

# Piezos auf Abwegen

## Echtzeitkompensation des Hysterese-Verhaltens bei Festkörper-Aktoren

*Pareshkumar Solanki, Christian Weick*  
**Bei der hochdynamischen Bahnregelung mittels Festkörper-Aktoren kommt es zu Ungenauigkeiten aufgrund der Hysterese der Piezoelemente. Dieser Effekt lässt sich mittels eines adaptiven Systems aus DSP und einem Lernalgorithmus kompensieren.**

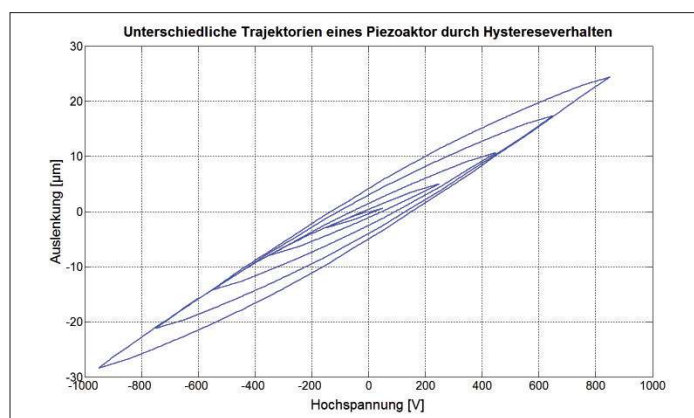
Festkörperaktoren sind ein Grundpfeiler der Antriebstechnik. Im Bereich der Präzisionspositionierung, Vibrationsdämpfung oder hochdynamischen Bahnregelung kommen sie sowohl in rein gesteuerten als auch bei geregelten Systemen zum Einsatz. Allen Anwendungen gemeinsam ist die Thematik der Aktuator-Nichtlinearitäten. Diese stellen eine besonders große Herausforderung an die Regelungs- und Steuerungstechnik. Das hier vorgestellte Verfahren zur Kompensation der Aktuator-Hysterese kann bei vielen Anwendungen zur Verbesserung des Systemverhaltens beitragen. Generell lassen sich zwei Systemklassen un-

terscheiden, bei denen eine Kompensation der Aktuator-Nichtlinearitäten wünschenswert ist. Zum einen sind es die rein gesteuerten Systeme, die, sei es aus Kostengründen oder Platzmangel, keine Sensoren zur Messung einer Regelgröße enthalten. Hier ist der Gewinn einer Kompensation leicht ersichtlich. Abgesehen von einer eventuell aufwendigen Kalibrierung gibt es ansonsten keine Einheit im System, die dem nichtlinearen Verhalten entgegenwirkt. Aber auch bei geregelten Systemen kann eine Kompensation sinnvoll sein. Insbesondere dort, wo eine hohe Anforderung an die Dynamik gestellt wird. Da reicht die Bandbreite des

*Pareshkumar Solanki und Christian Weick sind als Entwicklungsingenieure bei der Nest Electronics GmbH tätig*

Formdynamik	Form-Bandbreite	Regelungs-Bandbreite	Fertigungs-Toleranz	Toleranzauslastung	
				ohne Kompensation	mit Kompensation
25µm	bis 400 Hz	100 Hz	±2µm	100%	30%

**Ergebnis des Verfahrens bezüglich der Toleranzauslastung. Die Hysterese-Kompensation verringert den Restfehler trotz ungünstigem Form-/Regelungs-Verhältnis erheblich.**



1: Die Auslenkung eines auf einem Piezo-Aktuator basierenden mechanischen Schwingensystems beschreibt in Abhängigkeit der Ansteuerung unterschiedliche Trajektorien

übergeordneten Regelungssystem oft nicht aus, um das nichtlineare Phänomen des Aktuators vollständig auszuregeln.

## Piezoelektrischer Aktuator in der Bahnregelung

Aus der Vielzahl an Festkörperaktoren und deren Anwendungsgebieten steht hier exemplarisch der piezoelektrische Aktuator sowie sein Einsatz im Bereich der hochdynamischen Bahnregelung im Mittelpunkt. Der Aktuator ist dabei Teil einer schwingungsfähigen Mechanik (Bild 1), die im Zusammenspiel mit einer Werkzeugmaschinenachse definierte Formen auf ein Werkstück „spant“. Das gesamte System ist bei der prozesskritischen Fertigung von Komponenten für die Automobilindustrie im Einsatz. Die Hysterese-Kompensation führt in diesem konkreten Zusammenhang zu einer deutlich besseren Sollformgüte (Bahntreue) am bearbeiteten Werkstück. Mit der so erzielten Reserve bei der Formerzeugung lassen sich nicht zuletzt auch die Toleranzvorgaben bei der Fertigung wesentlich besser einhalten.

## Nichtlinearität mit Gedächtnis

Die Hauptproblematik des hier verwendeten Hochlast-Piezo-Aktuators ist sein trotz mechanischer Vorspannung zur Linearisierung nicht zu vernachlässigendes Hystereseverhalten. Dieses zählt zur Gruppe der sogenannten „gedächtnisbehafteten Nichtlinearitäten“ und lässt sich nicht wie die „gedächtnislosen“ beispielsweise durch eine einfache inverse Kennlinie kompensieren.

Dies hat zur Folge, dass die tatsächliche Bahnkurve bei jeder Art von Positionierungssystem mehr oder weniger von der

vorgegebenen abweicht. Ist die Positionierung bzw. Bahnregelung hochdynamisch, stößt eine vorhandene übergeordnete Regelung an ihre Grenzen und kann die Abweichung nicht für die gesamte gewünschte Bandbreite ausregeln. Als Folge verschlechtert sich die Formgüte.

## Hysterese lernen und kompensieren

Kern der Kompensation ist es, die unvermeidliche Piezo-Hysterese im Voraus durch ihre eigene Invertierung zu beseitigen (Bild 2). Die Invertierung wird aus einem Modell der Hysterese berechnet. Für das Modell selbst wird ein mathematisches Verfahren angewandt, welches das Verhalten des speziellen Systems nachbildet.

In der Regel wird dieses Verfahren dann im Rahmen einer digitalen Regelung in einem Digitalen Signalprozessor (DSP) realisiert. Als Methode findet hier der Operator nach Prandtl-Ishlinskii [1, 2, 3] Verwendung. Als weiterer möglicher Algorithmus wäre das sogenannte Preisachmodell [2] zu nennen. Im Wesentlichen bestehen diese Verfahren aus einem Vektor mit Schwellwerten, die dem Aussteuerungsbereich des Aktuators angepasst sind. Ein weiterer Vektor enthält Koeffizienten, welche die Schwellwerte gewichten. Aus diesem Zusammenwirken kann man letzten Endes ein Modell für jede beliebige Hystereseform erzielen.

Bei der Wahl des Verfahrens spielt die Implementierbarkeit im DSP und insbesondere dessen Grenzen bei der zeitlichen Verarbeitung eine Rolle. In diesem Zusammenhang ist auch die Realisierung im FPGA (field programmable gate array) denkbar, welches den zeitkritischen Aspekt eines

implementierten Algorithmus vermeidet. Der Vorgang zur Gewinnung des eigentlichen Modells hat den Vorteil, dass sich dieses durch einen Lernprozess an das jeweilige System adaptiv anpassen lässt (Bild 3). Dies kann bei gesteuerten Systemen im Rahmen eines Testaufbaus einmalig mit Hilfe eines zusätzlichen Sensors geschehen. Bei geregelten Systemen ist der Sensor ein Teil des Systems, und das Lernen kann jederzeit im Prozessablauf bestimmt werden. Das so erlernte Modell verhält sich wie der echte Piezo-Aktuator und liefert bei gleicher Ansteuerung bis auf einen Restfehler die identische Auslenkung. Das lineare Verhalten des mechanischen Systems wird dabei nicht verändert.

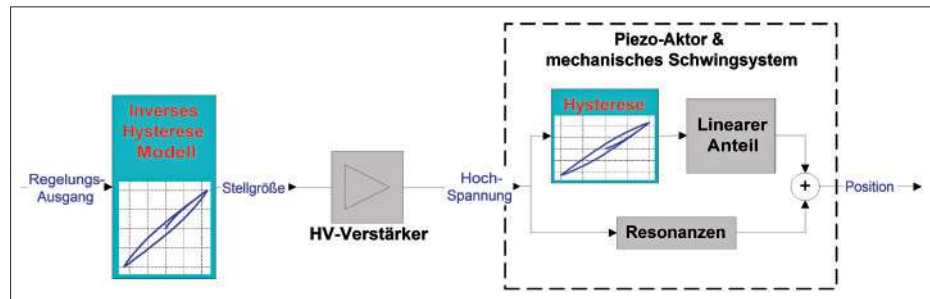
Das Lernen selbst basiert auf dem häufig angewandten Prinzip, den Fehler zwischen dem Ausgangssignal des „echten Systems“ und dem des Modells im Sinne des kleinsten mittleren quadratischen Fehlers (Least-Mean-Square, LMS) zu minimieren. Dies liefert nach einer bestimmten Konvergenzdauer (Lerndauer) den Koeffizienten-Vektor (Bild 4).

Mitentscheidend für die tatsächliche Verbesserung der Formgüte in einem Gesamtsystem ist auch die Ratenunabhängigkeit der betreffenden Hysterese. D. h., wie genau bildet das modellierte Hystereseverhalten das reale System in einem bestimmten Frequenzbereich nach? Beim Blick auf die Toleranzauslastung, des so in der Fertigung angewandten Verfahrens zeigt sich dessen Stärke gerade am eher ungünstigen Formzu-Regelungs-Verhältnis. Die zusätzliche Hysterese-Kompensation unterstützt die Regelung (100 Hz) gerade bei hochdynamischer Bearbeitung (Form mit Frequenzanteilen bis 400 Hz) im Hinblick auf die Formgüte bedeutend (Tabelle).

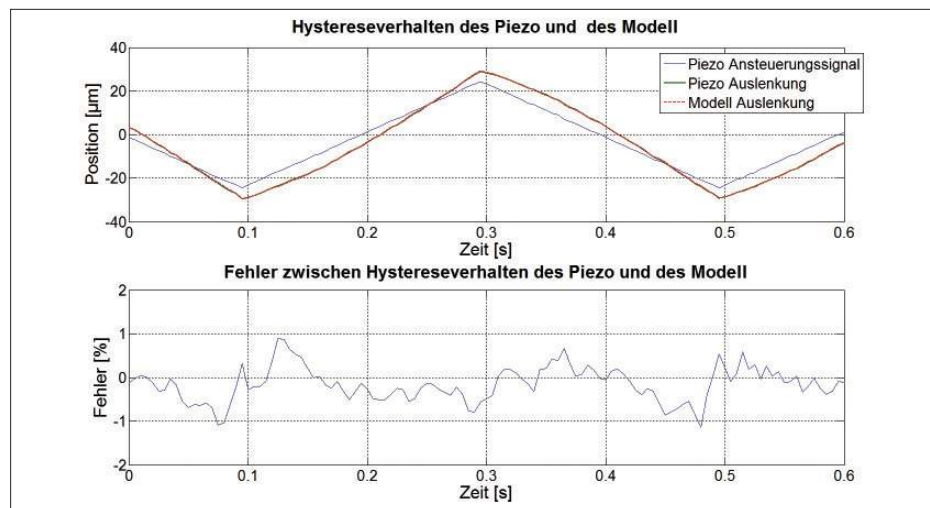
### Vielfältiger Einsatz, steigender Bedarf

Das vorgestellte Verfahren ist als Verbesserung der Systemgüte in den verschiedensten Anwendungen denkbar. Als Beispiel sei hier ein Kfz-Einspritzsystem betrachtet. Dort müssen von der Ventildnadel kleine Wege bei hoher Frequenz gefahren werden. Zum Einsatz kommen dabei piezoelektrische oder magnetostruktive Aktuatoren, welche die Anforderung an schnelle Antwortzeiten über den gesamten Drehzahlbereich des Motors gewährleisten können. Aufgrund von Platzmangel und Kosten werden diese Systeme ohne Sensoren realisiert. Mit einer entsprechenden Kompensation der Hysterese und der damit verbundenen Linearisierung dieser Festkörperaktoren ließe sich beispielsweise Einfluss auf die Einspritzgenauigkeit nehmen.

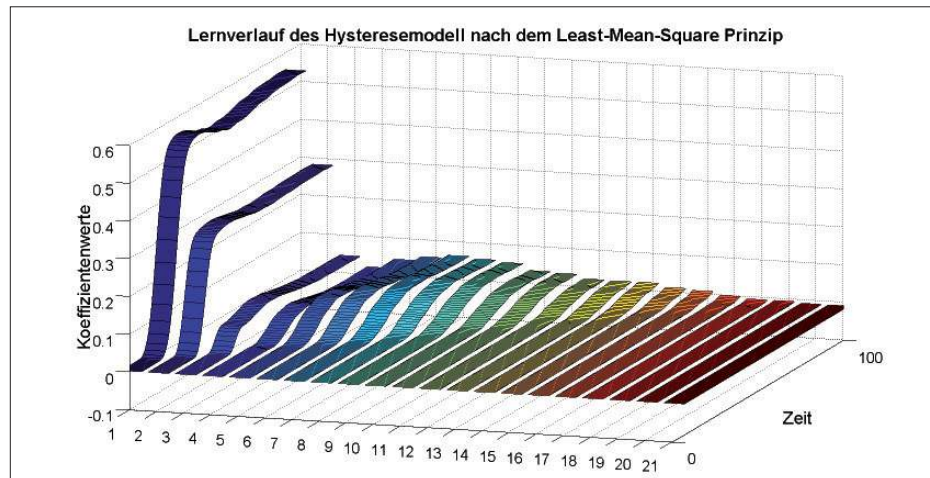
Blickt man in die Zukunft der Festkörperaktoren, dann ist von einem steigenden Bedarf auszugehen. Unter anderem erfordert gerade die fortschreitende Miniaturisierung mechatronischer Systeme neben immer kleineren Sensoren auch die entsprechenden Komponenten mit hoher Energiedichte auf Seite der Aktuatoren. Bei immer kleineren Abmessungen sollen hinreichend große Kräfte erzeugt werden. Dies erfüllen vor allem die aktiven Materialien der Festkörperaktoren sehr gut. Damit einher geht aber immer deren komplexes Hysterese-Verhalten und dort, wo sie nicht vernachlässigbar ist, die Notwendigkeit der Kompensation.



2: Prinzip der Hysteresekompensation durch Invertierung



3: Vergleich des „erlernten“ Hysterese-Modells mit Hysterese-Verhalten des Piezo-Aktors



4: Konvergieren des Hysterese-Modells zum realen Hysterese-Verhalten des Piezo-Aktors dargestellt durch die Modell-Koeffizienten

Nest Electronics [www.vfmz.net/3296280](http://www.vfmz.net/3296280)

**Literaturhinweise:**

[1] Van-Tsai Liu und Chia-Hsiang Li: *Modeling Hysteresis of the Piezoactuators with Prandtl-Ishlinskii Model*; 978-0-7695-3161-8/08, 2008 IEEE  
 [2] Dr. Ing. Klaus Kuhnen: *Kompensation komplexer gedächtnisbehafteter Nichtlinearitäten in Systemen mit aktiven Materialien*, Habilitationsschrift Universität Saarland; Shaker Verlag Aachen 2008  
 [3] Michael Ruderman and Torsten Bertram: *Discrete Dynamic Preisach Model for Robust Inverse Control of Hysteresis Systems*, 49th IEEE Conference on Decision and Control