



## **Ansätze zur adaptronischen Kompensation geometrischer Maschinenfehler (\*)**

**Autoren:** *Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer, Institut für Produktionstechnik (wbk), Universität Karlsruhe*  
*Christian Munzinger, Andreas Knödel*

*Prof. Dr.-Ing. Jörg Wauer, Institut für Technische Mechanik (itm), Universität Karlsruhe*  
*Christian Rudolf*

Die mechanische Steifigkeit und die Fertigungsgenauigkeit von Maschinenkomponenten beeinflussen die geometrische Genauigkeit von Werkzeugmaschinen maßgeblich, da Prozesslasten und Fehler von Maschinenkomponenten oder Führungen im Betrieb Verlagerungen des Tool-Center-Points bewirken. Eine Steigerung der Herstellgenauigkeit der Komponenten einer Werkzeugmaschine ist in vielen Fällen entweder aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll oder aber technologisch nicht darstellbar. Deswegen bietet es sich an, über eine Kompensation von Verlagerungen durch intelligente Maschinenkomponenten nachzudenken. Hier setzen zwei im DFG-Schwerpunktprogramm 1156 „Adaptronik für Werkzeugmaschinen“ geförderte Projekte der Universität Karlsruhe an. Zum Einen wird die Kompensation von Führungsfehlern bei einer hydrostatischen Führung durch einen gezielten Eingriff in das regelungstechnische Verhalten beschrieben. Daneben wird am Beispiel einer adaptronischen Strebe für Parallelkinematiken eine Möglichkeit zur adaptronischen Kompensation von Komponentenfehlern und zur Steigerung der Steifigkeit vorgestellt. Hierbei ist speziell die Kompensation von statischen und quasistatischen Verlagerungen durch Piezowandler als besondere technologische Herausforderung zu sehen. Der im Rahmen des Artikels vorgestellte Ansatz nutzt, ähnlich der etablierten Technologie von Schwingsaiten-Waagen, die zu Schwingungen angeregte Vorspannung des piezoelektrischen Wandlers zur Ableitung von Kraft- bzw. Weginformationen für die Ausgleichsbewegung. Durch die sich ergebende Sensor-Aktor-Integration können in aktiv gesteuerten Maschinenkomponenten bisher zusätzlich vorhandene Messsysteme eliminiert werden, was mit einer deutlichen Kostensenkung und einer Steigerung der Verfügbarkeit einher geht. Auf dem vorgestellten Ansatz aufbauend, wurde ein erster Prototyp einer adaptronischen Strebe konzipiert, konstruiert und umgesetzt. Dieser wird im Rahmen des Artikels zusammen mit den bisherigen Untersuchungsergebnissen vorgestellt und erläutert.

### **Aktive Maschinenkomponenten versprechen große technologische Potenziale**

Zu den zentralen Einflussfaktoren auf die geometrische Genauigkeit von Werkzeugmaschinen zählen die mechanische Steifigkeit und die Fertigungsgenauigkeit der Komponenten. Prozesslasten und Fehler von Maschinenkomponenten oder Führungen bewirken im Betrieb Verlagerungen des Tool-Center-Points, was die Arbeitsgenauigkeit einer Werkzeugmaschine negativ beeinflusst. Da eine Steigerung der Herstellgenauigkeit der Komponenten einer Werkzeugmaschine in vielen Fällen entweder aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll oder aber technologisch nicht darstellbar ist, bietet es sich an, über den aktiven Ausgleich durch intelligente Maschinenkomponenten nachzudenken.

### **Industrieller Einsatz nur bei Verbesserung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses**

Die technischen Potenziale von aktiven Komponenten sind dabei mit Sicherheit unstrittig. Hinsichtlich des industriellen Einsatzes muss jedoch den Kosten eine besondere Bedeutung zugemessen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei aktiven Ansätzen neben den erforderlichen Aktoren zusätzliche Messsysteme für den Aufbau von geschlossenen Regelkreisen erforderlich sind, was die Gesamtkosten für die eigentliche technische Funktionalität negativ beeinflusst. Zusätzlich zum finanziellen Aufwand für die Messsysteme entstehen Kosten für die Ansteuerung der Messsysteme und die Ansteuerung der piezoelektrischen Wandler. Insgesamt betrachtet stehen Aufwand und Nutzen in einem ungünstigen Verhältnis, was in den meisten Fällen im Werkzeugmaschinenbau

gegen den Einsatz einer aktiven Kompensation spricht. Analysiert man die Gesamtkosten, so wird ersichtlich, dass sich die Kosten für die Aktorik inklusive Ansteuerung und die Kosten für die Messtechnik inklusive Ansteuerung die Waage halten. Wenn es möglich wäre den Kostenfaktor „Messtechnik“ komplett zu streichen, so würde sich das Verhältnis von Aufwand zu technischem Nutzen erheblich verbessern. Aktive Komponenten wären somit in breiten Anwendungsfeldern wirtschaftlich.

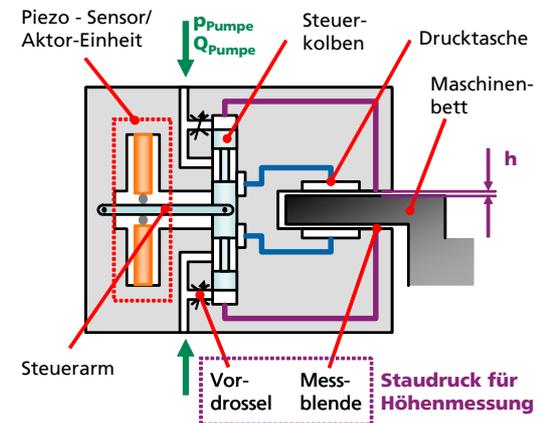
### Adaptronische Ansätze versprechen Verbesserung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses

Hier setzt das Institut für Produktionstechnik (wbk) an der Universität Karlsruhe bei seinen Arbeiten an. Ziel ist es, Ansätze zu identifizieren, die es durch die Ausnutzung des adaptronischen Grundgedankens, entsprechend der Definition des DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.), ermöglichen, technologische Funktionalitäten darzustellen, die bisher nicht oder nur bei inakzeptabel hohen Kosten umsetzbar waren [Den-04]. Der Fokus der Arbeiten richtet sich dabei auf die Identifikation des Konzepts für die adaptronische Lösung und die Umsetzung in eine prototypische Realisierung, wobei die eigentliche Herausforderung in der Identifikation eines Lösungskonzepts zu sehen ist. So arbeitet das Institut für Produktionstechnik einerseits gemeinsam mit dem Institut für Technische Mechanik an einer Strebe für parallele Kinematikstrukturen, welche statische und quasistatische externe Lasten mit piezoelektrischen Wandlern kompensieren kann. Andererseits wird im Bereich der Führungen für Werkzeugmaschinen an einer hydrostatischen Schlittenführung geforscht, die eine intelligente und im Betrieb frei beeinflussbare Niveauregulierung ermöglicht.

### Adaptronische hydrostatische Führung ermöglicht intelligente Niveauregulierung

Hydrostatische Führungen zeichnen sich durch eine hohe Genauigkeit, Steifigkeit und Dämpfung aus. Durch Zusatzsysteme wie Membrandrosseln oder Ringnuthülsen kann die Steifigkeit hydrostatischer Führungen deutlich gesteigert werden. Diese in der Praxis vorkommenden, meist mechanischen Systeme können jedoch nur Lastschwankungen ausgleichen, deren Ursache Prozess- und Störkräfte sind. Weiterhin ist ein Eingriff in das Reglerverhalten während dem Betrieb nicht möglich. Zukünftige Systeme müssen daher die Möglichkeit bieten, flexibel an eine Führungsaufgabe angepasst zu werden und während des Betriebs selbstständig auf Änderungen der Umgebungsbe-

dingungen reagieren. Hieraus leitet sich einerseits das Ziel ab, Prozess- und Störgrößen direkt an der Drucktasche zu kompensieren und die geometrische Genauigkeit der Werkzeugmaschine zu erhöhen. Andererseits muss auch die Möglichkeit gegeben sein, Steuerfunktionen aus der übergeordneten Werkzeugmaschinensteuerung in das System zu integrieren, um damit zum Beispiel Führungsbahnfehler auszugleichen.



**Bild 1:** Adaptronische Drucktascheneinheit basierend auf Funktionsprinzip Servoventil mit Staudruckmessung für die Höhenlage

### Prinzip des Servoventils ermöglicht adaptronischen Ansatz

Aufbauend auf dem Funktionsprinzip eines Servoventils wurde eine hydrostatische Drucktascheneinheit mit integrierter Sensor/Aktor-Einheit entwickelt, die schematisch in Bild 1 dargestellt ist. Wesentlich ist dabei die Art der Auslenkung des Ventil- oder Steuerkolbens. Die im Servoventil vorhandene Vorstufe aus Torquemotor und Prallplatte wird hier durch die Aktor-Sensor-Einheit und den Steuerarm ersetzt. Der Aufbau ist analog dem Servoventil symmetrisch, wodurch ein konstruktionsbedingter Druckausgleich in der hydraulischen Zuführung am Steuerkolben erreicht wird. Zur Erfassung der Höhenlage wird das aus der Pneumatik bekannte Messprinzip einer Staudruckmessung verwendet. Durch die Funktionstrennung zwischen Führungsfunktion und Regelkreis ermöglicht das System die belastungsunabhängige Erfassung der Höhenlage:

1. Die Drucktasche übernimmt ausschließlich den Lastausgleich und beschränkt sich in ihrer Aufgabe auf die Führungsfunktion.
2. Die Staudruckmessung misst die Höhenlage direkt am Spalt in Form einer Druckänderung und führt diese dem Regelkreis über den Steuerkolben zu.

Die Drucktasche kann aufgrund der Funktionstrennung ideal an die Führungsaufgabe (Belastungsfall) angepasst werden, da Flächenverhältnisse auf den Regelkreis keinen Einfluss haben.

Die bei einer hydrostatischen Führung geforderte Fail-Safe-Funktion ist garantiert, da die Drucktascheneinheit bei einem Ausfall des Regelkreises ähnlich einer hydrostatischen Führung nach dem Wirkprinzip „eine gemeinsame Pumpe mit lastabhängiger Vordrossel“ den Volumenstrom in den beiden Taschen steuert. Der Steuerarm orientiert sich bei spannungslosen Piezowandlern in seiner Nulllage und kann abhängig vom Differenzdruck der Staudruckmessung entsprechend der mechanischen Nachgiebigkeit der Piezowandler den Volumenstrom eingeschränkt steuern. Durch dieses Verhalten ist ein sicheres Abfangen des Führungsschlittens ohne Anlaufen möglich.

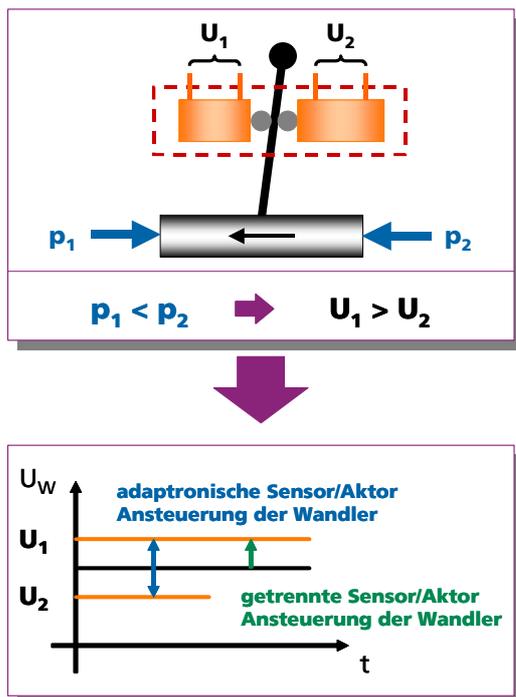


Bild 2: Wirkprinzip der adaptronischen Drucktascheneinheit

### Trennung von Sensor- und Aktorsignal über eine Brückenschaltung

Das Konzept der adaptronischen hydrostatischen Drucktascheneinheit zeichnet sich vor allem durch eine einfache Möglichkeit zur Sensor-Aktor-Integration bei gleichzeitiger Trennung des Sensor- und Aktorsignals aus. Die Sensor-Aktor-Einheit setzt sich aus zwei Piezowandlern zusammen. Das Wirkprinzip der adaptronischen Drucktascheneinheit ist vereinfacht in Bild 2 dargestellt. Das aus der Staudruckmessung resultierende Kraftsignal wird über das Hebelverhältnis des Steuerarms verstärkt und als Spannungsunterschied auf beide Wandler abgebildet. Durch eine Brückenschaltung kann das Sensorsignal sehr einfach detektiert und ausgewertet werden. Damit kann die geforderte Trennung der Spannungssignale von Aktor und Sensor bei kombinierter Ansteuerung ermöglicht werden.

### Adaptronischer Führungsschlitten erfordert vier Drucktaschen

Mit Blick auf das Gesamtsystem einer hydrostatischen Führung kann ein adaptronischer Führungsschlitten aufgebaut werden, der im Sinne einer intelligenten Niveauregulierung eine konstante Höhenlage des Schlittens durch Kooperation der einzelnen adaptronischen Drucktascheneinheiten ermöglicht. Bezogen auf den Schlitten bedeutet das im Einzelnen den Ausgleich von Führungsbahnfehlern und die Kompensation von Verkipfungen, deren Ursache Prozess- und Störkräfte sind.

### Adaptronische Strebe zur Kompensation von geometrischen Fehlern in Parallelkinematiken

Wie bereits erwähnt, arbeitet das Institut für Produktionstechnik (wbk) zusätzlich zur hydrostatischen Führung an einer adaptronischen Strebe für Parallelkinematiken. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Technische Mechanik (itm) wird das Ziel verfolgt einen Ausgleich von geometrischen Fertigungstoleranzen und eine adaptronische Steifigkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen im statischen und quasistatischen Bereich zu erzielen [Rud-05]. Das adaptronische Lösungskonzept wird dabei am Beispiel einer Strebenstruktur für Parallelkinematiken entwickelt und umgesetzt, ist jedoch prinzipiell auf alle anderen Strukturen im Werkzeugmaschinenbau übertragbar. Die technische Anforderung an die Strebe ist einerseits die Messung einer Lastkraft- bzw. Längenänderung und andererseits das Ausführen einer Korrekturbewegung.

### Adaptronischer Ansatz aus dem Prinzip einer Schwingsaitenwaage

Wie bereits erwähnt, ist bei adaptronischen Systemen das Funktionsprinzip bzw. das Lösungskonzept von entscheidender Bedeutung. Das für die Umsetzung genutzte Prinzip der adaptronischen Strebe lässt sich hier am Einfachsten an Hand eines Kinderspielzeugs erläutern. Wenn man einen gewöhnlichen Plastikeimer auf den Boden stellt, einen Besenstiel daran befestigt und ein Gummiband zwischen Eimer und oberem Ende des Besenstiels spannt, so kann man durch ein Anzupfen des Gummibands Töne erzeugen. Die Tonlage ist dabei von der Spannung des Gummibands abhängig und kann praktisch beliebig variiert werden. Das gleiche Funktionsprinzip findet natürlich auch im technischen Umfeld Anwendung. Ein Beispiel dafür sind Schwingsaitenwaagen. Hier wird die Frequenzänderung einer gespannten Saite als Maß für eine Kraft- bzw. eine Längenänderung genutzt [Fle-05].

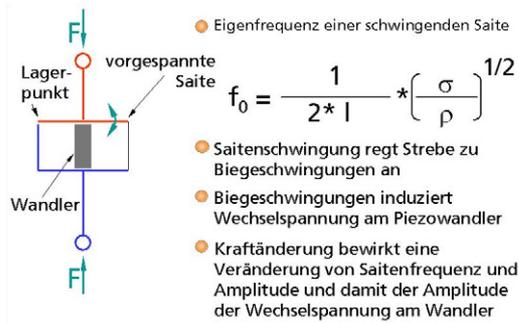


Bild 3: Konzept der adaptronischen Strebe

Dieses Prinzip lässt sich auch für eine adaptronische Strebe nutzen. Wird eine Strebenstruktur in zwei gleiche Hälften geteilt, dazwischen ein piezoelektrischer Wandler platziert, über eine Saite vorgespannt und die Saite zu Schwingungen angeregt, so entsteht eine mechanische Struktur, die gleichzeitig Kräfte bzw. Wege messen und Wege stellen kann, wie Bild 3 verdeutlicht. Dabei werden für den Aufbau des adaptronischen Systems die speziellen Eigenschaften piezoelektrischer Wandler genutzt. Einerseits erzeugt eine extern auf einen Piezokristall aufgebrachte Last eine elektrische Spannung. Andererseits lässt sich durch Anlegen einer elektrischen Spannung eine Längenänderung des Kristalls erzeugen. Innerhalb des adaptronischen Systems regt die Schwingung der Saite die Strebe zu Biegeschwingungen an. Diese Biegeschwingung überträgt sich auf den Piezokristall und erzeugt eine sinusförmige Wechselspannung. Wird die Strebenstruktur einer statischen bzw. quasistatischen externen Last ausgesetzt, so ändert sich die Saitenspannung und damit die Frequenz der Schwingung bzw. der Wechselspannung. Über die Bestimmung der Frequenz der Wechselspannung ist eine Kraftinformation direkt ableitbar und die aus der externen Last resultierenden Deformationen lassen sich durch das Anlegen einer Gleichspannung an den Piezokristall ausgleichen. Bild 4 erläutert hierzu nochmals die adaptronische Sensor-Aktor-Integration.

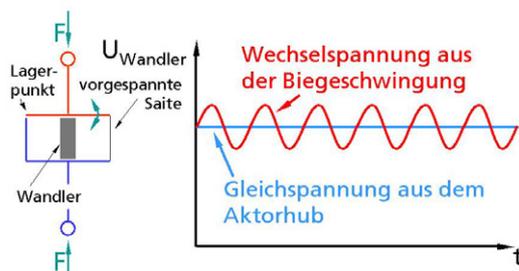


Bild 4: Sensor-Aktor-Integration

In Analogie zu den Arbeiten zum adaptronischen hydrostatischen Führungssystem ergibt sich auch in diesem Fall eine einfache Möglichkeit zur Trennung des Sensorsignals vom Aktorsignal. Wegen der deutlich variierenden Frequenzbereiche der beiden Signalanteile kann die Trennung

über einen Hochpass oder einen Resonanzfilter umgesetzt werden.

## Technologische und wirtschaftliche Potenziale der adaptronischen Strebe

Von dem erläuterten Funktionsprinzip der Strebe lässt sich ein breites Spektrum an technologischen Potenzialen ableiten, wobei diese praktisch uneingeschränkt für serielle oder parallele Kinematikstrukturen gelten. Zunächst ist hierzu der Ausgleich von statischen und quasistatischen Lasten mit piezoelektrischen Wandlern zu nennen. Hierbei ist besonders hervor zu heben, dass wegen der Transformation von externen statischen Lasten in dynamische Lasten für den piezoelektrischen Wandler die darstellbare Zeitkonstante der Strebe unabhängig vom Werkstoff des Wandlers und der Ansteuerung ist. Die physikalisch bedingten, begrenzten Zeitkonstanten piezoelektrischer Werkstoffe werden dabei elegant umgangen. Zusätzlich dazu wird das System über die Maßverkörperung in Form einer schwingenden Saite in einem geschlossenen Regelkreis betrieben. Dies ermöglicht die vereinfachte Auslegung des Systems über linearisierte Wandlergleichungen. Für den Betrieb des Systems sind in logischer Konsequenz für die Stellbewegung in erster Näherung keine aufwändigen Drift- oder Hysteresekompensationen erforderlich. Natürlich muss hier auch eine eventuellen Drift der schwingenden Saite aus Temperaturänderungen berücksichtigt werden, wobei sich derartige Effekte konstruktiv bedingt, nach der Aufwärmphase der Maschinenteknik, weitgehend automatisch erfasst und ausgeglichen werden. Darüber hinaus bietet die Technologie das Potenzial, die erste Eigenfrequenz um bis zu einem Faktor vier gegenüber einer passiven Strebenstruktur anzuheben. Speziell dieser Sachverhalt macht die Technologie für die Konzeption von verbesserten Werkzeugmaschinen interessant, da insgesamt das statische, quasistatische und dynamische Verhalten verbessert werden kann. Somit wird es erstmals denkbar, Ansätze zur wirkstellennahen Positionsmessung bei Werkzeugmaschinen, wie in [Fle-03] dargestellt, technologisch umzusetzen. Neben den rein technologischen Potenzialen sollte jedoch auch dem wirtschaftlichen Potenzial des Ansatzes und seiner Übertragbarkeit in andere Anwendungsbereiche Beachtung geschenkt werden. Da piezoelektrische Wandler in Stapelbauform prinzipbedingt nur kleine Zugkräfte aufnehmen können, werden sie im realen Einsatz über einen Mechanismus vorgespannt. Im Falle des erläuterten Ansatzes übernimmt die schwingende Saite neben der Funktion der Maßverkörperung die Funktion der Vorspannung. Die schwingende Saite stellt somit keinen zusätzlichen konstruktiven Aufwand dar und ermöglicht die vollständige Ausschöpfung des wirtschaftlichen Einsparpoten-

zials aus der Eliminierung der bisher zusätzlich erforderlichen Messtechnik. Gleichzeitig wird aber auch die Adaptierbarkeit in andere Anwendungsbereiche ersichtlich, da sich der verfolgte Ansatz zwar im Funktionsprinzip, nicht aber in der konstruktiven Ausgestaltung, von bisherigen Ansätzen unterscheidet.

### Prototypische konstruktive Umsetzung ergibt Abstimmung des Systems als Herausforderung

Auf dem erläuterten Funktionsprinzip aufbauend, wurde eine erste prototypische Realisierung einer adaptronischen Strebe am Institut für Produktionstechnik (wbk) umgesetzt. Ausgehend von ersten Dimensionierungen zeigte sich, dass für eine ausreichende Kraft- bzw. Wegauflösung der Strebe eine möglichst hohe Saitenfrequenz erreicht werden muss. Die rechnerische Frequenz für eine Auflösung von  $\pm 0,5 \mu\text{m}$  ergab sich dabei zu ca. 2000 Hz. Unter Berücksichtigung einer externen Last von  $\pm 2000 \text{ N}$  bzw. einem Stellweg von  $\pm 20 \mu\text{m}$  für den Ausgleich von Komponentenfehlern wurde ein rechnerisches Frequenzband von 1500 – 2500 Hz für den Betrieb der Strebe ermittelt. Einerseits zeigt die hohe Betriebsfrequenz klar auf, dass eine Werkzeugmaschinenstruktur nicht negativ durch die Biegeschwingung der Strebe beeinflusst wird. Andererseits ist aber auch sofort eine der Herausforderungen des sonst sehr einfach anmutenden Systems zu erkennen. Da die erste Eigenfrequenz einer passiven Strebe deutlich unterhalb von 500 Hz liegt, muss die adaptronische Strebe so ausgestaltet werden, dass trotz der hohen Betriebsfrequenz noch eine sichere Erfassung der Saitenschwingung durch den Piezosensor gewährleistet ist. Aus diesem Grunde wurde bei der konstruktiven Ausgestaltung auf die Verminderung der Schnittstellenanzahl und eine Stick-Slip-freie Kopplung der beiden Strebenteile geachtet, wie das nachfolgende Bild 5 verdeutlicht.

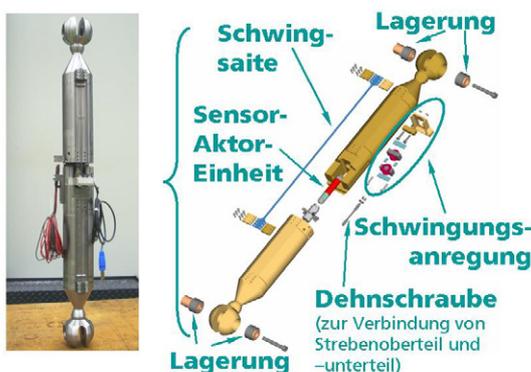


Bild 5: gefertigter Prototyp und Explosionsdarstellung der Strebe

### Rückkopplung ermöglicht stabile Schwingungsanregung

Im Anschluss an die konstruktive Umsetzung musste ein erstes Konzept für die erforderliche Regelungstechnik ausgearbeitet werden. Eine hierzu durchgeführte Analyse des Systems ergibt drei zentrale Aufgaben. Zunächst muss die Saite bzw. Vorspannung zu Schwingungen angeregt werden und über den gesamten Wandlerhub stabil in der Schwingung gehalten werden. Die zweite zentrale Aufgabe bei der Entwicklung der Regelungstechnik ist in der Bestimmung der Frequenz der Saitenschwingung zu sehen. Die wesentliche Herausforderung besteht dabei in der Identifikation eines Lösungsprinzips, welches eine hohe Abtastrate und damit eine gute Regeldynamik ermöglicht. Parallel dazu ist der eigentliche Regler für die aktuatorische Stellbewegung zu konzipieren. Da die Maßverkörperung in Form einer schwingenden Saite den Betrieb des Systems in einem geschlossenen Regelkreis ermöglicht, kann im ersten Ansatz für die Regelung der Stellbewegung ein konventioneller PI-Regler genutzt werden. Zur Schwingungsanregung der Saite bietet sich aus Gründen der Stabilität das Prinzip der Rückkopplung an. In Analogie zu Rückkopplungseffekten im Audiobereich kann das am piezoelektrischen Wandler erfasste Sensorsignal nach der Filterung sowie dem Ausgleich von Phasenverschiebungen und Interferenzerscheinungen über einen kommerziell erhältlichen HiFi-Verstärker direkt auf die elektromagnetische Anregung der Saite zurück gekoppelt werden. Einer der Vorteile dieses Lösungsansatzes ist, wie erwähnt, in der Stabilität der Anregung zu sehen. Da Rückkopplungen durch Impulse angeregt werden, nehmen prinzipbedingt auch massive externe Störungen praktisch keinen Einfluss mehr auf die Saitenschwingung. Zusätzlich wird eine stabile Resonanzschwingung der Saite in ihrer tiefsten Eigenfrequenz angeregt, was sich in den später erläuterten messtechnischen Untersuchungen in einer automatischen Maximierung des Sensorsignals niederschlägt. Im letzten Schritt der Reglerentwicklung wurden verschiedene Möglichkeiten zur Frequenzbestimmung untersucht. Hierbei erfolgte die vergleichende Gegenüberstellung der Methode der Fouriertransformation mit den Methoden der Bestimmung der Periodendauer und der Frequenzzählung. Da die Bestimmung der Periodendauer in Verbindung mit einer möglichen Frequenzmodulierung des Sensorsignals die größten Potenziale hinsichtlich Abtastrate, Ansprechzeit und Genauigkeit verspricht, wurden hierzu entsprechende Strukturen ausgearbeitet und in der Gesamtreglerstruktur implementiert.

## Messtechnische Untersuchungen zeigen Funktionsfähigkeit des Ansatzes

Mit der umgesetzten Reglerstruktur und dem gefertigten Prototypen der Strebe konnten bereits erste Messungen zur Validierung des Ansatzes durchgeführt werden. Die Sensor- und die Aktorfunktion waren zwar räumlich integriert, aber aus Gründen der Unfallsicherheit noch funktional getrennt. Insgesamt konnte jedoch nachgewiesen werden, dass die Strebenstruktur prinzipiell funktionsfähig ist. Die ersten Versuche ergaben eine mittlere Schwingfrequenz der Saite von ca. 1850 Hz, welche klar über den Piezowandler erfasst werden kann. Über den Gesamthub des Piezowandlers wurde eine Frequenzänderung von ca. 260 Hz ermittelt. Bild 6 gibt hierzu das Betriebsspannung-Hub- bzw. das Hub-Frequenz-Diagramm des dabei aufgenommenen und fouriertransformierten Sensorsignals wieder. Entsprechend dem aktuellen Stand des Regelungskonzepts ist mit der Strebe eine Auflösung von ca. 1  $\mu\text{m}$  darstellbar. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die genannte Auflösung wegen der erzielbaren Taktrate von der eingesetzten Steuerungsprototyping-Hardware und nicht vom Funktionsprinzip der Strebe limitiert wird.

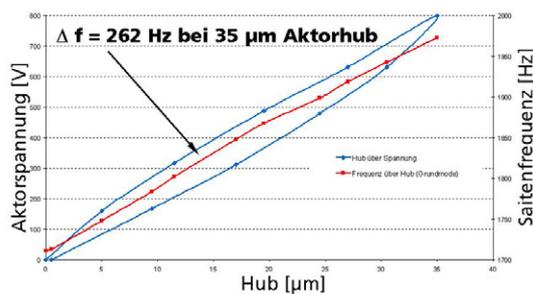


Bild 6: Messung der Frequenzänderung über dem Wandlerhub

## Zusammenfassung und Ausblick

Die aktive Kompensation von geometrischen Abweichungen bietet große Potenziale die Arbeitsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen zu steigern. Bisher konnten sich derartige Ansätze jedoch aus Kostengründen nicht etablieren. Adaptronische Systeme bieten wegen der Möglichkeit zur funktionalen Integration einzelner Komponenten erhebliche Potenziale, technische Funktionen bei vergleichsweise günstigen Kosten im Werkzeugmaschinenbau zu etablieren. Allerdings liegen auch die Herausforderungen klar auf der Hand, da für ein adaptronisches System die Identifikation des Lösungsansatzes von zentraler Bedeutung ist.

Das Institut für Produktionstechnik (wbk) arbeitet an zwei Projekten, die sich auf den Bereich der Führungssysteme und der Struktur von Werkzeugmaschinen konzentrieren. Im Bereich der

Führungssysteme wird unter der Ausnutzung des Funktionsprinzips eines Servoventils ein hydrostatischer Schlitten umgesetzt, welcher eine gezielte, extern beeinflussbare, Niveauregulierung ermöglicht.

Parallel dazu beschäftigt sich das wbk in Zusammenarbeit mit dem Institut für Technische Mechanik (itm) mit der adaptronischen Kompensation von geometrischen Maschinenfehlern und Verlagerungen aus Prozesslasten. Am Beispiel einer Strebe für Parallelkinematiken wird eine Technologie erarbeitet, welche über die Ausnutzung einer Maßverkörperung in Form einer schwingenden Saite eine adaptronische Kompensation ermöglicht. Neben den aus der Einsparung zusätzlicher Messtechnik resultierenden, günstigen Gesamtkosten der Technologie, weist der Ansatz Vorteile wie beispielsweise eine einfache Auslegung oder den Betrieb im geschlossenen Regelkreis auf.

Die messtechnische Untersuchung der vorgestellten Umsetzung zeigt die prinzipielle Darstellbarkeit und animiert zur Suche nach weiteren adaptronischen Lösungsansätzen für die Produktionstechnik. Die bisher ermittelten Messergebnisse zur Strebenstruktur legen gleichzeitig nahe, dass die technischen Potenziale bei weitem nicht ausgeschöpft sind. Aus diesem Grunde werden die nächsten Schritte in der detaillierten Ausarbeitung der Regelungstechnik und der konstruktiven Optimierung der Strebenstruktur liegen. Im Anschluss an die Entwicklung der Regelungstechnik muss dann der Fokus der Arbeiten sukzessive vom statischen bzw. quasistatischen Bereich auf den Bereich der dynamischen Lasten erweitert werden, da nur darüber die wirklichen Potenziale der Technologie umfassend ausgeschöpft werden können.

## Literatur

[Den-04] Denkena B.; Hesse, P., Götz, T, Harms, A., Schnebeck, T.: Adaptronische Systeme im Maschinenbau, VDI-Z, 4/2004, S. 25 ff.

[Fle-03] Fleischer, J.; Weule, H.; Munzinger, C.: Wirkstellennahe Positionsmessung bei Parallelkinematiken, VDI-Z, 4/2003, S. 41 ff.

[Rud-05] Rudolf, C.; Wauer, J.; Fleischer, J.; Munzinger, C.: An Approach For Compensation Of Geometric Faults In Machine Tools, angenommene Veröffentlichung im Rahmen der I-DETC/CIE 2005, Dynamics and Optimization of Parallel Mechanisms and Robots

[Fle-05] Fleischer, J.; Munzinger, C.: Aktiver Ausgleich durch Adaptronik, WB Werkstatt und Betrieb, 4/2005, S. 31 ff.



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