

# **Adaptronische Kompensation von geometrischen Maschinenfehlern unter Berücksichtigung von Prozesslast und Position im Arbeitsraum**

FL 197/13-2  
WA 598/31-2

*Institut für Produktionstechnik (wbk),  
Uni Karlsruhe (TH) +  
Institut für Technische Mechanik (ITM),  
Uni Karlsruhe (TH)*



# Adaptronische Kompensation geometrischer Maschinenfehler in Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematik

J. Fleischer<sup>1</sup>, C. Munzinger<sup>1</sup>, M. Weis<sup>1</sup>, J. Wauer<sup>2</sup>, C. Rudolf<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Produktionstechnik (wbk), Universität Karlsruhe (TH)

<sup>2</sup> Institut für Technische Mechanik (itm), Universität Karlsruhe (TH)

## 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 bisher auf den statisch/quasistatischen Bereich fokussiert, um in einer weiteren 3. Phase die Ausweitung des Konzepts auf den dynamischen Bereich anzugehen. Unter Ausnutzung des Prinzips einer Schwingsaitenwaage werden statische Verformungszustände zur Messung in ein dynamisches Eingangssignal für piezoelektrische Wandler gewandelt.

## Optimierung der Kompensationseinheit

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 Falten-

balgs verworfen. Stattdessen wurden an die kinematischen Bedingungen angepasste Bolzen verwendet, welche hinsichtlich der erreichbaren Steifigkeit vergleichbare Werte liefern. Die einzelnen Komponenten sind in Bild 1 dargestellt.

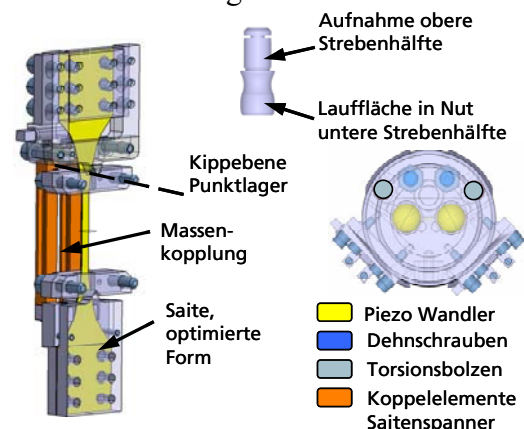


Bild 1: Strebenkomponenten, Ausführung mit Doppelaktor

## Erweiterung der Regelungskonzepte

Die Beibehaltung des im ersten Prototyp realisierten Prinzips zur dynamischen Vorspannung erlaubt die grundsätzliche Übernahme der realisierten Reglerhardware. Zusätzlich ist jedoch eine Erweiterung des Konzepts notwendig, um die Überlagerung der beiden Saitensignale zu verhindern. Hierzu werden die beiden Saiten mit unterschiedlichen Frequenzen angeregt und die entsprechend der Betriebsbereiche eingestellten Frequenzen wechselseitig im Signalpfad durch Bandsperrern gefiltert. Für die Einstellung einer gezielten Verlagerung, also dem Ausgleich einer statischen Verlagerung infolge von beispielsweise Montagefehlern, ist zusätzlich noch eine Datei notwendig, welche die

Verkipfung der aktiven Stellachsen ausgewertet.

Mit der bereits entwickelten Regelungstechnik werden mit dem Gesamtaufbau für einen Wandler eine Wiederholbarkeit und Genauigkeit unterhalb von  $0,5 \mu\text{m}$  erreicht. Die Dynamik der entwickelten Einheit genügt den Anforderungen für den Ausgleich statischer und quasistatischer Verlagerungen durch eine im Fall einer sprunghaften Systemanregung darstellbaren Anstiegszeit von etwa 10 ms.

### Potenziale zur Spannungsabsenkung

Im Auslegungsprozess der piezoelektrischen Wandler, die gleichzeitig sensorisch als auch aktorisch genutzt werden, stellen die geometrischen Parameter der Keramiken die variablen Größen dar, welche 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. Durch Variation der geometrischen Parameter in Kombination mit einer konservativen Abschätzung realisierbarer Verstärkertechnik wurde eine Absenkung der maximalen Betriebsspannung errechnet. Für die Darstellung der aktorischen Funktion ist insbesondere die Einhaltung des zu Verfügung stehenden Bau-raums als limitierender Faktor zu nennen, welcher im vorliegenden Fall durch die umgebende Konstruktion begrenzt ist. Somit steht zu Beginn der spannungsreduzierten Auslegung die Wahl der Wandlerfläche. Auf der sensorischen Seite hingegen stellt bei gewähltem Durchmesser die Plattendicke die entscheidende Rolle. Sie muss so groß gewählt werden, dass die in der Regelungselektronik verarbeiteten Spannungen in ausreichender Höhe vorliegen.

### Hysteresemodellierung

Piezokeramische Materialien weisen ein hysteresehaftetes Großsignalverhalten auf. Zur Berücksichtigung dieses nichtlinearen Verhaltens im Regelkreis wurde unter Verwendung elementarer Hysteres- und

Sättigungsoperatoren ein mathematisches Modell erstellt. Mit diesem Modell kann eine Invertierung des Hystereseverhaltens durchgeführt werden. Durch eine gezielte Ansteuerung des hysteresehafteten Systems mit dem durch die Inverse modifizierten Signal kann ein lineares Übertragungsverhalten des piezoelektrischen Wandlers erzielt werden [2]. Dies kann genutzt werden um die Dynamik des Systems zu steigern. Bild 2 zeigt die erfolgreiche Abbildung einer im Versuchsstand des wbk gemessenen Hysteresese mit Hilfe weniger Elementaroperatoren.

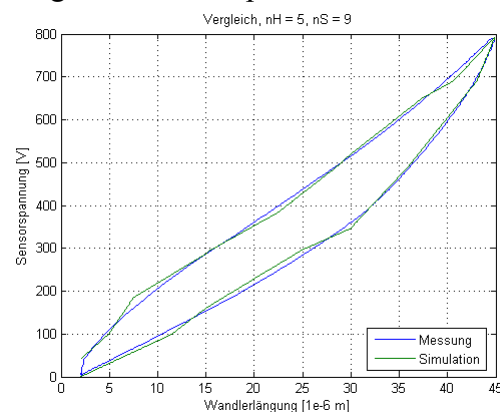


Bild 2: Hystereseseabbildung unter Verwendung elementarer Sättigungs- und Hysteresoperatoren

### Reglerstruktur und Co-Simulation

Zum Entwurf eines Reglerkonzepts für die adaptronische Strebe wurden verschiedene Modelle der Strebe untersucht. Zunächst wurde ein einfaches Modell eines Dreimassenschwingers betrachtet, anhand dessen ein optimaler Zustandsregler konzipiert wurde. Da der Zustandsvektor jedoch in den seltensten Fällen vollständig bekannt ist, wurde weiterhin ein Modell eines Luenberger Beobachters aufgebaut. Dieses Beobachtermodell findet auch bei der Co-Simulation zwischen dem Strebenmodell bzw. dem Modell der Beispielmaschine im MKS-Softwarepaket MSC.Adams und dem Regler in Matlab/Simulink seinen Einsatz.

Aufgrund unerwünschter bleibender Regelabweichungen, die bei diesem Ansatz eines optimalen Zustandsreglers auftreten, wurde das Reglerkonzept um eine Rückführung erweitert, in der ein integrierendes

Messglied enthalten ist [3]. Dadurch konnte die Regelabweichung eliminiert werden. Dieser anhand des Dreimassenschwingers entwickelte Regler wurde auch auf die komplexeren Modelle der adaptronischen Strebe angewandt. Das Ergebnis dieser erfolgreichen Übertragung des einfachen Reglerkonzepts auf das komplexe Modell unter dem Einfluss einer sprunghaften Störung ist in Bild 3 dargestellt.

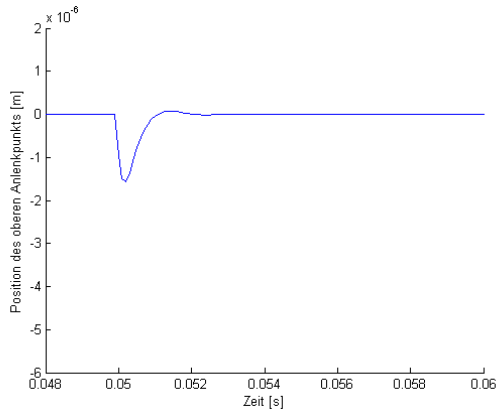


Bild 3: Optimaler Zustandsregler mit Integrator unter dem Einfluss einer sprunghaften Last auf adaptronische Strebe.

### Implementierung der adaptronischen Strebe in die Beispielmaschine

Zur Bestimmung der optimalen Anzahl und Position der adaptronischen Streben für den Einsatz in der Beispielmaschine wurde ein variables Modell der Werkzeugmaschine in MSC.Adams aufgebaut, das in Bild 4 für die beispielhafte Konstellation mit drei adaptronischen Streben dargestellt ist. Damit wurden verschiedene simulative Untersuchungen durchgeführt.

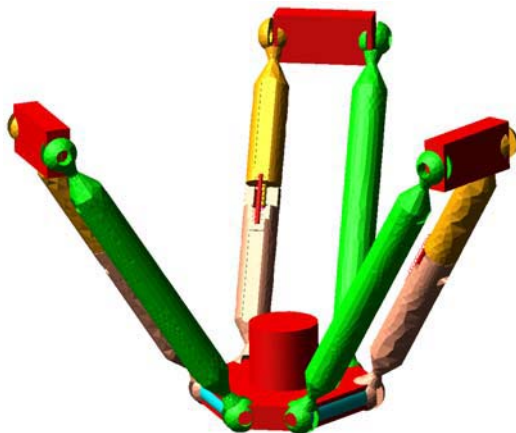


Bild 4: MSC.Adams Modell der Beispielmaschine mit drei ausgetauschten adaptronischen Streben [3].

So lässt sich beispielsweise anhand der Frequenzantworten der Werkzeugmaschine auf vorgegebene Prozesslasten 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 Maschine treffen. Mit diesen Ergebnissen kann bestimmt werden, welche der sechs Streben abhängig von den einzelnen Bearbeitungsprozessen zur Kompensation der statischen Fehler ausgetauscht werden müssen.

### Ausblick

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

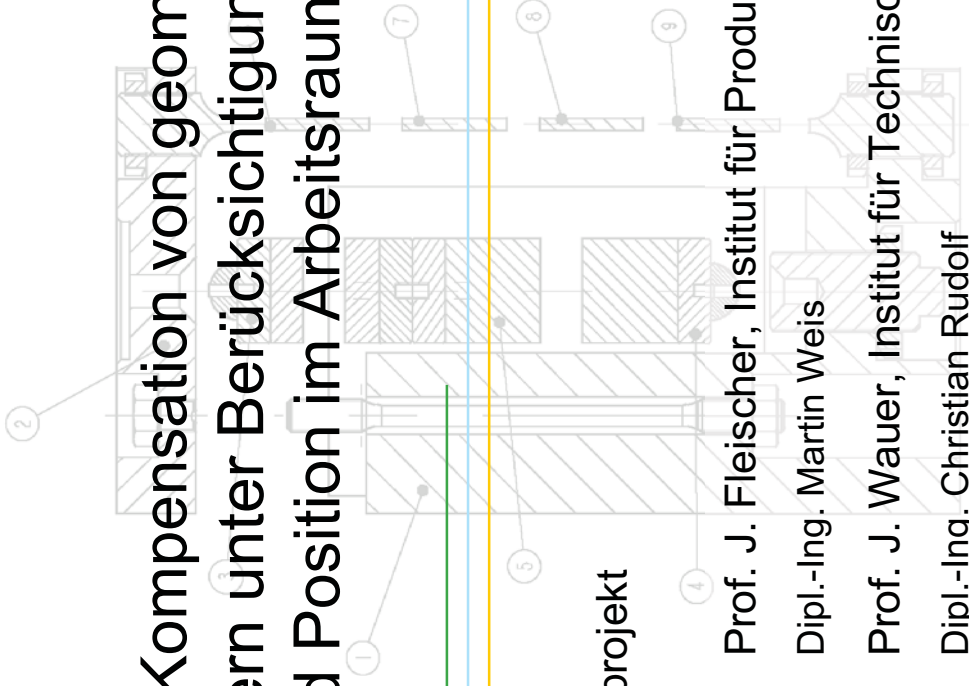
Im Fokus weitergehender Untersuchungen steht dem gegenüber die Erweiterung des Ansatzes zur Kompensation von Verlagerungen über den statisch/quasistatischen Bereich hinaus. Hierzu wird einerseits der direkte piezoelektrische Effekt in Kombination mit der erarbeiteten Methode genutzt, andererseits werden Phasenregelkreise zur Erhöhung der Messgeschwindigkeit des dynamischen Signals eingesetzt, sodass der Betrieb der Saite in einen Bereich höherer Frequenzen verschoben werden kann.

### Literatur

- [1] Munzinger, C., *Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen*, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe 2007, ISBN 978-3-8322-5871-9.
- [2] Kuhnen, K.; *Inverse Steuerung piezoelektrischer Aktoren mit Hysterese-, Kriech- und Superpositionsoperatoren*; Shaker-Verlag; 2001.
- [3] Rudolf, C.; Wauer, J.; Munzinger, C.; Weis, M.; *Piezoelectric control of a machine tool with parallel kinematics*; Proc. of SPIE; 2007, im Review Prozess.



# Adaptronische Kompensation von geometrischen Maschinenfehlern unter Berücksichtigung von Prozesslast und Position im Arbeitsraum



Kooperationsprojekt

Prof. J. Fleischer, Institut für Produktionstechnik

Dipl.-Ing. Martin Weis

Prof. J. Wauer, Institut für Technische Mechanik

Dipl.-Ing. Christian Rudolf

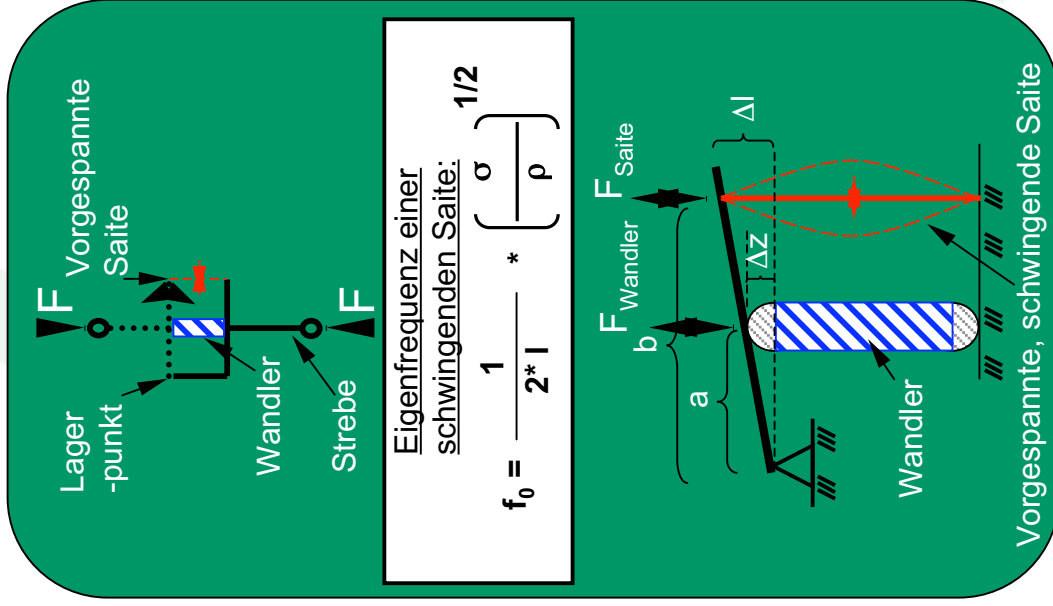


## Ziele und Ansatz des Projektes

- **Problemstellung:**
  - Werkzeugmaschinen zeigen Verlagerungen im statisch/ quasistatischen und dynamischen Lastbereich.
- **Ziel:**
  - Phasen 1+2: Adaptronische Kompensation statischer und quasistatischer Verlagerungen mit paralleler Bewältigung von Sensor- und Aktorfunktionen.
  - Phase 3: Ausweitung des Konzepts auf den dynamischen Bereich

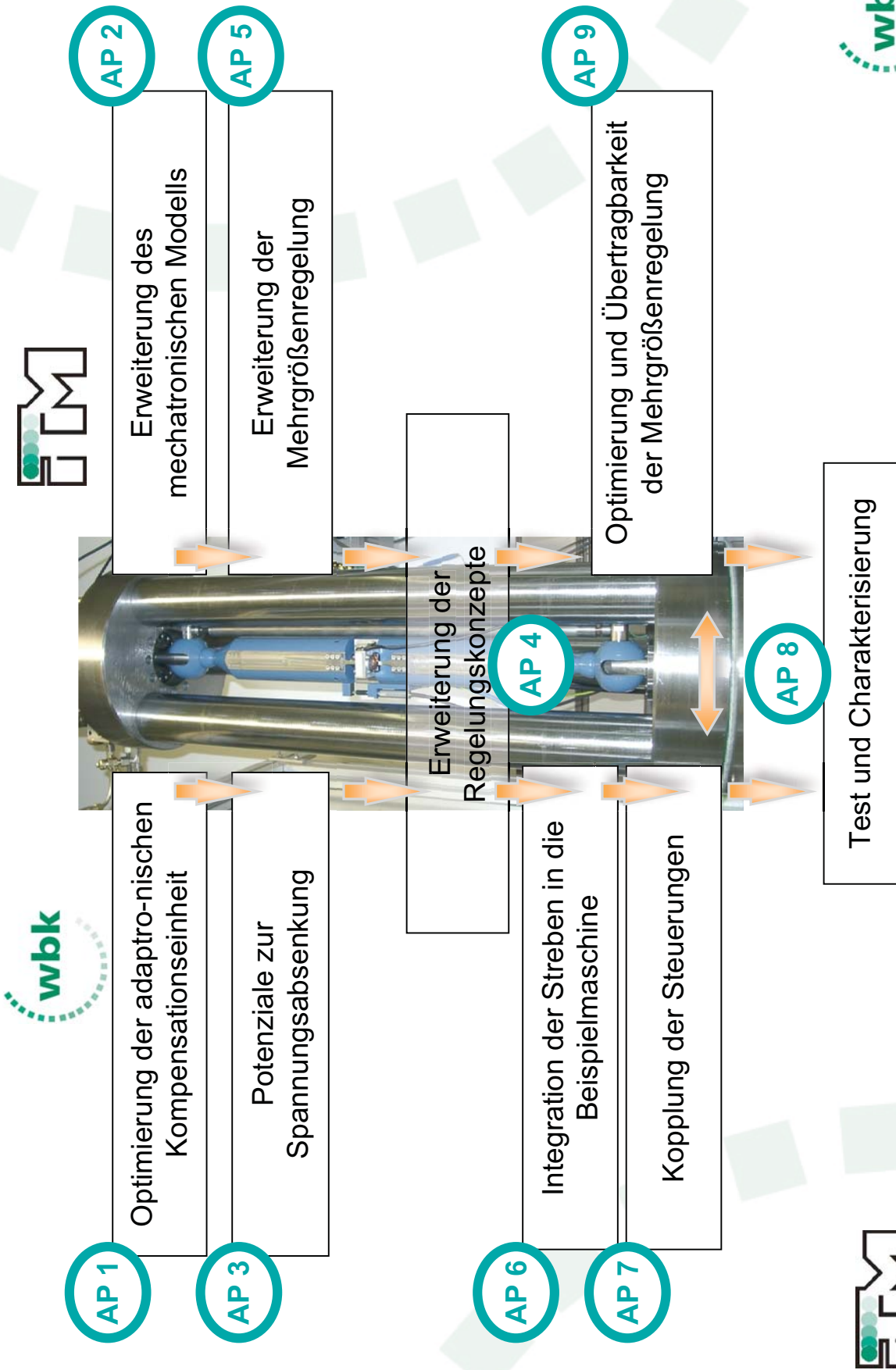
- **Ansatz:**

- Nutzung des Prinzips einer Schwingsaitenwaage zur Wandlung des statischen Zustands in ein dynamisches Eingangssignal für den piezoelektrischen Wandler



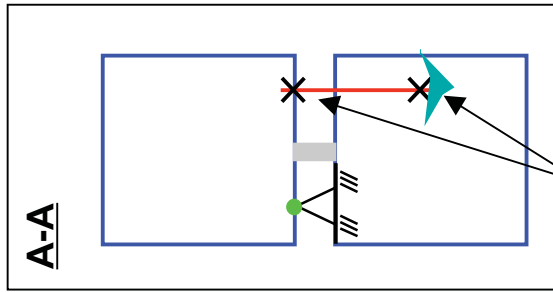
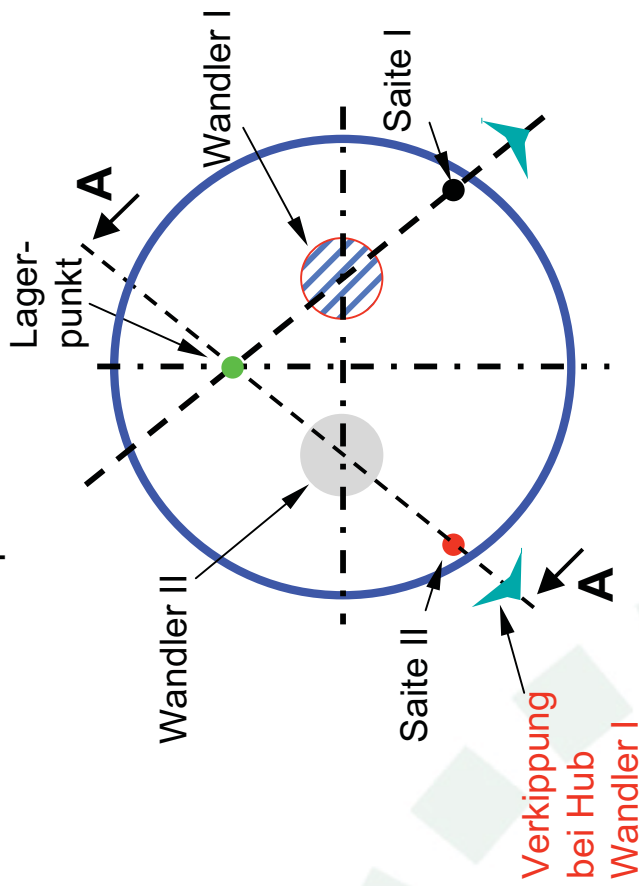


# Arbeitsprogramm des Forschungsprojekts

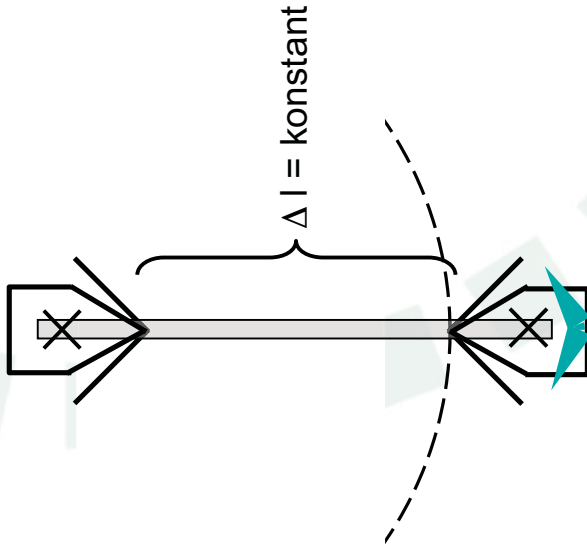


# AP1: Erweiterte adaptronische Strebe

Konzept:



Fixierung der Saite:  
Übertragung der  
Weginformation

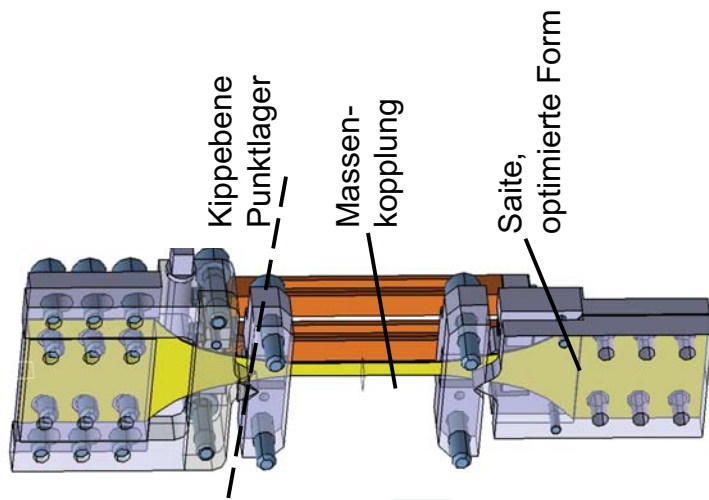


- Entkopplung der Wandler/ Saiten-Paare gelöst.
- Einfacher Zusammenhang zwischen Frequenz (Weg) und mech. Saitenspannung weiterhin gültig.

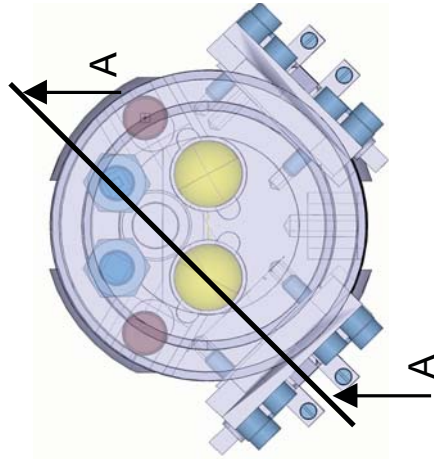


# AP1: Erweiterte adaptronische Strebe

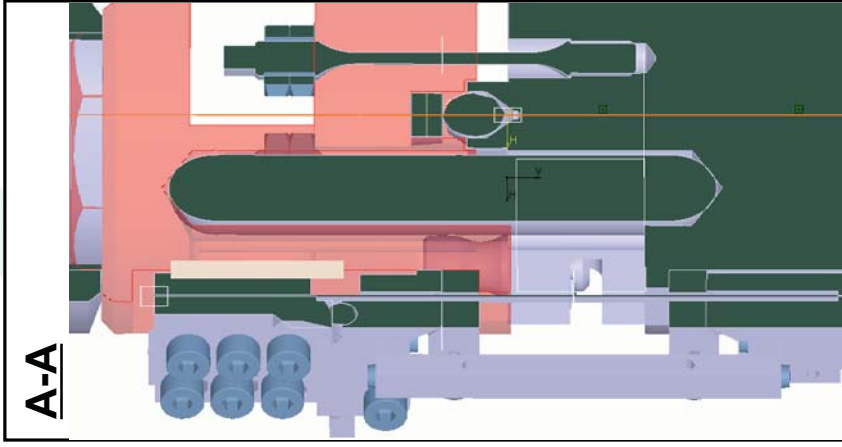
Saitenbaugruppe:



Draufsicht:



- Piezoelektrische Wandler
- Dehnschrauben
- Torsionsbolzen
- Koppelemente der Saitenspanner

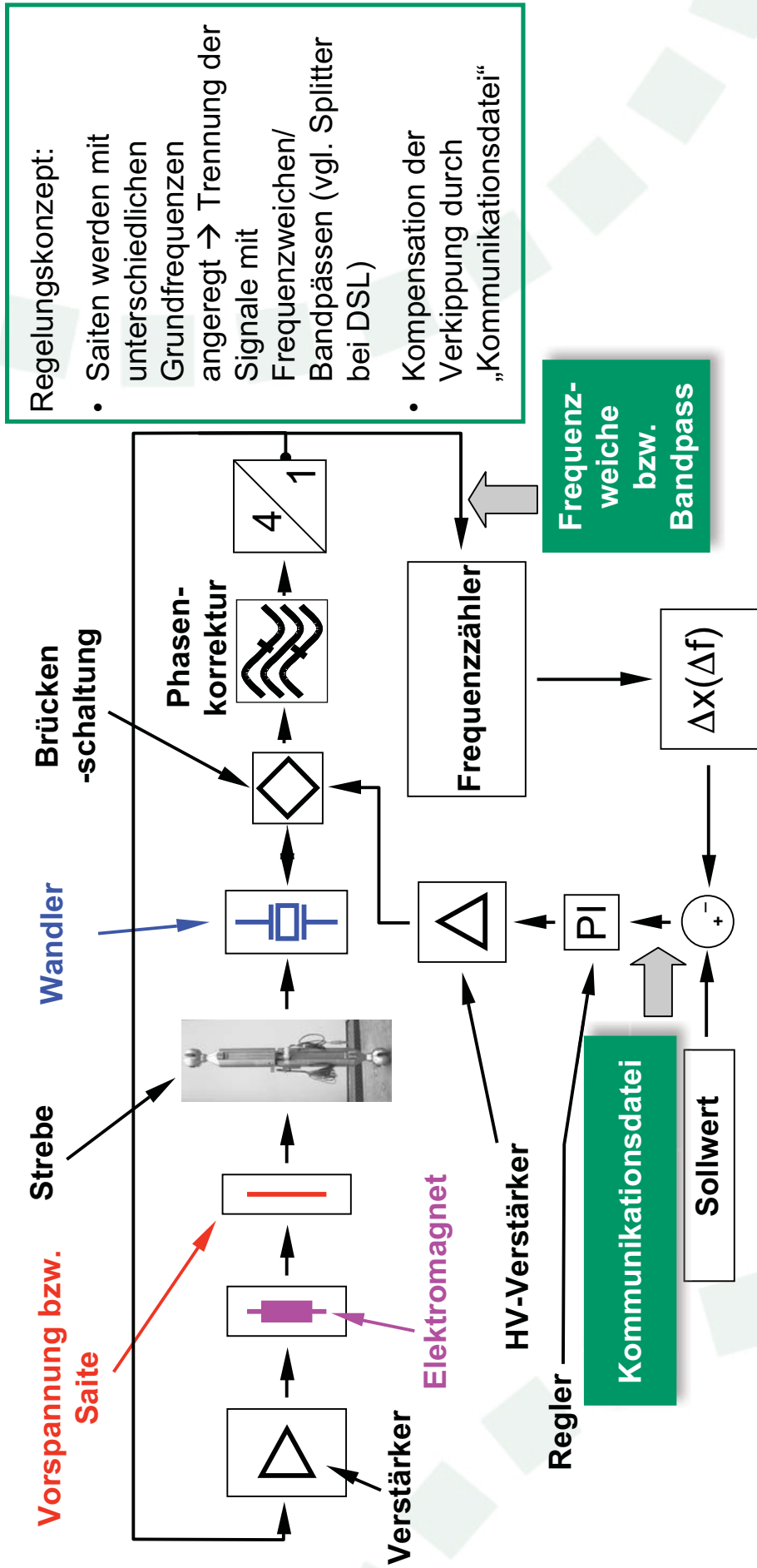


↑

- Mechanisches Prinzip kann weitgehend weiter verfolgt werden.
- **Torsionssteifigkeit** wird durch den Einsatz von zwei an die Kinematik angepasste **Bolzen** realisiert



# AP4: Erweiterung der Regelungstechnik



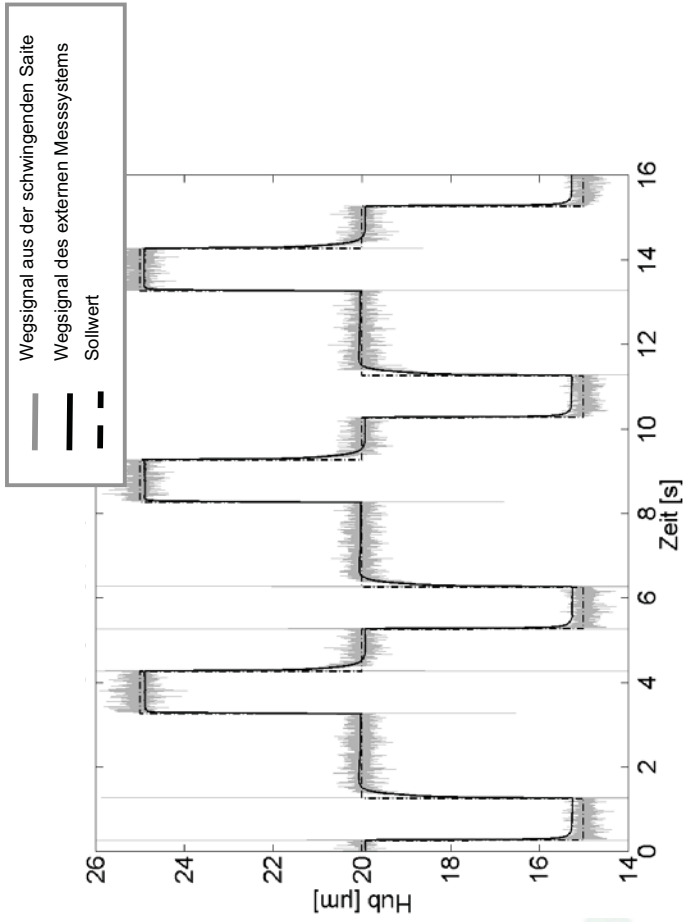
Regelungskonzept:

- Saiten werden mit unterschiedlichen Grundfrequenzen angeregt → Trennung der Signale mit Frequenzweichen/ Bandpässen (vgl. Splitter bei DSL)
- Kompensation der Verkipfung durch „Kommunikationsdatei“

Regelungstechnik wird weiter verwendet. Zusätzlich ist eine Frequenzweiche sowie ein Abgleich der Verkipfung notwendig.



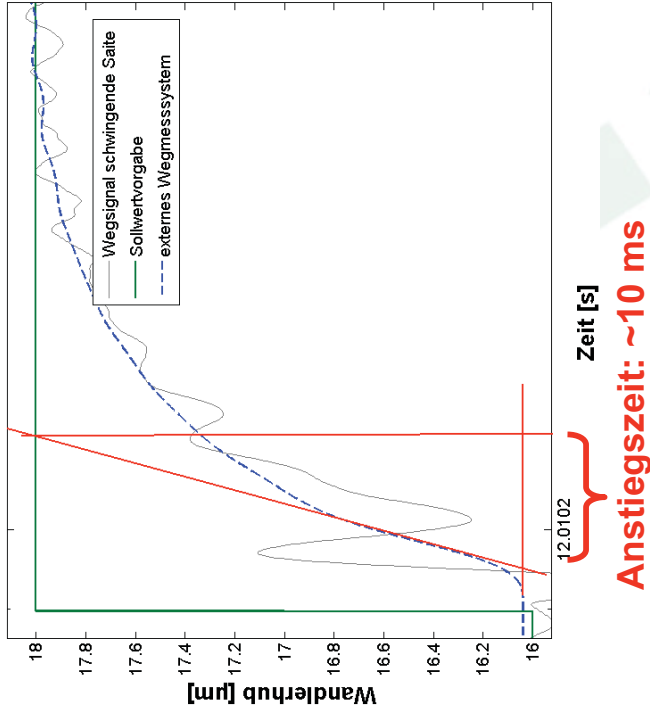
## AP 4: Ergebnisse



Wiederholbarkeit ( $6\sigma$ ):  $< 0,5 \mu\text{m}$

Genauigkeit:  $< 0,5 \mu\text{m}$

Direkte Messung der Hysterese => keine Auswirkungen auf die Funktion des Systems



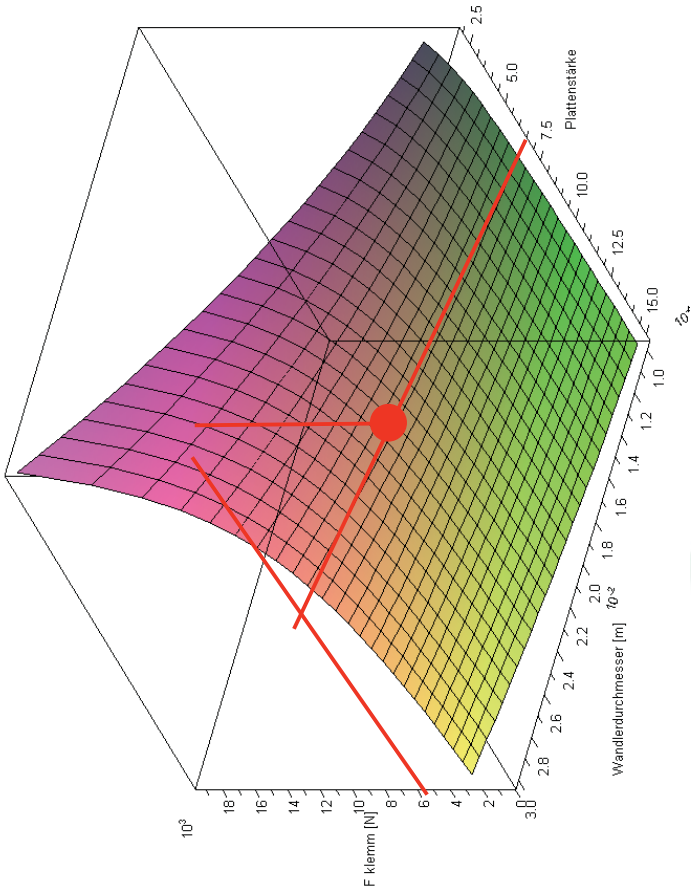
- Maßverkörperung (schwingende Saite) ergibt stabiles System mit guter Genauigkeit und Wiederholbarkeit.
- Dynamik für den Ausgleich statischer und quasistatischer Verlagerungen ausreichend.



# AP3: Potenziale zur Spannungsabsenkung

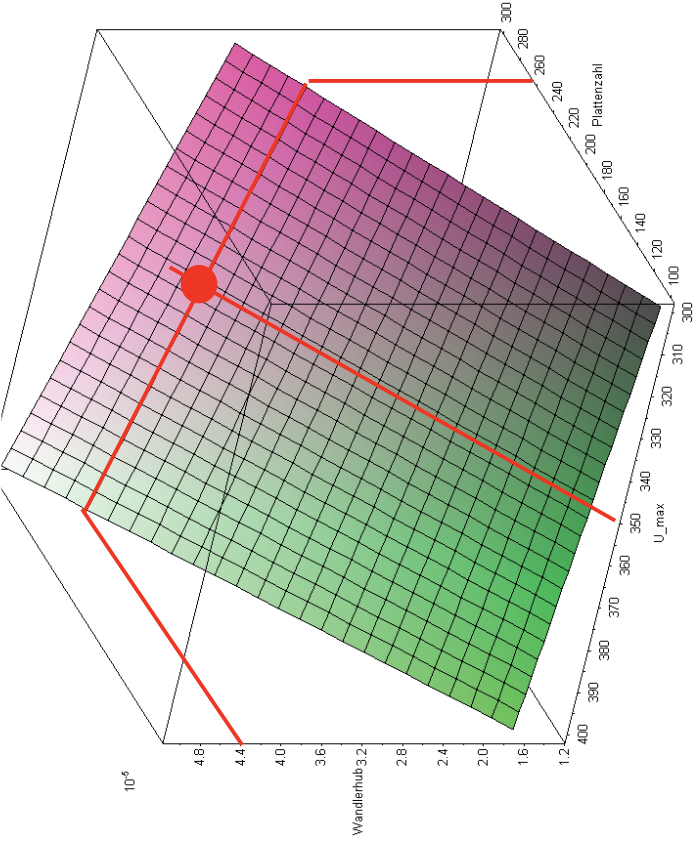
$$F_{Klemm} = \frac{d_{33}}{S_{33}} \frac{A}{h} U_{max}$$

Klemmkraft über Durchmesser und Plattenstärke (U<sub>max</sub> = 350V)



$$Z_{max} = nd_{33} U_{max}$$

Wandlerhub über Plattenzahl und U<sub>max</sub>



- **Projektierte Klemmkraft und freier Hub ergeben**
- **Plattenstärke, Plattenzahl und Wandlerdurchmesser**  
**(~0,7mm; ~260; 25mm).**
- **U<sub>max</sub> auf 350 V abgesenkt.**

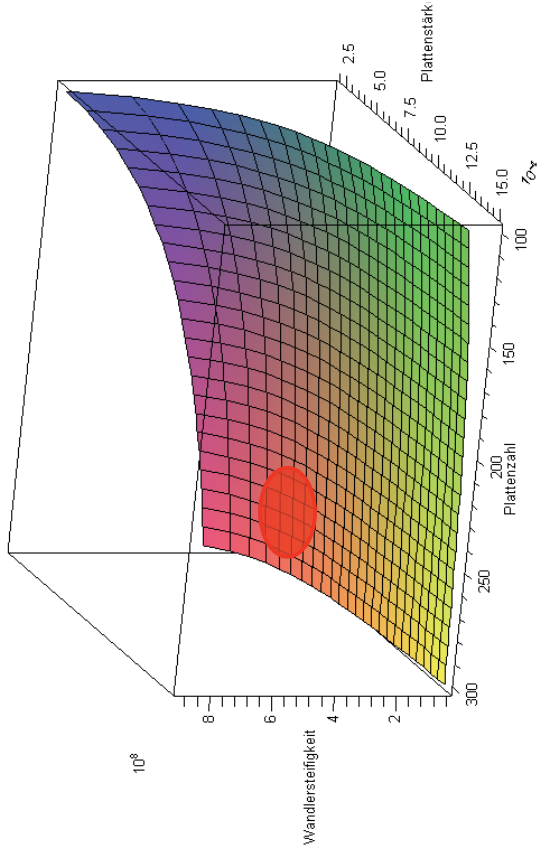




# AP3: Potenziale zur Spannungsabsenkung

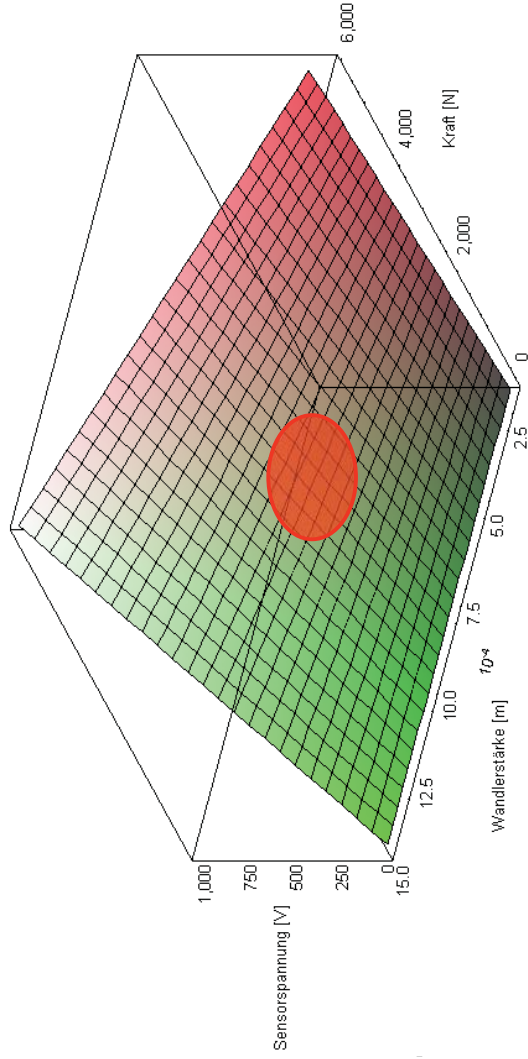
$$C_{mech} = \frac{\Delta F}{\Delta z} = \frac{AE_{Wandler}}{nh} = \frac{A}{nhs_{33}^E}$$

Wandlersteifigkeit über Plattenzahl und Plattenstärke (d=25mm)



$$U = -d_{xx} \frac{F}{C} = -d_{xx} \frac{Fh}{\epsilon^T A}$$

Wandlerspannung über Last und Wandlerstärke (d=25mm)



• Wandlersteifigkeit bei U<sub>max</sub> leicht reduziert.

• Sensorisches Signal (V/N) bei Wandlerdurchmesser d = 25mm ausreichend hoch für die Auswertung.

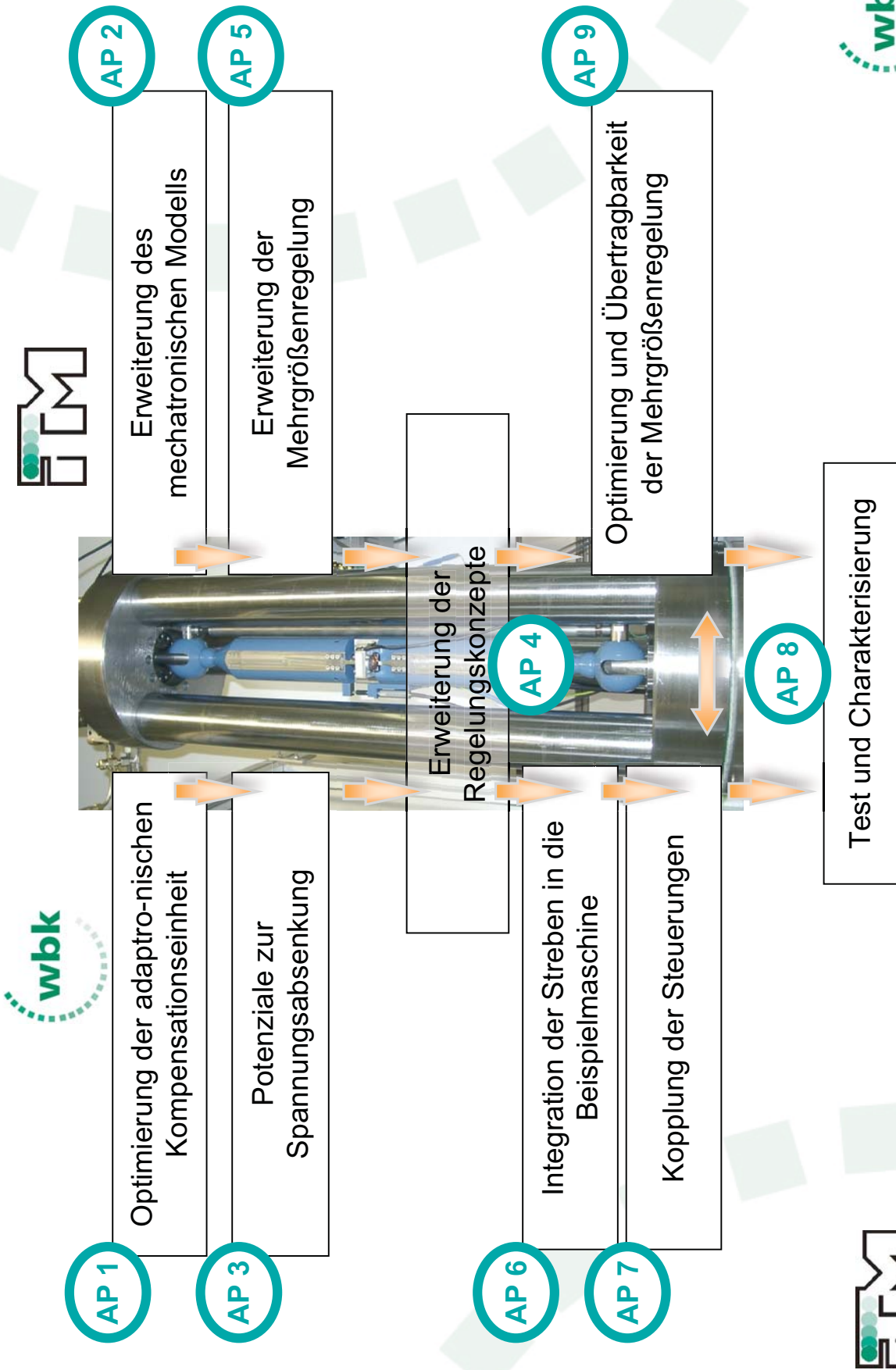


## Anstehende Arbeiten

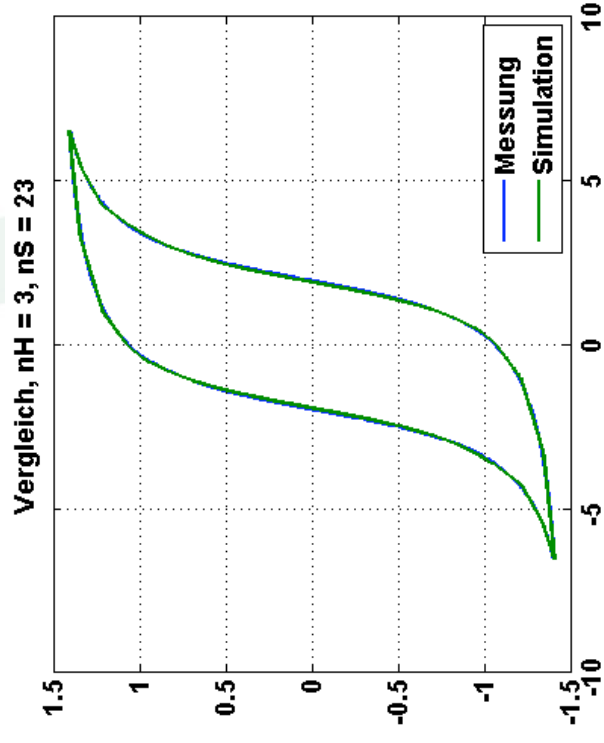
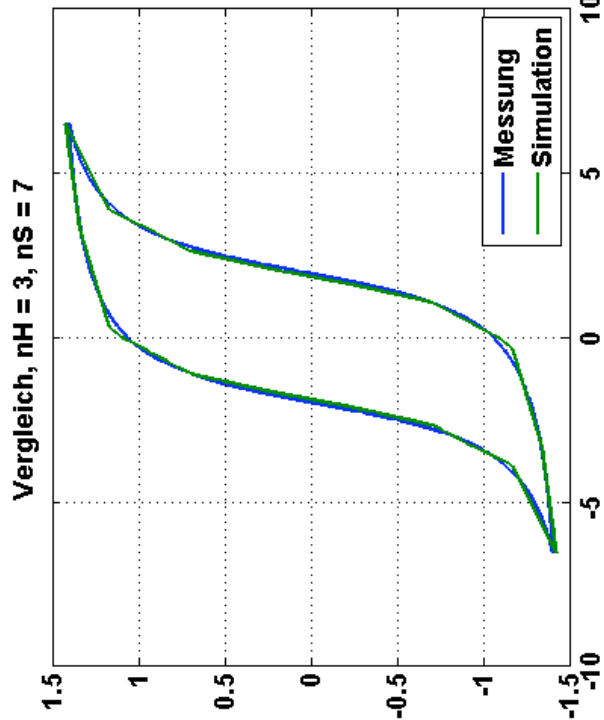
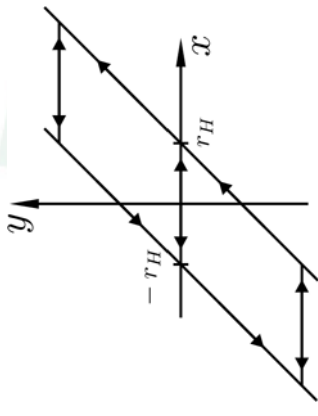
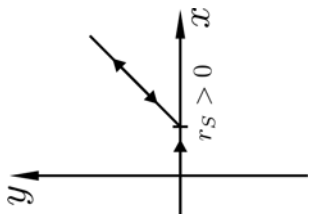
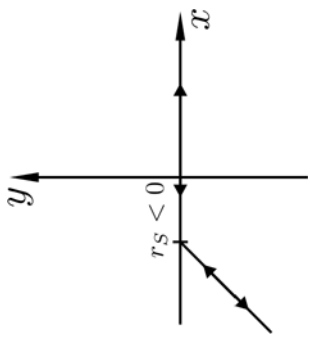
- Bau und Inbetriebnahme der biegesteifen Strebe:
  - Stand: Teilefertigung, Aufbau der Frequenzweichen
- Integration in Maschine/ Test:
  - Kopplung der Maschinensteuerung mit der Regelung der Strebe (Sollwertvorgabe) über Analogsignal
- Test und Charakterisierung:
  - Test und Charakterisierung erfolgen nach Integration



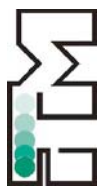
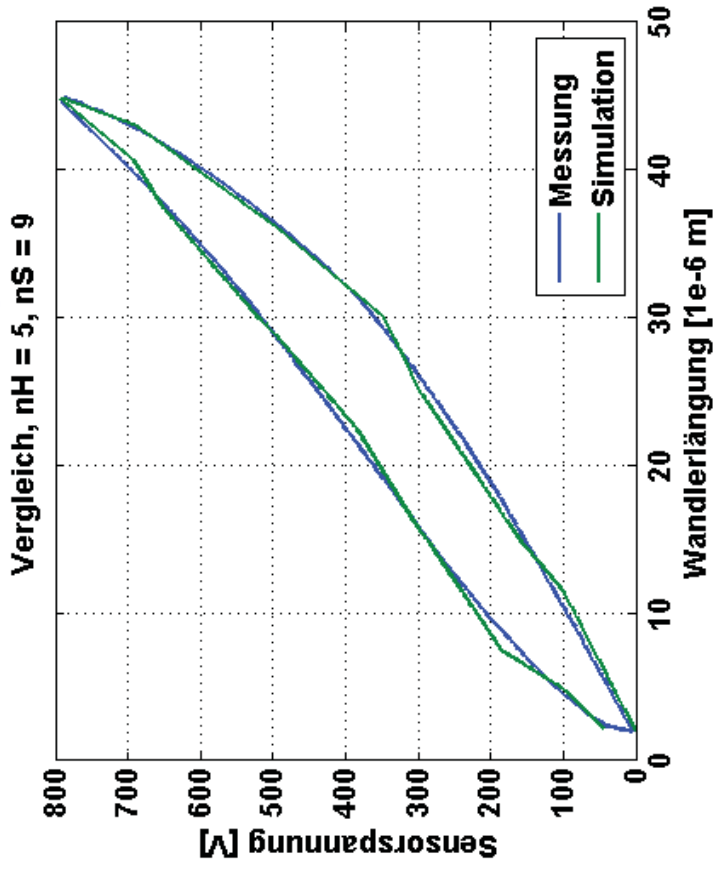
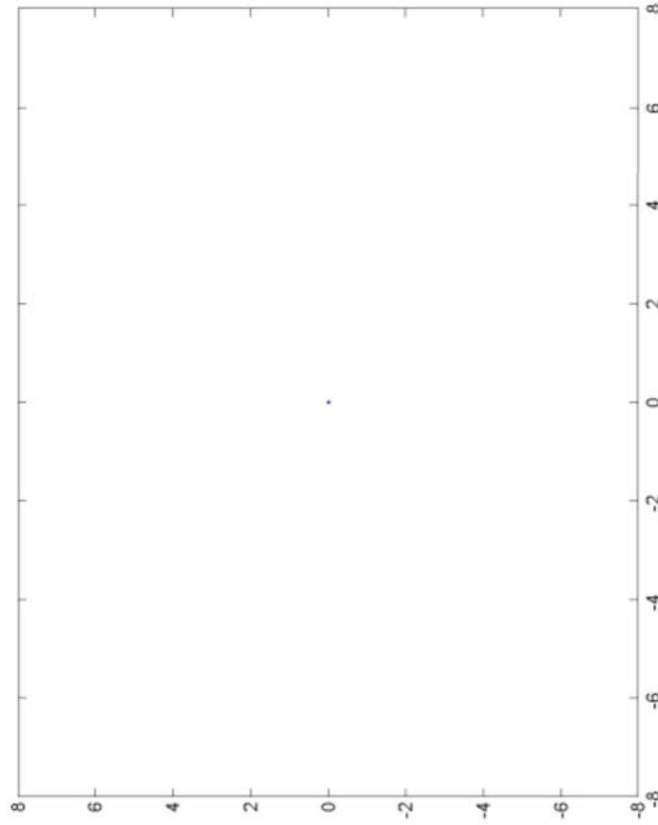
# Arbeitsprogramm des Forschungsprojekts



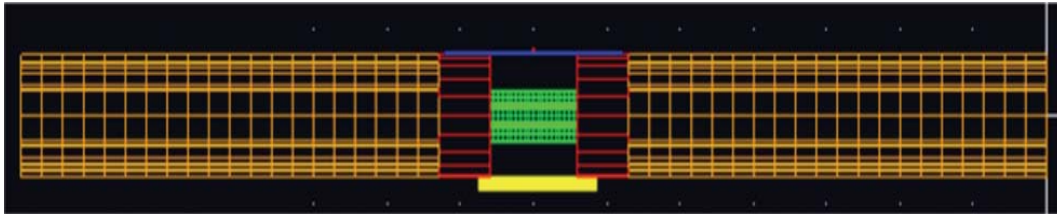
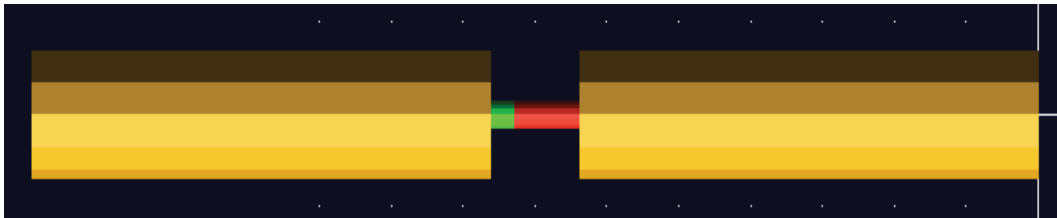
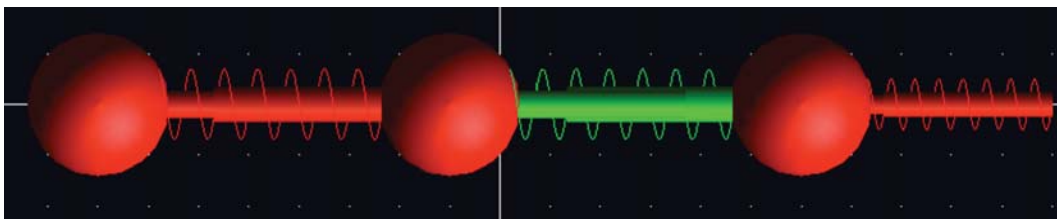
# AP2: Großsignalverhalten von piezokeramischen Wandlern: Operatorbasierte Beschreibung



# AP2: Großsignalverhalten von piezokeramischen Wandlern: Operatorbasierte Beschreibung



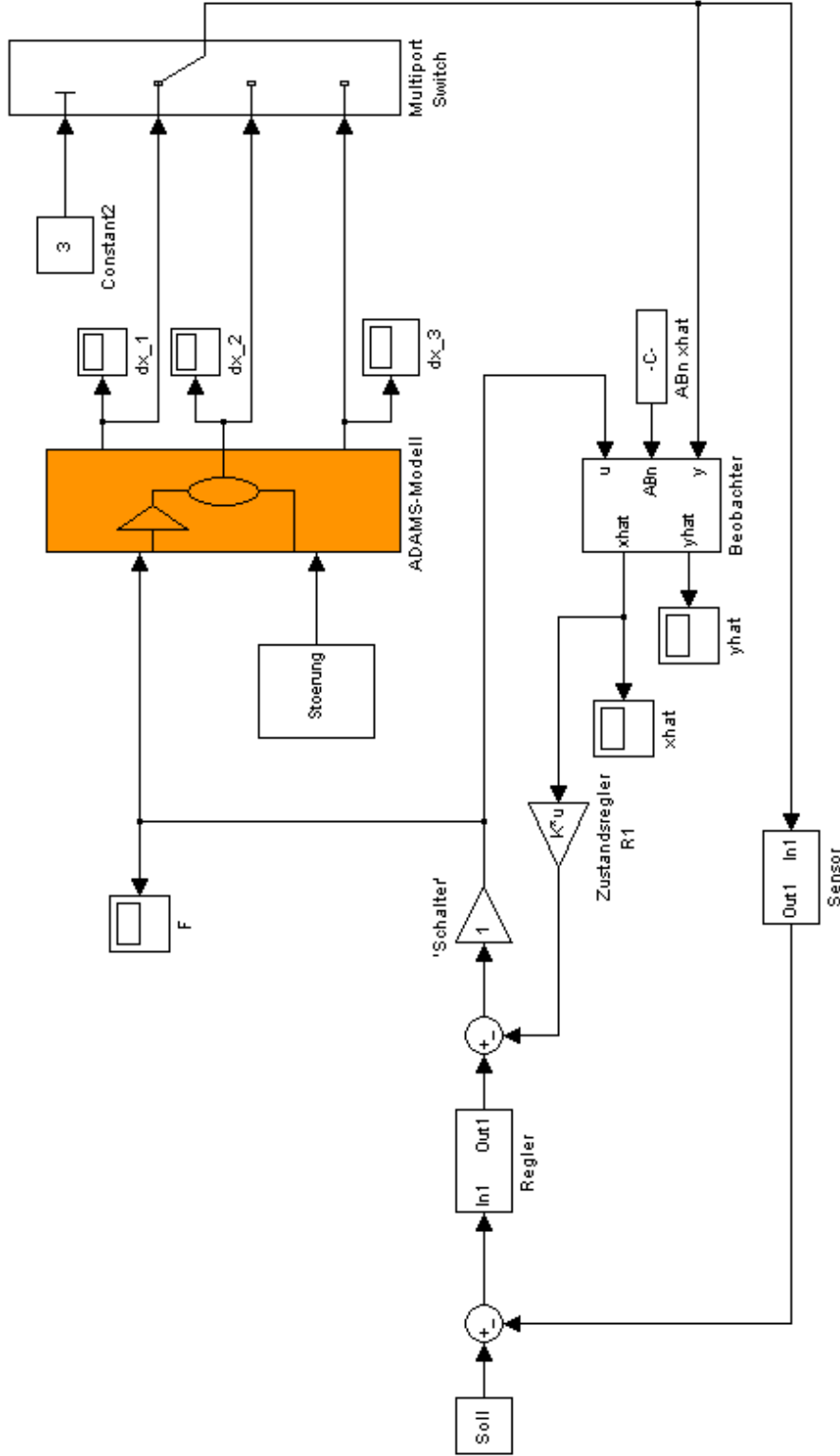
# AP4: Modellentwicklung adaptronische Strebe



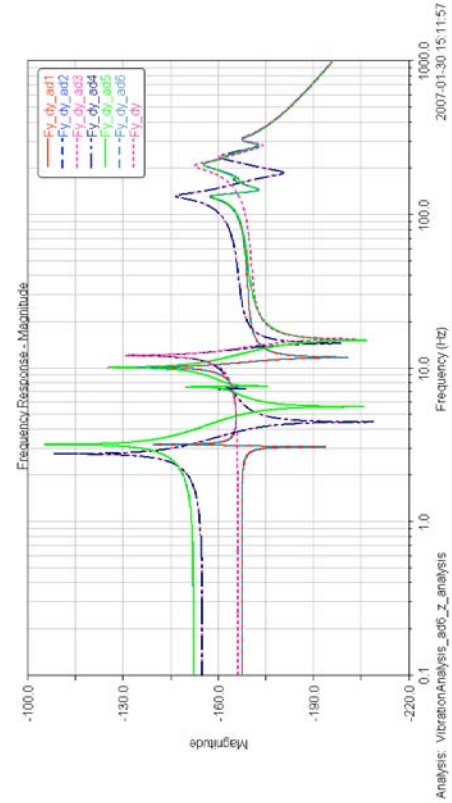
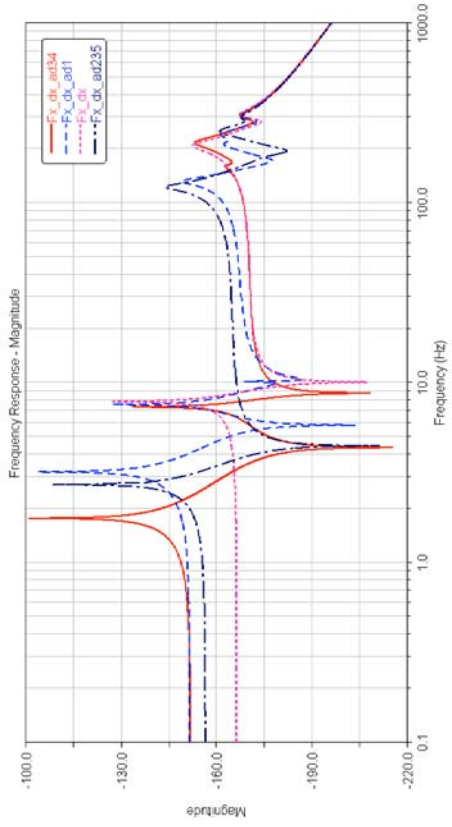
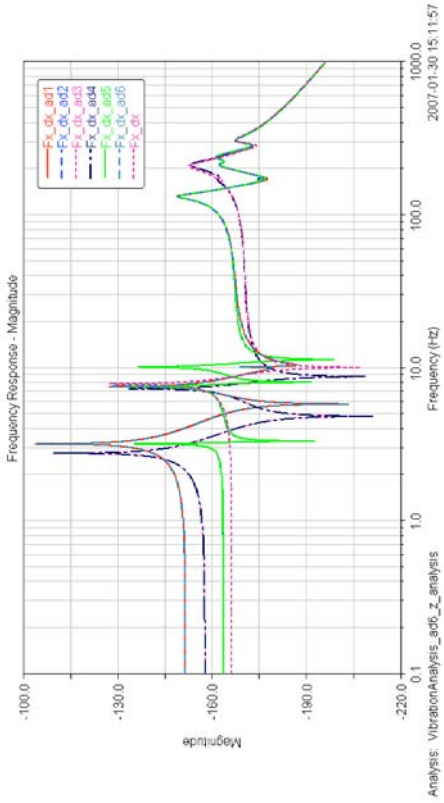
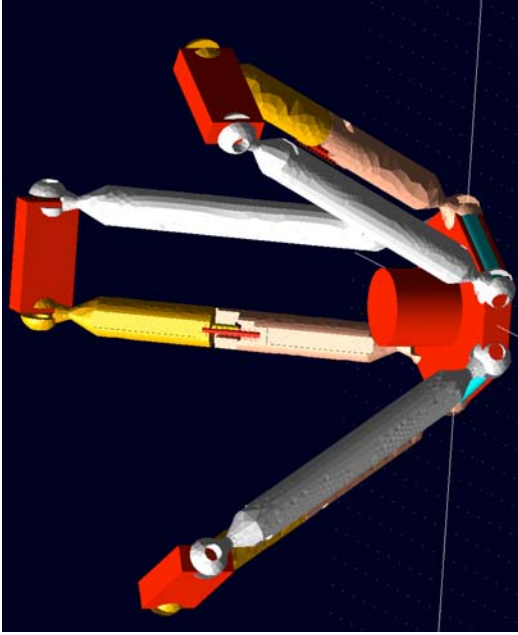
Universität Karlsruhe (TH)



# AP 4/5: Erweiterte Reglerstruktur im Co-Simulationsmodell ADAMS-Matlab/Simulink:



# AP 8/9: ADAMS-Modell der PKM mit adaptronischen Streben – Einfluss von Position und Anzahl:



## Weiteres Vorgehen

### ● Umsetzung der Mehrgrößenregelung im Modell:

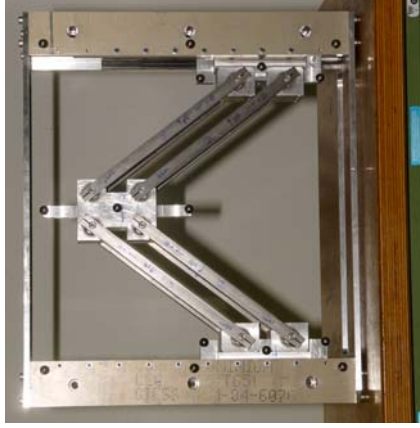
- Auswahl der Reglerprinzipien
- Parameteroptimierung

### ● Bewertung und Charakterisierung der geregelten Maschine:

- Position und Anzahl der adaptronischen Streben
- Verschiedene Arbeitsprozesse, Position im Arbeitsraum

### ● Übertragbarkeit und andere Einsatzgebiete:

- Systeme mit PKM Struktur, z.B. WZM aus SPP 1099
- Linearpositionierung

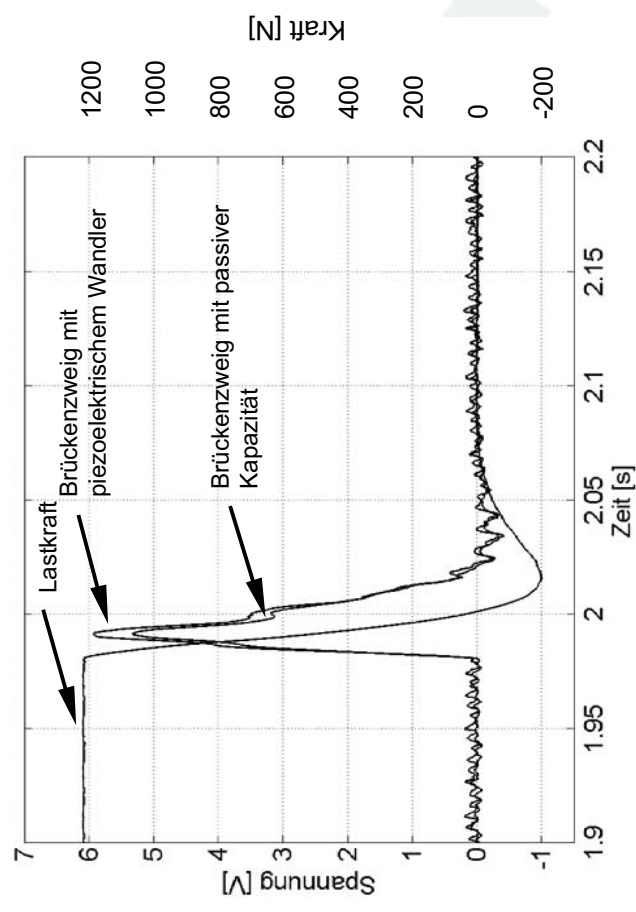




# Ausblick



- **Erhöhung der Dynamik:**
  - Auswertung des direkt am Wandler messbaren Spannungssignals in Kombination mit dem bisherigen Messprinzip (schwingende Saite)





## Ausblick

● Dynamiksteigerung der Frequenzbestimmung mit PLL:

● Einsatz von Self-Sensing Aktoren:

