht aus der adaptronischen Strebe, die über ein Drehgelenk mit einer horizontalen Achse verbunden ist. Die Achse wiederum ist frei drehbar über ein Drehgelenk mit einem Schlitten verbunden, der vertikal geführt ist. Der Schlitten und die Achse werden als starre Körper angenommen, während die beiden Strebenhälften und die Piezoelemente als elastische Körper modelliert wurden. Die Saite und die Einrichtung zur

\* E-mail Address: rudolf@itm.uni-karlsruhe.de

Schwingungsanregung wurden zunächst vernachlässigt. DynaFlex benötigt als Eingabe zur Berechnung der Bewegungsgleichungen die Struktur des Mehrkörpersystems in der Form eines linearen Graphen, der in Abbildung 1, rechts, dargestellt ist. Das mechanische Verhalten jedes Körpers wurde direkt in DynaFlex berücksichtigt, die elektrischen Eigenschaften der Piezoelemente mussten jedoch zusätzlich hinzugefügt werden.

Nach [2] lassen sich mit den mechanischen Spannungen  $T_p$ , den mechanischen Verzerrungen  $S_q$ , dem elektrischen Feld  $E_k$  und den elektrischen Verschiebungen  $D_i$  piezoelektrische Wandler durch die linearen konstitutiven Gleichungen

$$T_p = c_{pq}^E S_q - e_{kp} E_k, \quad D_i = e_{iq} S_q + \varepsilon_{ik}^S E_k \quad (1)$$

darstellen. Bei der dargestellten adaptronischen Strebe beeinflussen die Piezowandler das System nur in axialer Richtung (3-Richtung). Da Stapelwandler aus  $n$  gleichen Platten eingesetzt wurden und das Verhältnis zwischen Plattendicke  $h$  und Plattendurchmesser  $d$  klein ( $h \ll d$ ) ist, können ein homogenes elektrisches Feld in axialer Richtung angenommen und Streufelder vernachlässigt werden. Weiterhin wurden Normalspannungen in den Querrichtungen, sowie Schubspannungen und Schubverformungen vernachlässigt. Damit reduzieren sich die Gleichungen (1) auf

$$T_3 = \alpha S_3 - \beta E_3, \quad D_3 = \beta S_3 + \gamma E_3 \quad (2)$$

mit den Abkürzungen

$$\alpha = \frac{1}{s_{33}^E} = \left( c_{33}^E - \frac{2(c_{13}^E)^2}{c_{11}^E + c_{12}^E} \right), \quad \beta = \frac{d_{33}}{s_{33}^E} = \left( e_{33} - \frac{2c_{13}^E e_{31}}{c_{11}^E + c_{12}^E} \right), \quad \gamma = \varepsilon_{33}^T - \frac{d_{33}^2}{s_{33}^E} = \left( \varepsilon_{33}^S - \frac{2(e_{31})^2}{c_{11}^E + c_{12}^E} \right). \quad (3)$$

Nach Berücksichtigung der Definitionen  $T_3 = \frac{F}{A}$ ,  $S_3 = \frac{\Delta l}{l}$ ,  $E_3 = n \frac{U}{l}$  wird aus Gleichung (2)

$$F = \underbrace{\alpha \frac{A}{l} \Delta l}_{F_{mech}} - n \underbrace{\beta \frac{A}{l} U}_{F_{el}}. \quad (4)$$

Die Kraft des Piezowandlers auf die Strebe lässt sich nach Gleichung (4) in einen mechanischen Anteil und einen elektrischen Anteil unterscheiden. Der mechanische Anteil wurde von DynaFlex direkt bei der Modellierung als flexibler Körper berücksichtigt, der elektrische Anteil wurde als additive Kraft noch zusätzlich integriert.

Für den Einsatz als Aktor kann direkt Gleichung (4) angewandt werden. Für die Anwendung eines piezoelektrischen Wandlers als Sensor wurde angenommen, dass die anliegenden Elektroden ideal isoliert sind und keine Leckströme auftreten. Damit verschwinden die Oberflächenladungsdichte und die elektrische Verschiebung:  $\sigma = D_3 = \frac{Q}{A} = 0$ . Die gesamte Wandlerkraft für einen Einsatz als Sensor ergibt sich damit und mit den Steifigkeiten  $c_{mech}$  und  $c_{el}$  zu

$$F = \underbrace{\alpha \frac{A}{l} \Delta l}_{F_{mech}} + \underbrace{\frac{A}{l} \frac{\beta^2}{\gamma} \Delta l}_{F_{el}} = c_{mech} \Delta l + c_{el} \Delta l. \quad (5)$$

Die Bewegungsgleichungen wurden von DynaFlex in der Form

$$\mathbf{M}(\underline{q}) \cdot \ddot{\underline{q}} = \mathbf{F}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}, t) \quad (6)$$

erzeugt. Die Validierung des Modells erfolgte über den Vergleich verschiedener Simulationsergebnisse des Modells mit den Simulationsergebnissen eines vergleichbaren Modells des kommerziellen Mehrkörperprogramms ADAMS.

Die aus dem Modell gewonnenen Bewegungsgleichungen (6) bilden einen geeigneten Ausgangspunkt für nachfolgende Arbeiten, wie z.B. die Entwicklung eines Regelungskonzeptes für die adaptronische Strebe, Untersuchungen bei dreidimensionalen Bewegungen und die Integration einer einzelnen Strebe in ein Modell der gesamten Werkzeugmaschine.

**Danksagung** Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgesellschaft für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1156 "Adaptronik in Werkzeugmaschinen".

## Literatur

- [1] Shi, P. und McPhee, J., 2002. *DynaFlex User's Guide*. Systems Design Engineering, University of Waterloo. Siehe auch URL: <http://real.uwaterloo.ca/~dynaflex>.
- [2] Tiersten, H. F., 1969. *Linear Piezoelectric Plate Vibrations*. Plenum Press.