

Inverse Steuerung für den Großsignalbetrieb von Piezoaktoren

Inverse Feedforward Control for the Large Signal Operation of Piezoelectric Actuators

Klaus Kuhnen und Hartmut Janocha

Der vorliegende Beitrag beschreibt ein neuartiges Steuerungskonzept für den Großsignalbetrieb von piezoelektrischen Aktoren, das die Abhängigkeit der Aktorauslenkung von der mechanischen Belastung, die infolge der endlichen Steifigkeit des Aktorwerkstoffes auftritt, kompensiert. Die zur Realisierung dieser Funktionalität benötigte Kenntnis über die momentane mechanische Belastung des Aktors gewinnt die Steuerung allein durch Rekonstruktion der Aktorbelastung aus den Messwerten der elektrischen Größen Spannung und Ladung, sodass keine zusätzlichen externen Sensoren benötigt werden. Zur Rekonstruktion der mechanischen Belastung greift die Steuerung auf die inhärenten sensorischen Eigenschaften des piezoelektrischen Werkstoffes zurück und verwendet ein auf Hysterese-, Kriech- und Superpositionoperatoren basierendes Signalverarbeitungskonzept, um die Messinformation, die aufgrund der elektrischen Großsignalansteuerung durch Hysterese-, Kriech- und Sättigungseffekte verfälscht ist, aus den elektrischen Messsignalen herauszufiltern. Als Ergebnis wird durch diesen neuartigen Steuerungstyp der durch Hysterese-, Kriech- und Sättigungseffekte sowie durch die Lastabhängigkeit verursachte Steuerungsfehler um etwa eine Größenordnung reduziert.

The paper describes a new feedforward control concept which permits the control of piezoelectric actuators in large-signal operation. The control compensates the mechanical load dependence resulting from the limited stiffness of the actuator material. The controller determines the momentary mechanical load on the actuator based on the measured electrical parameters voltage and charge – no additional sensor is needed. To reconstruct the value of the mechanical load, the controller makes use of the inherent sensory properties of the piezoelectric ceramic and a signal processing concept based on hysteresis, creep and superposition operators to filter the electrical signals of the distortion caused by hysteresis, creep and saturation. The controller error resulting from hysteresis, creep and saturation effects and the actuator load dependence is reduced of about one order of magnitude using this new feedforward control concept.

1 Einleitung

Einem verbreiteten Trend folgend wird seit einigen Jahren versucht, Aktoren durch den Einbezug von Mikroelektronik und Sensorik „intelligenter“ zu machen. Ziele sind beispielsweise die Verbesserung ihres statischen und dynamischen Übertragungsverhaltens und die Verwirklichung zusätzlicher Funktionen zur Selbstüberwachung und Fehlerdiagnose. Diese Entwicklung wird unterstützt durch die Verfügbarkeit immer leistungsfähigerer Mikroprozessoren sowie durch Fortschritte in den Bereichen Mikrosystemtechnik und Leistungshalbleiter [1]. Hierbei gewinnt die Integration von aktorischen und sensorischen Funktionen

in ein gemeinsames Gehäuse wachsende Bedeutung, wobei die geforderten Sensoreigenschaften derzeit oft noch mit aufgabenspeziellen, zusätzlichen Bauelementen realisiert werden, die in der Regel vom aktorischen Wirkort getrennt sind.

Die in multifunktionalen Werkstoffen, wie beispielsweise piezoelektrischen Keramiken, gleichzeitig vorhandenen inhärenten sensorischen und aktorischen Fähigkeiten lassen sich für den Aufbau von so genannten smarten Festkörperaktoren nutzen [2;3]. Ein smarterer Aktor ist dadurch gekennzeichnet, dass alle aus dem äußeren Prozess stammenden Informationen über Stellwege und Stellkräfte aus den elektrischen Signalen des Wandlers herausgefiltert wer-

den können und damit in demselben Wandlerelement und am selben Wirkort verfügbar sind [4]. Mit Hilfe einer geeigneten digitalen Signalverarbeitung lassen sich damit auf elegante Weise stark miniaturisierbare Aktoren mit nahezu beliebig einstellbarem – z. B. linearem, lastunabhängigem – Übertragungsverhalten bauen. Die multifunktionale Eigenschaft ist darüber hinaus wichtig für die Realisierung von adaptiven bzw. smarten Strukturen, wenn aktorische und sensorische Fähigkeiten direkt in einen (Multi-) Funktionswerkstoff zu integrieren sind [5; 6].

Die ersten Arbeiten, die sich mit der gleichzeitigen Nutzung der sensorischen und aktorischen Fähigkeiten innerhalb eines piezoelektrischen Wandlerelementes befassen haben, gehen auf [7] zurück und nutzen zur Rekonstruktion der mechanischen Größen Wandlermodelle, die auf linearen piezoelektrischen Materialbeziehungen beruhen und damit in ihrer Gültigkeit auf den elektrischen Kleinsignalbetrieb beschränkt sind. Fast allen darauffolgenden Arbeiten, die die inhärenten sensorischen Eigenschaften von piezoelektrischen Elementen zu Mess- und Regelungszwecken nutzen, ist gemein, dass sie die Folgen der elektrischen Großsignalansteuerung, nämlich nichtideales Übertragungsverhalten in Form von Kennlinienhysterese, Kriech- und Sättigungsercheinungen, vernachlässigen. Diese Vereinfachung kann zu erheblichen Fehlern bei der Rekonstruktion der mechanischen Messgrößen und damit zu einem Güte- oder gar Stabilitätsverlust von Regelungen führen. Aus diesem Grund wurde in jüngster Zeit versucht, mit Hilfe nichtlinearer Wandlermodelle die mechanischen Größen aus den elektrischen Messgrößen in Echtzeit rechnerisch zu rekonstruieren [8].

Auf der anderen Seite wurde gerade in den letzten Jahren verstärkt der Versuch unternommen, die im aktorischen Betrieb piezoelektrischer Wandler simultan auftretenden Hysterese-, Kriech- und Sättigungseffekte durch neuartige, nichtlineare Steuerungsverfahren zu kompensieren, die auf so genannten Hysterese-, Kriech- und Superpositionsoperatoren basieren [9–12]. Eine zusätzliche Kompensation der durch die endliche Steifigkeit der piezoelektrischen Keramik verursachten Abhängigkeit der Aktorauslenkung von der mechanischen Aktorbelastung erforderte aber bislang einen externen Kraftsensor zur Erfassung der externen Störgröße [13]. Da sich das Rekonstruktionsproblem zur Bestimmung der Aktorbelastung dual zum Steuerungsproblem formulieren lässt, kann es ebenfalls auf der Basis von Hysterese-, Kriech- und Superpositionsoperatoren gelöst werden [14].

Ziel des vorliegenden Beitrages ist es nun, die operatorbasierten Signalverarbeitungsverfahren zur On-line-Rekonstruktion der mechanischen Aktorbelastung mit den operatorbasierten Steuerungsverfahren zur On-line-Kompensation der Aktornichtlinearitäten so zu kombinieren, dass der daraus entstehende neue Steuerungstyp in der Lage ist, einen piezoelektrischen Aktor auch im elektrischen Großsignalbetrieb hysterese-, kriech- und sättigungsarm sowie lastunabhängig zu betreiben, ohne dafür externe Kraft- oder Wegsensoren verwenden zu müssen.

2 Grundlagen der operatorbasierten Modellbildung

2.1 Operatorbasierte Modellbildung komplexer hysteresebehafteter Nichtlinearitäten

Aufgrund ihres phänomenologischen Charakters erlaubt das um 1970 von Krasnosel'skii und Pokrovskii entwickelte Konzept der Hystereseoperatoren eine allgemein anwendbare und präzise Modellierung von komplexen Hystereseerscheinungen, wie sie beispielsweise in multifunktionalen Werkstoffen wie piezoelektrischen und magnetostriktiven Materialien sowie Formgedächtnislegierungen auftreten. Die grundsätzliche Idee dieser Methode besteht darin, reale hysteresebehaftete Nichtlinearitäten durch die gewichtete Überlagerung vieler elementarer Hystereseoperatoren nachzubilden [15].

Eine der bekanntesten und wichtigsten elementaren hysteresebehafteten Abbildungen zwischen dem Eingangssignal x und dem Ausgangssignal y eines Übertragungssystems ist der so genannte Playoperator

$$y(t) = H_{r_H} [x, y_{H0}] (t). \quad (1)$$

Der Playoperator ist für stückweise monotone Eingangssignale mit der Monotoniepartition $t_0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_i \leq t \leq t_{i+1} \dots \leq t_N = t_e$ durch die rekursive Beziehung

$$y(t) = \max\{x(t) - r_H, \min\{x(t) + r_H, y(t_i)\}\} \quad (2)$$

mit der Anfangsbedingung

$$y(t_0) = \max\{x(t_0) - r_H, \min\{x(t_0) + r_H, y_{H0}\}\} \quad (3)$$

für den Ausgangssignalwert zum Anfangszeitpunkt t_0 definiert [16]. Der Wert y_{H0} ist der unabhängige Anfangswert und $r_H \in \mathfrak{R}_0^+$ der charakteristische Schwellwertparameter des Playoperators. Bild 1 zeigt die y - x -Trajektorie des Playoperators. Aufgrund seiner Einfachheit ist der hier dargestellte elementare Hystereseoperator zur Modellbildung der in multifunktionalen Werkstoffen auftretenden Hystereseerscheinungen nicht ausreichend.

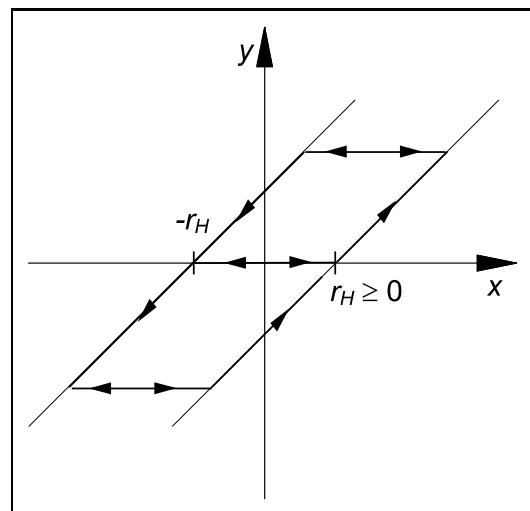


Bild 1: y - x -Trajektorie des Playoperators.

Ein leistungsfähigeres Modell für solche hysteresebefahenen Kennlinien lässt sich aber durch eine gewichtete lineare Superposition mehrerer Playoperatoren mit unterschiedlichen Schwellwerten r_H angeben. Aus dieser Vorgehensweise resultiert der so genannte schwellwertdiskrete Prandtl-Ishlinskii-Hystereseeoperator

$$H[x](t) := \sum_{i=0}^n w_{Hi} H_{r_{Hi}}[x, z_{H0i}](t), \quad (4)$$

mit den Schwellwerten $0 = r_{H0} < r_{H1} < \dots < r_{Hn} < +\infty$, den Gewichten $w_{H0}, w_{H1}, \dots, w_{Hn}$ und den Anfangswerten $z_{H00}, z_{H01}, \dots, z_{H0n}$ der Elementaroperatorausgänge. Diese bilden den inneren Systemzustand bzw. das Gedächtnis des schwellwertdiskreten Prandtl-Ishlinskii-Hystereseeoperators.

Eine wichtige Eigenschaft des Prandtl-Ishlinskii-Hystereseeoperators besteht darin, dass das zu ihm inverse Übertragungsglied unter der Bedingung

$$w_{H0} > 0 \wedge w_{Hi} \geq 0, \quad i = 1 \dots n \quad (5)$$

existiert und ebenfalls ein Prandtl-Ishlinskii-Hystereseeoperator ist [9; 17]. Daraus folgt für den inversen Operator die Darstellung

$$H^{-1}[y](t) := \sum_{i=0}^n w'_{Hi} H'_{r'_{Hi}}[y, z'_{H0i}](t) \quad (6)$$

mit den transformierten Schwellwerten $r'_{H0}, r'_{H1}, \dots, r'_{Hn}$, den Gewichten $w'_{H0}, w'_{H1}, \dots, w'_{Hn}$ und den Anfangswerten $z'_{H00}, z'_{H01}, \dots, z'_{H0n}$. Die Transformationsgleichungen

$$w'_{H0} = \frac{1}{w_{H0}}, \quad (7)$$

$$r'_{H0} = 0, \quad (8)$$

$$z'_{H00} = \sum_{j=0}^n w_{Hj} z_{H0j}, \quad (9)$$

und

$$w'_{Hi} = - \frac{w_{Hi}}{\left(w_{H0} + \sum_{j=1}^i w_{Hj} \right) \left(w_{H0} + \sum_{j=1}^{i-1} w_{Hj} \right)}, \quad (10)$$

$$r'_{Hi} = \sum_{j=0}^i w_{Hj} (r_{Hi} - r_{Hj}), \quad (11)$$

$$z'_{H0i} = \sum_{j=0}^i w_{Hj} z_{H0i} + \sum_{j=i+1}^n w_{Hj} z_{H0j}, \quad (12)$$

$i = 1 \dots n$, die zur Berechnung der Gewichte, Schwellwerte und Anfangswerte der Elementaroperatorausgänge des inversen Prandtl-Ishlinskii-Hystereseeoperators aus den Gewichten, Schwellwerten und Anfangswerten der Elementaroperatorausgänge des Prandtl-Ishlinskii-Hystereseeoperators benötigt werden, sind in [9] im Detail dargestellt. Sie

ermöglichen die Bildung eines inversen Filters zur Kompensation des hysteresebefahenen Übertragungsverhaltens. Dadurch werden zeitaufwendige Iterationsrechnungen, die bei den sonst üblichen numerischen Invertierungsverfahren auftreten, vermieden, sodass der Prandtl-Ishlinskii-Hystereseeoperator für den Einsatz in Echtzeitanwendungen besonders gut geeignet ist.

2.2 Operatorbasierte Modellbildung von $\log(t)$ -Kriechprozessen

Kriechen wird als zeitabhängiges Verformungsverhalten fester Materialien definiert, das infolge der Einwirkung plötzlicher mechanischer Belastungen hervorgerufen wird, aber nicht von Trägheitseffekten herrührt [18]. Bei piezoelektrischen Werkstoffen sind zwischen den physikalischen Größen Auslenkung und elektrische Spannung sowie elektrische Ladung und elektrische Spannung sehr ähnliche Übertragungseffekte zu beobachten. Allerdings existiert hierfür historisch bedingt eine andere Bezeichnung.

Kriechprozesse, bei denen das Ausgangssignal nach Anregung mit einem sprungförmigen Eingangssignal logarithmisch mit der Zeit wächst, werden $\log(t)$ -Kriechprozesse genannt. Ein typisches Beispiel für einen solchen Kriechprozess ist das Kriechverhalten piezoelektrischer Aktoren [19]. Die Kriechdynamik eines $\log(t)$ -Kriechprozesses ist dadurch charakterisiert, dass sich das Ausgangssignal für den Fall einer sprungförmigen Anregung zum Anfangszeitpunkt $t_0 = 0$ für Zeiten $t \geq T_s > 0$ durch eine Funktion der Form

$$y(t) = y(T_s) + \gamma \log\left(\frac{t}{T_s}\right) \quad (13)$$

beschreiben lässt. Der Wert $y(T_s)$ ist der Anteil der Kriechens, der zwischen dem Anfangszeitpunkt $t_0 = 0$ der Kriechanregung und dem Zeitpunkt $t = T_s$ entsteht und bei einer endlichen Zeitaufösung nur anhand des Gleichanteils in der Sprungantwort des Kriechprozesses zum Zeitpunkt $t = T_s$ zu beobachten ist. Der Parameter γ ist der Gewichtungsfaktor des $\log(t)$ -Kriechens und ein Maß für die Kriechneigung des Materials.

Kriechbefahentem Übertragungsverhalten kommt somit, ähnlich wie hysteresebefahentem, eine über die Grenzen der Mechanik hinausgehende Bedeutung zu, sodass eine an die Behandlung von komplexen Hysteresephänomenen angelehnte Vorgehensweise zur phänomenologischen Beschreibung von Kriechprozessen sinnvoll erscheint.

Vor diesem Hintergrund wird der so genannte elementare, schwellwertbefahente Kriechoperator

$$y(t) = K_{r_K a_K} [x, y_{K0}](t), \quad (14)$$

als Lösung der nichtlinearen, zeitinvarianten Differentialgleichung

$$\frac{d}{dt} y(t) = a_K \max\{x(t) - y(t) - r_K, \min\{x(t) - y(t) + r_K, 0\}\} \quad (15)$$

mit der Anfangsbedingung $y_{K0} = y(t_0)$ zum Anfangszeitpunkt t_0 eingeführt [12]. Die charakteristischen Parameter dieses elementaren, schwellwertbehafteten Kriechoperators sind der so genannte Kriecheigenwert $a_K \in \mathfrak{R}^+$ und der Schwellwert $r_K \in \mathfrak{R}_0^+$. Bild 2 zeigt die Sprungantwort y des elementaren, schwellwertbehafteten Kriechoperators mit dem Anfangszustand $y_{K0} = 0$ über der logarithmisch transformierten Zeitachse für verschiedene Kriecheigenwerte, die entsprechend der Vorschrift

$$a_{Kj} = \frac{1}{10^{j-1}T_s}; \quad j = 1 \dots m \tag{16}$$

exponentiell über die reziproke Zeitachse verteilt sind. Der Parameter T_s entspricht dabei der Länge des Zeitintervalls aus Gl. (13).

Die ungewichtete Summation der entsprechenden elementaren, schwellwertbehafteten Kriechoperatoren erzeugt bei exponentieller Verteilung der Kriecheigenwerte nach Gl. (16) eine annähernd linear über der logarithmisch transformierten Zeitachse verlaufende Sprungantwort und ist

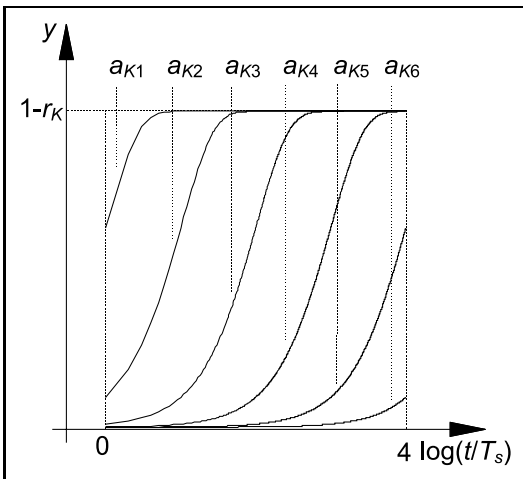


Bild 2: Sprungantworten elementarer, schwellwertbehafteter Kriechoperatoren über der logarithmischen Zeitachse.

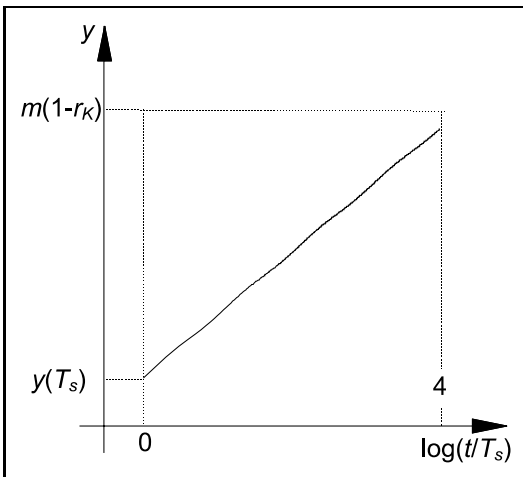


Bild 3: Sprungantwort des schwellwertbehafteten $\log(t)$ -Kriechoperators über der logarithmischen Zeitachse.

daher prinzipiell in der Lage, die Kriechdynamik von $\log(t)$ -Kriechprozessen zu approximieren. Dieser Sachverhalt ist in Bild 3 dargestellt.

Die ungewichtete Überlagerung elementarer, schwellwertbehafteter Kriechoperatoren mit Kriecheigenwerten nach Gl. (16) wird deshalb auch als schwellwertbehafteter $\log(t)$ -Kriechoperator bezeichnet. In der Regel ist die Stärke, mit der die $\log(t)$ -Kriechdynamik durch das Eingangssignal angeregt wird, von der Vorgeschichte des Eingangssignals abhängig [20]. Diese Abhängigkeit lässt sich durch einen schwellwertbehafteten $\log(t)$ -Kriechoperator allein nicht ausreichend nachbilden. Allerdings kann man den Effekt analog zur Modellierung von Hystereseeffekten durch den Prandtl-Ishlinskii-Hystereseeoperator H durch die gewichtete, lineare Superposition mehrerer schwellwertbehafteter $\log(t)$ -Kriechoperatoren mit unterschiedlichen Schwellwerten berücksichtigen. Daraus resultiert die Definition des so genannten Prandtl-Ishlinskii-Kriechoperators für $\log(t)$ -Kriechprozesse,

$$K[x](t) := \sum_{i=0}^n w_{Ki} \sum_{j=1}^m K_{r_{Ki} a_{Kj}} [x, z_{K0ij}](t), \tag{17}$$

mit den Schwellwerten $0 = r_{K0} < r_{K1} < \dots < r_{Kn} < +\infty$, den Gewichten $w_{K0}, w_{K1}, \dots, w_{Kn}$ und den Anfangswerten $z_{K001}, z_{H002}, \dots, z_{H0nm}$ der Elementaroperatorausgänge.

Nach [15] gilt für den elementaren, schwellwertbehafteten Kriechoperator unter der Bedingung $r_K = r_H$ und $y_{K0} = \max\{x(t_0) - r_K, \min\{x(t_0) + r_K, y_{H0}\}\}$ die asymptotische Beziehung

$$\lim_{a_K \rightarrow \infty} K_{r_K a_K} [x, y_{K0}](t) = H_{r_H} [x, y_{H0}](t). \tag{18}$$

Dieser Operator konvergiert somit für unendlich langsame Eingangssignale gegen den Playoperator. Daraus ergibt sich für den Prandtl-Ishlinskii-Kriechoperator der Zusammenhang

$$\lim_{\frac{d}{dt}x(t) \rightarrow 0} K[x](t) = H[x](t) \tag{19}$$

mit $w_{Hi} = m \cdot w_{Ki}$. Folglich beschreibt der Prandtl-Ishlinskii-Kriechoperator K $\log(t)$ -Kriechprozesse, die unter stationären Bedingungen gegen eine komplexe hystereseebehaftete Nichtlinearität vom Prandtl-Ishlinskii-Typ konvergieren.

2.3 Operatorbasierte Modellbildung von gedächtnislosen Nichtlinearitäten

Aufgrund der Tatsache, dass die y - x -Trajektorie des Playoperators bezüglich des Koordinatenursprungs der y - x Ebene punktsymmetrisch verläuft, weist auch der Prandtl-Ishlinskii-Hystereseeoperator diese einschränkende Punktsymmetrieeigenschaft auf. Eine Möglichkeit, die Prandtl-Ishlinskii-Methode auf hystereseebehaftete Übertragungsglieder mit unsymmetrischen y - x -Trajektorien zu erweitern, besteht darin, die Abweichung des realen von dem punkt-

symmetrischen, hysteresebefahenen Übertragungsverhalten durch eine nachgeschaltete, unsymmetrische und eindeutige Kennlinie zu berücksichtigen.

Eine in Naturwissenschaft und Technik häufig verwendete Methode zur Approximation eindeutiger Kennlinien besteht darin, diese durch eine gewichtete, lineare Überlagerung elementarer Funktionen nachzubilden. Die nachfolgend beschriebene Methode zur Approximation eindeutiger Kennlinien basiert auf demselben Prinzip und verwendet als Elementarglieder so genannte Superpositionsoperatoren [11]. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass ihr Übertragungsverhalten gedächtnislos ist. Das bedeutet, dass bei Superpositionsoperatoren der Ausgangssignalwert $y(t)$ zum Zeitpunkt t ausschließlich vom Wert des Eingangssignals $x(t)$ zum Zeitpunkt t bestimmt wird. Damit lässt sich jeder Superpositionsoperator auf eine Funktionsabbildung zurückführen. Das resultierende Kennlinienmodell wird aufgrund seiner Ähnlichkeit mit den Prandtl-Ishlinskii-Operatoren für Hysterese- und Kriecheffekte als Prandtl-Ishlinskii-Superpositionsoperator bezeichnet.

Als elementarer Superpositionsoperator wird der so genannte einseitige Totzonenoperator

$$y(t) = S_{r_s}[x](t) \tag{20}$$

eingesetzt, der durch die Funktion

$$y(t) = \begin{cases} \max\{x(t) - r_s, 0\} & ; r_s > 0 \\ x(t) & ; r_s = 0 \\ \min\{x(t) - r_s, 0\} & ; r_s < 0 \end{cases} \tag{21}$$

zwischen den Momentanwerten des Ausgangs- und des entsprechenden Eingangssignals definiert ist. Der Parameter $r_s \in \mathfrak{R}$ ist der charakteristische Schwellwertparameter dieses elementaren Superpositionsoperators. Bild 4 zeigt die y - x -Trajektorie des einseitigen Totzonenoperators.

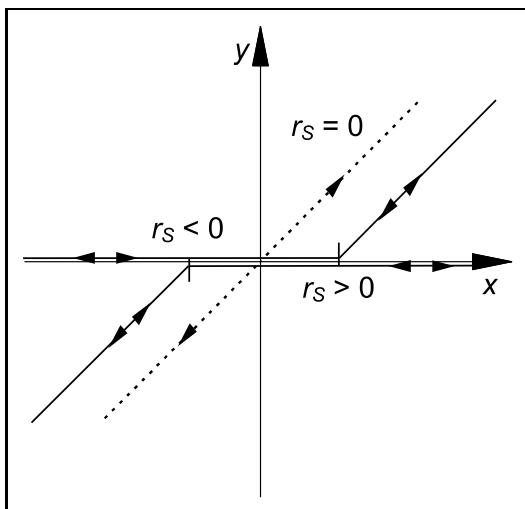


Bild 4: y - x -Trajektorie des einseitigen Totzonenoperators.

Der Prandtl-Ishlinskii-Superpositionsoperator S ergibt sich aus der gewichteten, linearen Überlagerung mehrerer einseitiger Totzonenoperatoren mit unterschiedlichen Schwellwerten r_s . Daraus folgt

$$S[x](t) := \sum_{i=-l}^{+l} w_{Si} S_{r_{Si}}[x](t) \tag{22}$$

mit den Schwellwerten $-\infty < r_{S-l} < \dots < r_{S0} = 0 < \dots < r_{Sl} < +\infty$ und den Gewichten $w_{S-l}, \dots, w_{S0}, \dots, w_{Sl}$. Die Approximation eindeutiger Kennlinien erfolgt somit stückweise linear, wobei die Nachbildung in der Regel umso genauer wird, je mehr Elementaroperatoren zur Bildung des Operators S verwendet werden.

Der inverse Operator S^{-1} existiert unter den Bedingungen

$$\sum_{j=-i}^0 w_{Sj} > 0 \quad \wedge \quad \sum_{j=0}^i w_{Sj} > 0, \tag{23}$$

$i = 0, \dots, l$ und ist ebenfalls ein Prandtl-Ishlinskii-Superpositionsoperator [11]. Daraus folgt für den inversen Operator

$$S^{-1}[y](t) := \sum_{i=-l}^{+l} w'_{Si} S_{r'_{Si}}[y](t), \tag{24}$$

wobei die transformierten Schwellwerte $r'_{S-l}, \dots, r'_{S0}, \dots, r'_{Sl}$ und Gewichte $w'_{S-l}, \dots, w'_{S0}, \dots, w'_{Sl}$ aus den Schwellwerten $r_{S-l}, \dots, r_{S0}, \dots, r_{Sl}$ und den Gewichten $w_{S-l}, \dots, w_{S0}, \dots, w_{Sl}$ durch Anwendung der Transformationsgleichungen

$$w'_{S0} = \frac{1}{w_{S0}}, \tag{25}$$

$$r'_{S0} = 0 \tag{26}$$

und

$$w'_{Si} = - \frac{w_{Si}}{\left(w_{S0} + \sum_{j=1}^i w_{Sj} \right) \left(w_{S0} + \sum_{j=1}^{i-1} w_{Sj} \right)}, \tag{27}$$

$$r'_{Si} = \sum_{j=0}^i w_{Sj} (r_{Si} - r_{Sj}), \tag{28}$$

für $i = 1, \dots, l$ sowie

$$w'_{Si} = - \frac{w_{Si}}{\left(w_{S0} + \sum_{j=i}^{-1} w_{Sj} \right) \left(w_{S0} + \sum_{j=i+1}^{-1} w_{Sj} \right)}, \tag{29}$$

$$r'_{Si} = \sum_{j=i}^0 w_{Sj} (r_{Si} - r_{Sj}), \tag{30}$$

für $i = -l, \dots, -1$, hervorgehen [11].

2.4 Kombinierte Modellbildung von Hysterese-, Kriech- und Sättigungseffekten

Mit den in den vorangehenden Abschnitten definierten Superpositions-, Hysterese- und Kriechoperatoren lassen sich durch Kombination verschiedene Modelle zur Beschreibung von hysterese-, kriech- und sättigungsbehafteten Übertragungsgliedern, wie beispielsweise piezoelektrischen Aktoren, bilden. Von besonderem Interesse ist hierbei der durch Parallelschaltung des Prandtl-Ishlinskii-Hystereseoperators H und des Prandtl-Ishlinskii-Kriechoperators K definierte Prandtl-Ishlinskii-Kriech-Hystereseoperator,

$$\Pi[x](t) := H[x](t) + K[x](t), \quad (31)$$

zur Nachbildung gleichzeitig auftretender Hysterese- und $\log(t)$ -Kriecheffekte. Dieser verhält sich für unendlich langsame Eingangssignale wie ein Prandtl-Ishlinskii-Hystereseoperator und ist daher in seiner Anwendbarkeit auf Übertragungsglieder mit den zuvor diskutierten Punktsymmetrieeigenschaften beschränkt.

Die Berücksichtigung von Unsymmetrien, wie sie beispielsweise durch unsymmetrisch wirkende Sättigungseffekte entstehen, erfolgt im Rahmen dieses Modellbildungsansatzes durch eine gedächtnislose, nichtlineare Verzerrung mit Hilfe eines nachgeschalteten Prandtl-Ishlinskii-Superpositionsoperators S . Aus diesem Gedankengang resultiert der so genannte modifizierte Prandtl-Ishlinskii-Kriech-Hystereseoperator

$$\Gamma[x](t) := S[\Pi[x]](t), \quad (32)$$

der im weiteren Verlauf zur Modellbildung gleichzeitig auftretender Hysterese-, $\log(t)$ -Kriech- und Sättigungseffekte verwendet wird.

Der zur Realisierung eines inversen Filters benötigte inverse Operator

$$\Gamma^{-1}[y](t) = \Pi^{-1}[S^{-1}[y]](t) \quad (33)$$

ergibt sich aus der Invertierung des Prandtl-Ishlinskii-Superpositionsoperators S und des Prandtl-Ishlinskii-Kriech-Hystereseoperators Π sowie einer Vertauschung ihrer Reihenfolge. Während der inverse Operator S^{-1} vorab aus dem Operator S mit Hilfe der Gl. (25)–(30) berechnet werden kann, ist die Bildung des inversen Operators Π^{-1} äquivalent zur Lösung der Operatorgleichung

$$\Pi^{-1}[y](t) \Leftrightarrow x(t) = H^{-1}[y - K[x]](t) \quad (34)$$

und muss in der Regel numerisch erfolgen. Ein effizientes Einschrittverfahren, das ohne Iterationsrechnungen auskommt und daher für Echtzeitanwendungen besonders gut geeignet ist, wird in [9] beschrieben. Es benötigt die explizite Kenntnis des inversen Operators H^{-1} . Dieser lässt sich vorab aus dem Operator H mit Hilfe der Gl. (7)–(12) berechnen.

3 Operatorbasierte Steuerung und Signalverarbeitung

3.1 Operatorbasierte Modellbildung piezoelektrischer Aktoren

In vielen technischen Anwendungen werden piezoelektrische Aktoren als Stapelwandler eingesetzt. Der Aufbau eines solchen Stapelwandlers ist in Bild 5 dargestellt. In diesem Fall lassen sich die Vektoren der elektrischen Feldstärke und der dielektrischen Verschiebungsdichte sowie die Tensoren der mechanischen Spannung und der mechanischen Dehnung durch ihre skalaren Komponenten in Wirkrichtung ersetzen. Da die Feldgrößen zudem homogen sind, kann der Wandler durch die einfach messbaren integralen elektrischen Größen Spannung U und Ladung q sowie die mechanischen Größen Kraft F und Stellweg s charakterisiert werden.

Im konventionellen Aktorbetrieb wird der piezoelektrische Wandler mit einer eingepprägten Spannung U angesteuert, und er erzeugt aufgrund des inversen piezoelektrischen Effektes eine Auslenkung s seiner Stirnfläche gegen die mechanische Umgebung. Elektrisch reagiert der Wandler auf die Spannungsansteuerung mit einer spannungsabhängigen Änderung seiner Ladung q zwischen den elektrischen Klemmen. Aufgrund des spannungsabhängigen Auslenkungsanteils erzeugt die den Wandler kraftschlüssig umgebende mechanische Struktur eine Reaktionskraft F auf die Stirnfläche des Wandlers. Neben dem spannungsabhängigen Auslenkungs- und Ladungsanteil ruft diese Reaktionskraft aufgrund von Materialelastizitäten und aufgrund des direkten piezoelektrischen Effektes einen kraftabhängigen Auslenkungs- und Ladungsanteil hervor.

Im aktorischen Betrieb wird der piezoelektrische Wandler zur Erzeugung möglichst großer Auslenkungen mit hohen Spannungsamplituden angesteuert. Dadurch werden im Innern der piezoelektrischen Keramik elektrisch Domänenumklappprozesse angeregt, die sich dem dielektrischen und dem inversen piezoelektrischen Verhalten überlagern und so im elektrischen und aktorischen Übertragungsverhalten ausgeprägte Hysterese-, Kriech- und Sättigungseffekte hervorrufen [9]. Im Gegensatz dazu sind unter normalen

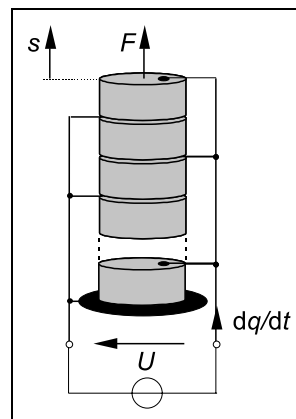


Bild 5: Piezowandler in Stapelbauweise.

Betriebsbedingungen die Kraftamplituden klein, sodass der Anteil der mechanisch angeregten Domänenumklappprozesse im Vergleich zu dem Anteil der elektrisch angeregten gering ist. Das sensorische und mechanische Verhalten des piezoelektrischen Wandlers wird dann überwiegend durch den direkten piezoelektrischen Effekt und die Elastizität des Wandlers bestimmt. Diese Überlegungen rechtfertigen zumindest in erster Näherung eine additive Aufspaltung der elektrischen Ladung q und der Wanderauslenkung s in je einen spannungs- und kraftabhängigen Anteil, sodass sich unter den gemachten Voraussetzungen das Übertragungsverhalten piezoelektrischer Wandler durch die Operatorgleichungen

$$q(t) = \Gamma_E[U](t) + \Gamma_S[F](t) \tag{35}$$

und

$$s(t) = \Gamma_A[U](t) + \Gamma_M[F](t) \tag{36}$$

ausdrücken lässt. Gl. (35) wird als Sensorgleichung und Gl. (36) als Aktorgleichung bezeichnet. Aufbauend auf dem Sensor- und Aktormodell (35) und (36) können nun Steuerungs- und Signalverarbeitungskonzepte entwickelt werden.

3.2 Operatorbasiertes Steuerungskonzept

Ausgehend von dem operatorbasierten Aktormodell nach Gl. (36) lässt sich ein operatorbasiertes Steuerungskonzept für piezoelektrische Stapelaktoren ableiten, welches sowohl Hysterese-, Kriech- und Sättigungseffekte im aktorischen Übertragungspfad als auch den Einfluss der Kraft auf die Auslenkung des Aktors über den mechanischen Übertragungspfad kompensieren kann [10]. Dazu wird dem piezoelektrischen Wandler ein Kompensationsfilter vorgeschaltet, das der Operatorgleichung

$$U(t) = \Gamma_A^{-1} [s_{soll} - \Gamma_M[F]](t) \tag{37}$$

genügt. Die Operatorgleichung ergibt sich aus dem operatorbasierten Aktormodell (36) durch Auflösen nach der Ansteuerspannung. In der Bezeichnung ‚inverse Kompensationssteuerung‘ kommt zum Ausdruck, dass das Steuerungskonzept hauptsächlich auf dem inversen Operator Γ_A^{-1} basiert. Bild 6 zeigt den Signalflussplan der inversen Kompensationssteuerung.

3.3 Operatorbasiertes Signalverarbeitungskonzept

Aufgrund der inhärenten sensorischen Eigenschaften piezoelektrischer Materialien können piezoelektrische Stapelwandler während des aktorischen Betriebs auch sensorisch arbeiten. Die Information über die momentane mechanische Belastung und die momentane Auslenkung des Wandlers steckt bei Spannungssteuerung des Wandlers in der elektrischen Reaktionsgröße, also der elektrischen Ladung q . Außerdem wird die Ladung q , falls der Wandler gleichzeitig aktorisch betrieben wird, stark von der Ansteuerspannung U beeinflusst. Dieser Sachverhalt spiegelt sich im Sensormodell Gl. (35) des Stapelwandlers wider. Um während des aktorischen Wandlerbetriebes Informationen über die mechanische Belastung F und Auslenkung s des Wandlers zu bekommen, werden die elektrischen Klemmengrößen Spannung U und Ladung q gemessen und daraus die auf den Wandler wirkende Kraft F rekonstruiert. Das dazu eingesetzte inverse Rekonstruktionsfilter lässt sich aus der operatorbasierten Sensorgleichung (35) durch Auflösen nach der Kraft F ableiten [11]. Die operatorbasierte Filtergleichung zur Rekonstruktion des Kraftsignals lautet dann

$$F_{rec}(t) = \Gamma_S^{-1} [q - \Gamma_E[U]](t) . \tag{38}$$

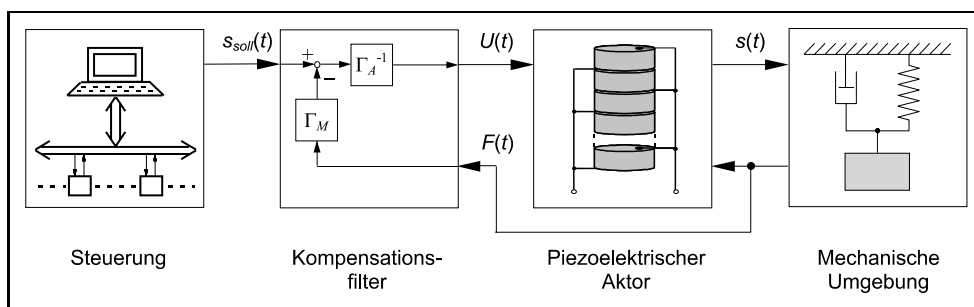


Bild 6: Invers gesteuertes piezoelektrisches Wandler.

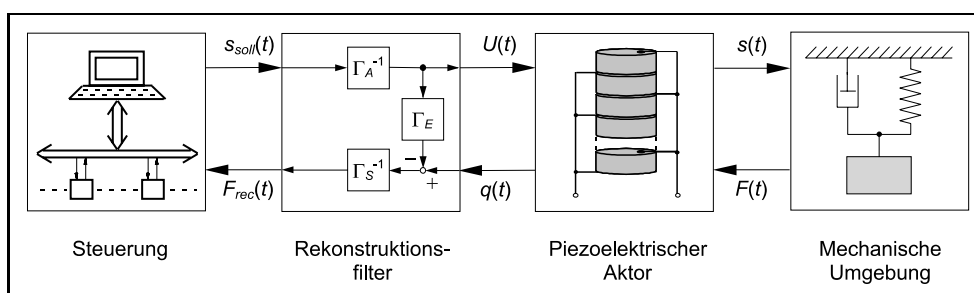


Bild 7: Invers gesteuertes, smarteres piezoelektrisches Aktor.

Bild 7 zeigt den Signalflussplan des inversen Rekonstruktionsfilters für die auf den Wandler wirkende Kraft F .

Eine entsprechende operatorbasierte Filtergleichung

$$s_{rec}(t) = \Gamma_A[U](t) + \Gamma_M[\Gamma_S^{-1}[q - \Gamma_E[U]]](t) \quad (39)$$

zur Rekonstruktion der Wanderauslenkung s erhält man durch Einsetzen der operatorbasierten Filtergleichung (38) zur Rekonstruktion der Kraft F in das operatorbasierte Aktormodell (36).

3.4 Smartes operatorbasiertes Steuerungskonzept

Das inverse Steuerungskonzept benötigt zur Kompensation des Krafteinflusses Information über die momentan auf den piezoelektrischen Wandler wirkende Kraft F . Diese kann beispielsweise durch einen externen Kraftsensor im Kraftfluss des piezoelektrischen Wandlers gewonnen werden. Eine elegantere Möglichkeit zur Bestimmung der Kraft F besteht jedoch darin, die mit dem inversen Rekonstruktionsfilter (38) rekonstruierte Kraft F_{rec} auf die inverse Kompensationssteuerung zurückzukoppeln. Dadurch wird im Hinblick auf die Kompensation von Hysterese-, Kriech- und Sättigungseffekten im aktorischen Übertragungspfad sowie von Krafteinflüssen über den mechanischen Übertragungspfad kein externer Sensor mehr benötigt. Die inverse Kompensationssteuerung nutzt damit zur Kompensation des Krafteinflusses die inhärenten sensorischen Eigenschaften des piezoelektrischen Wandlers während des invers gesteuerten aktorischen Betriebes und kann daher in Anlehnung an den Begriff des smarten Aktors als smarte inverse Steuerung bezeichnet werden.

Die operatorbasierten Steuerungs- und Filtergleichungen ergeben sich aus der Kombination des operatorbasierten Steuerungs- und Filtermodells der beiden vorangegangenen Abschnitte. Die Berechnung der inversen Ansteuerspannung U in Abhängigkeit des Auslenkungswertes s_{soll} und des Ladungsmesswertes q lässt sich grundsätzlich auf die Lösung der Operatorgleichung

$$U(t) = \Gamma_A^{-1}[s_{soll} - \Gamma_M[\Gamma_S^{-1}[q - \Gamma_E[U]]]](t) \quad (40)$$

zurückführen. Bild 8 zeigt den Signalflussplan des kombinierten Steuerungs- und Signalverarbeitungskonzeptes.

Die Lösung der Operatorgleichung (40) erfordert ein iteratives numerisches Berechnungsverfahren, das einen hohen

Rechenaufwand mit sich bringt und damit für Echtzeitanwendungen weniger geeignet ist als ein nicht iteratives Lösungsverfahren. Die Iterationsrechnung kann aber umgangen werden, wenn zusätzlich zur Ladung q die Spannung U am Wandler explizit gemessen und in die rechte Seite der Operatorgleichung (40) zur Berechnung des nächsten Ansteuerspannungswertes eingesetzt wird. Diese Vorgehensweise setzt bei einer digitalen Realisierung der Steuerung jedoch eine quasikontinuierliche Abtastung voraus, damit dynamische Effekte, die durch eine endliche Abtastfrequenz entstehen, vernachlässigt werden können.

4 Mess- und Rechenergebnisse

Im Rahmen dieses Kapitels wird die Leistungsfähigkeit des operatorbasierten Steuerungs- und Signalverarbeitungskonzeptes am Beispiel des kommerziellen piezoelektrischen Mikropositionierantriebes P-753 LISA der Fa. Physik Instrumente demonstriert. LISA-Systeme sind mit einem piezoelektrischen Niedervolt-Stapelwandler ausgerüstet, der in ein Führungssystem mit Festkörpergelenken integriert ist.

Die Mess- und Prüfumgebung des Mikropositioniersystems besteht aus Sensoren zur Messung der elektrischen Spannung U , der elektrischen Ladung q , der Aktorbelastung F , und der Auslenkung s des piezoelektrischen Linearantriebs sowie aus einer Spannungsquelle für die elektrische Ansteuerung des Aktors und einer Kraftquelle, die es gestattet, den Aktor extern mechanisch definiert zu belasten.

Mit Hilfe dieser Mess- und Prüfeinrichtung lässt sich das Ausgang-Eingang-Übertragungsverhalten des elektrischen, sensorischen, aktorischen und mechanischen Übertragungspfad experimentell bestimmen und zur Identifikation der in den operatorbasierten Modellen Γ_E , Γ_S , Γ_A und Γ_M vorkommenden Schwellwerte und Gewichte heranziehen. Identifikationsverfahren zur optimalen Anpassung der Operatoren Γ_E , Γ_S , Γ_A und Γ_M an die gemessenen Ausgang-Eingang-Messdaten werden in [12] ausführlich diskutiert. In Bild 9 sind links die gemessenen und rechts die mit den Operatoren Γ_E , Γ_S , Γ_A und Γ_M berechneten Trajektorien nach erfolgter Modellanpassung dargestellt. Hierbei wurden für Γ_E und Γ_A die Modellordnungen $n = m = 2l = 6$, für Γ_S die Modellordnungen $n = 2$ und $m = 2l = 0$ und für Γ_M die Modellordnungen $n = m = 2l = 0$ gewählt. Zusätzlich sind rechts in Bild 9 die Trajektorien grau eingezeichnet, die bei Verwendung der jeweils besten linearen Approxi-

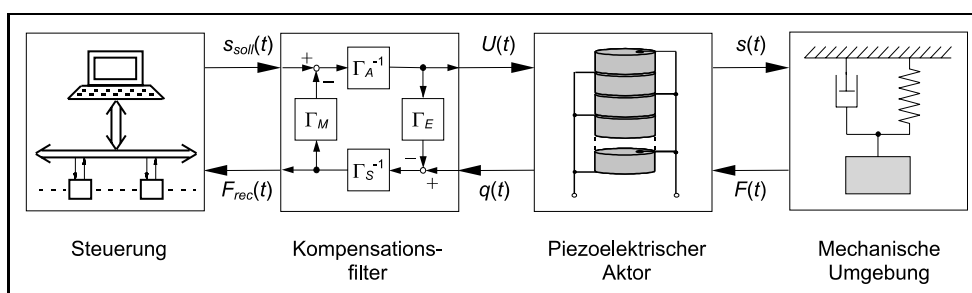


Bild 8: Smarte inverse Kompensationssteuerung.

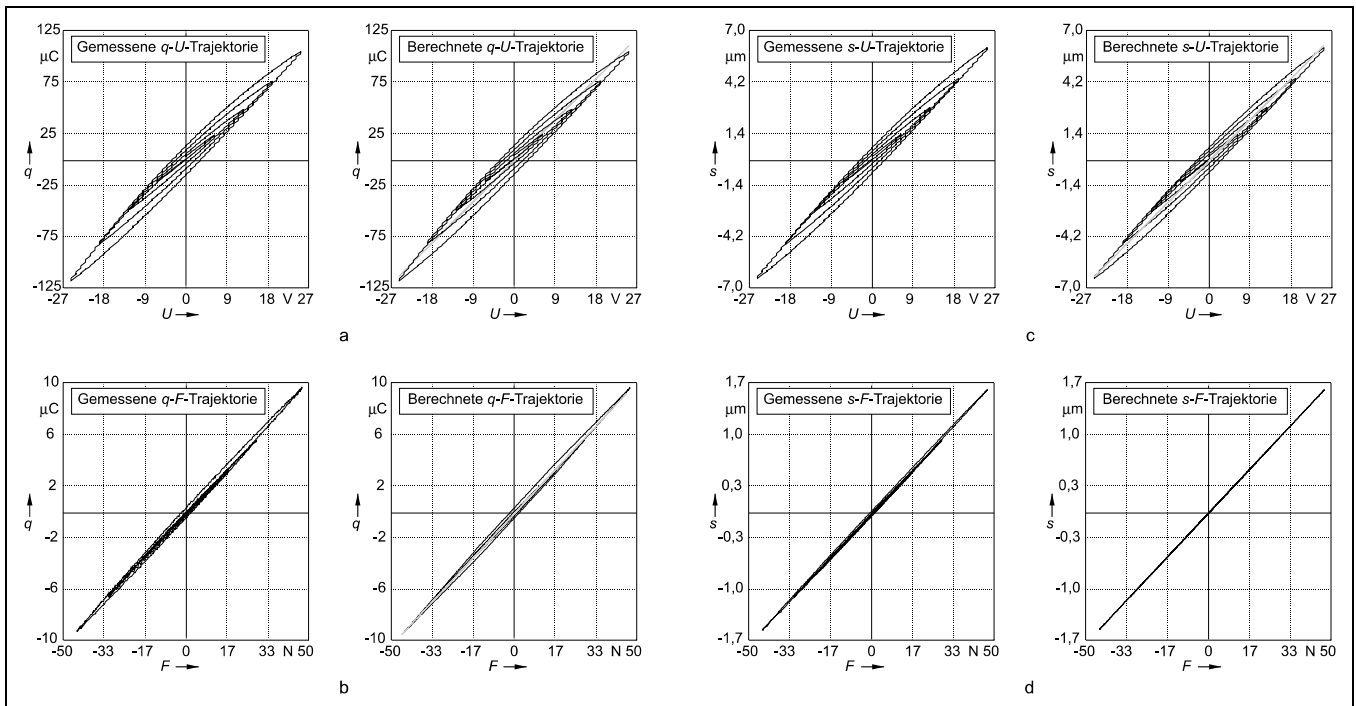


Bild 9: Gemessene und berechnete Trajektorien des a) elektrischen Übertragungspfad b) sensorischen Übertragungspfad c) aktorischen Übertragungspfad d) mechanischen Übertragungspfad.

mationen, das heißt für Operatoren $\Gamma_E, \Gamma_S, \Gamma_A$ und Γ_M mit den Modellordnungen $n = m = 2l = 0$, entstehen.

In Tabelle 1 sind die relativen Modellfehler

$$e_{yx} = \frac{\max_{t_0 \leq t \leq t_e} \{|\Gamma[x](t) - y(t)|\}}{\max_{t_0 \leq t \leq t_e} \{|\Gamma[x](t)|\}} \quad (41)$$

der Operatoren $\Gamma_E, \Gamma_S, \Gamma_A$ und Γ_M im Vergleich zu den entsprechenden Modellfehlern bei Verwendung der besten linearen statischen Approximation angegeben.

Insgesamt führt die operatorbasierte Modellbildung zu einer signifikanten Verbesserung der Übereinstimmung zwischen dem Übertragungsverhalten der realen elektrischen und aktorischen Übertragungsstrecken und dem entsprechenden Modellübertragungsverhalten. Bei der sensorischen und der mechanischen Übertragungstrecke ist dieser Effekt weniger stark ausgeprägt, da in diesem Fall das reale Übertragungsverhalten nur wenig von dem idealen Übertragungsverhalten abweicht. Im Fall der sensorischen Übertragungstrecke genügt daher die Verwendung eines reinen Hysterese-modells niedriger Ordnung mit $n = 2$. Dies führt zu einer Verbesserung um den Faktor 2, während im Fall des me-

chanischen Übertragungsverhaltens die Abweichungen von der idealen Trajektorie vernachlässigbar sind.

Um von der Leistungsfähigkeit der smarten inversen Kompensationssteuerung nach Bild 8 einen quantitativen Eindruck vermitteln zu können, wird für das Gesamtsystem, bestehend aus der Reihenschaltung des Kompensationsfilters und des piezoelektrischen Aktors, ein Sollauslenkungssignal s_{soll} nach Bild 10a vorgegeben.

Dabei wird der piezoelektrische Aktor zunächst ohne mechanische Belastung betrieben und erst in einem zweiten Versuch mit einem Kraftverlauf nach Bild 10b belastet.

In Bild 11b ist die $s-s_{soll}$ -Trajektorie des Gesamtübertragungssystems für den Fall dargestellt, dass dem inversen Operator Γ_A^{-1} innerhalb des Kompensationsfilters nach Bild 6 die in Bild 9a–d grau eingezeichnete, beste lineare Approximation für den aktorischen Übertragungspfad

Tabelle 1: Relative Fehler e_{yx} der operatorbasierten Modelle und der entsprechenden besten linearen Approximationen.

Modellfehler	e_{qU}	e_{qF}	e_{sU}	e_{sF}
linear	13,2%	5,3%	11,8%	2,9%
operatorbasiert	0,9%	2,5%	1,0%	2,9%

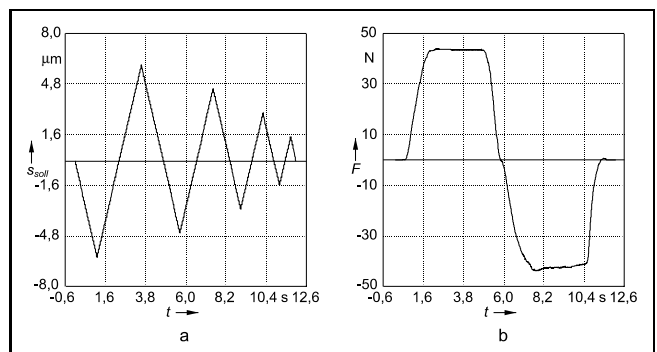


Bild 10: Anregungssignale des Gesamtsystems: a) Sollauslenkung $s_{soll}(t)$ am Kompensationsfilter b) Istbelastung $F(t)$ am piezoelektrischen Aktor.

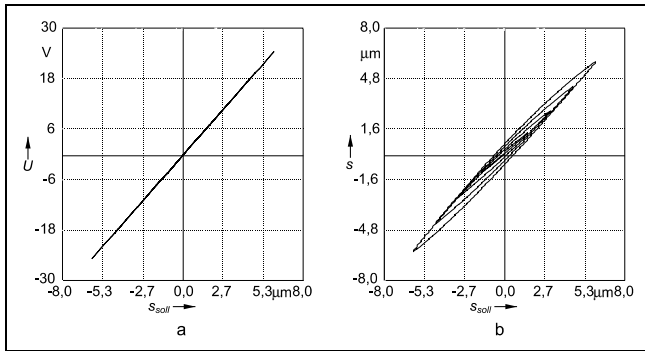


Bild 11: Lineare Steuerung ohne Krafteinwirkung: a) $U-s_{soll}$ -Trajektorie b) $s-s_{soll}$ -Trajektorie.

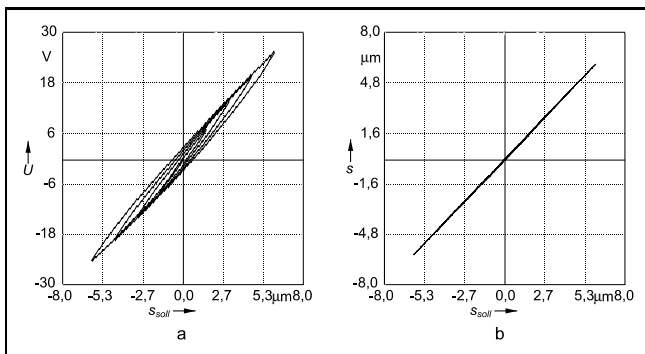


Bild 12: Operatorbasierte Steuerung ohne Krafteinwirkung: a) $U-s_{soll}$ -Trajektorie b) $s-s_{soll}$ -Trajektorie.

zugrundeliegt und der piezoelektrische Aktor mechanisch nicht belastet wird. Erwartungsgemäß ergibt sich für die in Bild 11a dargestellte $U-s_{soll}$ -Trajektorie des inversen Operators Γ_A^{-1} eine ideale Charakteristik, sodass die $s-s_{soll}$ -Trajektorie des Gesamtsystems die hystereseförmige, kriech- und sättigungsbehaftete Charakteristik des aktorischen Übertragungspfad des piezoelektrischen Mikropositioniersystems aufweist. Der relative Steuerungsfehler, definiert durch

$$e_{ss_{soll}} = \frac{\max_{t_0 \leq t \leq t_e} \{|s_{soll}(t) - s(t)|\}}{\max_{t_0 \leq t \leq t_e} \{|s_{soll}(t)|\}}, \quad (42)$$

beträgt in diesem Fall 12,1%. Bild 12b hingegen zeigt die $s-s_{soll}$ -Trajektorie des Gesamtübertragungssystems für den Fall der in Bild 9a-d schwarz dargestellten operatorbasierten Nachbildung des aktorischen Übertragungspfad. In diesem Fall ergibt sich für die $U-s_{soll}$ -Trajektorie des inversen Operators Γ_A^{-1} eine Charakteristik, die sich invers zum hystereseförmigen, kriech- und sättigungsbehafteten Verhalten des piezoelektrischen Aktors verhält, siehe Bild 12a.

Als Folge der Verkettung des inversen Operators Γ_A^{-1} mit dem aktorischen Übertragungspfad des piezoelektrischen Aktors weist die $s-s_{soll}$ -Trajektorie des Gesamtsystems eine von Hystereseförmigen, Kriech- und Sättigungseffekten nahezu vollständig befreite, ideale Charakteristik auf. Die Kompensationswirkung des Filters führt zu einer Verkleinerung des relativen Steuerungsfehlers auf einen Wert von 1,3%.

Bild 13b zeigt die $s-s_{soll}$ -Trajektorie des Gesamtübertragungssystems für den Fall einer linearen Steuerung bei zusätzlicher mechanischer Belastung nach Bild 10b. Wegen der endlichen Steifigkeit des piezoelektrischen Aktors entsteht aufgrund der Krafteinwirkung ein zusätzlicher Auslenkungsanteil, der zu einer weiteren Abweichung der $s-s_{soll}$ -Trajektorie von der angestrebten idealen $s-s_{soll}$ -Trajektorie führt und in diesem Fall den relativen Steuerungsfehler auf einen Wert von 40,8% erhöht. Wegen der fehlenden Rückkopplung der Aktorbelastung auf die lineare Steuerung besitzt die in Bild 14a dargestellte $U-s_{soll}$ -Trajektorie wie in Bild 11a eine ideale Charakteristik.

Die zusätzliche Kompensation der Belastungsabhängigkeit des Aktorausgangs durch Rückkopplung der Kraft F über

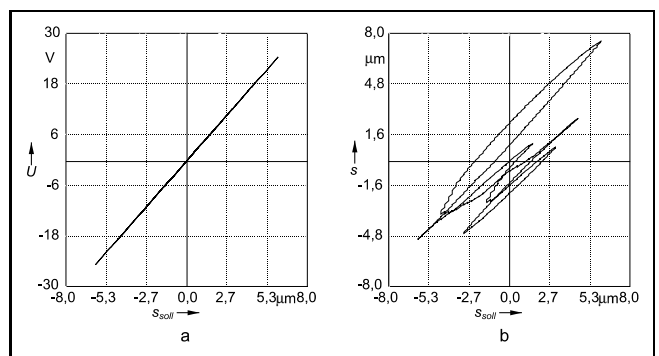


Bild 13: Lineare Steuerung bei Krafteinwirkung ohne Kraftkompensation: a) $U-s_{soll}$ -Trajektorie b) $s-s_{soll}$ -Trajektorie.

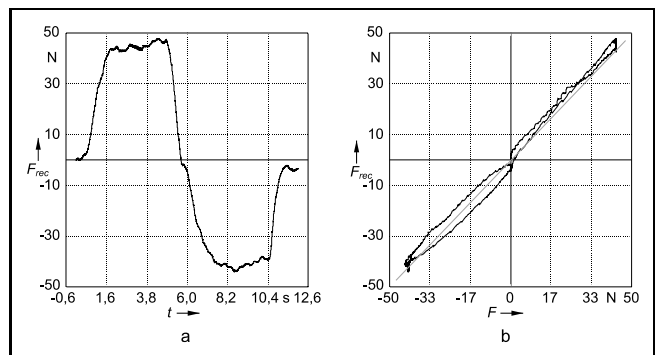


Bild 14: Wirkungsweise des operatorbasierten Rekonstruktionsfilters: a) Rekonstruierte Belastung $F_{rec}(t)$ b) F_{rec} - F -Trajektorie.

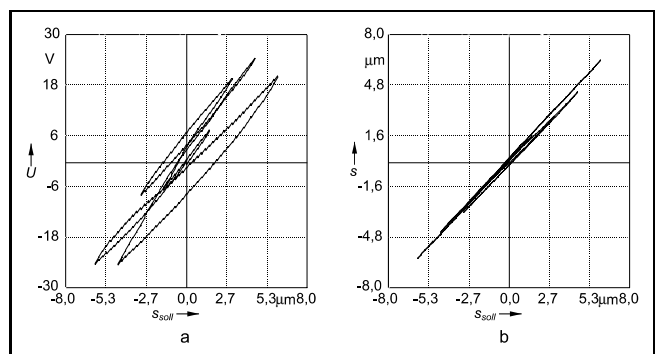


Bild 15: Inverse Steuerung bei Kraftkompensation durch Kraftrekonstruktion: a) $U-s_{soll}$ -Trajektorie b) $s-s_{soll}$ -Trajektorie.

den Operator Γ_M des mechanischen Übertragungspfad nach Bild 6 erfordert die Kenntnis der momentanen mechanischen Belastung F des piezoelektrischen Aktors. Diese kann durch gleichzeitiges Messen der Aktorspannung U und der Aktorladung q und Einsetzen in Gl. (38) aus den elektrischen Aktorgrößen rekonstruiert werden. In Bild 14a ist das Rekonstruktionsergebnis für die mechanische Belastung nach Bild 10b und in Bild 14b die korrespondierende F_{rec} - F -Trajektorie des Gesamtsystems für den Fall dargestellt, dass dem elektrischen und dem sensorischen Übertragungspfad die in Bild 9a–d schwarz dargestellten operatorbasierten Nachbildungen zugrundegelegt werden. Der relative Rekonstruktionsfehler, definiert durch

$$e_{F_{rec}F} = \frac{\max_{t_0 \leq t \leq t_e} \{|F(t) - F_{rec}(t)|\}}{\max_{t_0 \leq t \leq t_e} \{|F(t)|\}}, \quad (43)$$

beträgt in diesem Fall 12,4%. Werden hingegen für die Operatoren Γ_E und Γ_S die in Bild 9a–d grau dargestellten besten linearen Approximationen verwendet, steigt der relative Rekonstruktionsfehler auf Werte um 120% an. Dieses Ergebnis zeigt deutlich, dass eine Rekonstruktion der mechanischen Belastung des piezoelektrischen Aktors im elektrischen Großsignalbetrieb ohne eine Signalverarbeitung, die den Einfluss von Hysterese-, Kriech- und Sättigungseffekten in hinreichendem Maße kompensieren kann, wenig Erfolg verspricht.

Die Rückkopplung der rekonstruierten Kraft F_{rec} über den Operator Γ_M des mechanischen Übertragungspfad nach Bild 8 führt zu einer zusätzlichen Kompensation der Abhängigkeit der Aktorauslenkung s von der Aktorbelastung F und damit zu einer Erhöhung der Steifigkeit des piezoelektrischen Antriebes. Diese Situation ist in Bild 15 für den Fall abgebildet, dass dem elektrischen, sensorischen, aktorischen und mechanischen Übertragungspfad jeweils die in Bild 9a–d schwarz dargestellten operatorbasierten Nachbildungen zugrundeliegen.

Aufgrund der Rückkopplung der rekonstruierten Kraft F_{rec} auf den inversen Operator Γ_A^{-1} wird die in Bild 12a abgebildete inverse U - s_{soll} -Charakteristik wie in Bild 15a dargestellt verzerrt und dadurch der Krafterfluss auf die s - s_{soll} -Charakteristik des Gesamtsystems reduziert. Daraus resultiert die in Bild 15b dargestellte s - s_{soll} -Trajektorie, die nur wenig von der nahezu idealen s - s_{soll} -Trajektorie in Bild 12b abweicht. Der entstehende Steuerungsfehler beträgt in diesem Beispiel 5,0% und ist damit um fast eine ganze Größenordnung kleiner als in dem in Bild 13b dargestellten, unkompensierten Fall.

Damit lässt sich festhalten, dass der Einsatz des in Bild 8 dargestellten, operatorbasierten Vorfilters die im elektrischen Großsignalbetrieb piezoelektrischer Aktoren auftretenden Hysterese-, Kriech- und Sättigungseffekte und die Lastabhängigkeit infolge der endlichen Aktorsteifigkeit ohne zusätzlichen Sensoreinsatz in ihrer Wirkung um etwa eine Größenordnung reduziert.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Piezoelektrische Materialien werden aufgrund ihrer Fähigkeit, elektrische Energie in mechanische Energie umwandeln zu können, schon seit längerer Zeit industriell zum Aufbau von Aktoren genutzt. Allerdings müssen piezoelektrische Aktoren zur Erzeugung möglichst großer Auslenkungen mit hohen elektrischen Spannungen angesteuert werden, die ausgeprägte Hysterese-, Kriech- und Sättigungseffekte im Übertragungsverhalten erzeugen. Auf der Grundlage elementarer Hysterese-, Kriech- und Superpositionsooperatoren wird im Rahmen dieses Beitrages ein neuartiges, echtzeitfähiges Steuerungskonzept zur simultanen Kompensation von Hysterese-, Kriech- und Sättigungseffekten sowie zur zusätzlichen Kompensation von Störeffekten, die durch die endliche Steifigkeit des Aktormaterials zustande kommen, vorgestellt. Auf dieser Basis lässt sich ein operatorbasiertes Signalverarbeitungskonzept ableiten, das eine Realisierung des smarten Aktors auch für den Großsignalbetrieb ermöglicht.

Aus der Kombination der operatorbasierten Steuerung und Signalverarbeitung resultiert das Prinzip der so genannten smarten inversen Steuerung. Diese neuartige Steuerung ist in der Lage, gleichzeitig Hysterese-, Kriech- und Sättigungseffekte sowie Störeffekte, die durch die endliche Steifigkeit des Aktormaterials zustande kommen, zu kompensieren, ohne externe Weg- oder Kraftsensoren zu benötigen. Die Sensorinformation, die zur Sicherstellung dieser Funktionalität erforderlich ist, gewinnt die inverse Steuerung allein durch Nutzung der inhärenten sensorischen Eigenschaften des Aktormaterials.

Der Beitrag schließt mit einer Validierung des smarten Steuerungskonzeptes am Beispiel eines kommerziellen piezoelektrischen Mikropositioniersystems, bei dem mit Hilfe des neuartigen Steuerungskonzeptes das Aktorübertragungsverhalten um ungefähr eine Größenordnung verbessert werden kann. Die Steuerungsalgorithmen sind inzwischen kommerziell verfügbar (nähere Informationen unter www.dass.de). Während die Tauglichkeit der Steuerungsverfahren auch schon an magnetostruktiven Aktoren verifiziert werden konnte [11], soll im Rahmen zukünftiger Forschungsarbeiten die Anwendbarkeit auf elektromagnetische Aktoren und auf Aktoren aus Formgedächtnislegierungen untersucht werden. Zudem soll die derzeit off-line durchgeführte Steuerungssynthese in Zukunft on-line erfolgen, sodass selbstlernende und adaptive operatorbasierte Steuerungen realisiert werden können.

Danksagung

Die Ergebnisse dieses Beitrages wurden teilweise im Rahmen des Forschungsvorhabens „Untersuchung erweiterter Preisach-Modelle am Beispiel der Aktorik“ erzielt. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung dieses Projektes. Die Autoren danken außerdem Dr. Pavel Krejci vom Mathematischen Institut der Akademie der Wissenschaften in Prag für seine Diskussionsbereitschaft und seinen Beitrag zu den mathematischen Aspekten dieser Arbeit.

Literatur

- [1] *Isermann, R., Keller, H.*: Intelligente Aktoren. Automatisierungstechnische Praxis 35 (1993) 11, S. 593–602.
- [2] *Janocha, H. (Hrsg.)*: Aktoren, Grundlagen und Anwendungen. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1992.
- [3] *Newnham, R.E., Ruschau, G.R.*: Smart Electroceramics. J. Am. Ceram. Soc. 74 (1991) 3, S. 463–480.
- [4] *Janocha, H., Schäfer, J., Jendritzka, D.J.*: Smart solid-state actuators. Proc. 4th Technology Transfer Congress Actuator 94, Bremen (1994), S. 224–228.
- [5] *Uchino, K.*: New piezoelectric devices for smart actuator/sensor systems. Electroceramics IV, Proceedings Volume I, Aachen (1994), S. 179–192.
- [6] *Janocha, H. (Ed.)*: Adaptronics and Smart Structures. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1999.
- [7] *Dosch, J.J., Inman, D.J., Garcia, E.*: A self-sensing piezoelectric actuator for collocated control. Journal of Intelligent Materials, Systems and Structures, 3 (1992), S. 166–185.
- [8] *Jones, L., Garcia, E.*: Novel approach to self-sensing actuation. Proc. of the SPIE Smart Structures and Materials Conference, San Diego (1997), S. 305–314.
- [9] *Krejci, P., Kuhnen, K.*: Inverse control of systems with hysteresis and creep. IEE Proc. Control Theory Appl. 148 (2001) 3, S. 185–192.
- [10] *Kuhnen, K., Janocha, H.*: Inverse feedforward controller for complex hysteretic nonlinearities in smart material systems. Proc. of the 20th IASTED-Conference on Modelling, Identification and Control, Innsbruck (2001), S. 375–380.
- [11] *Kuhnen, K.*: Modeling, identification and compensation of complex hysteretic nonlinearities – A modified Prandtl-Ishlinskii approach. European Journal of Control, zur Veröffentlichung eingereicht.
- [12] *Kuhnen, K.*: Modeling, identification and compensation of complex hysteretic nonlinearities and $\log(t)$ -type creep dynamics: –An extended modified Prandtl-Ishlinskii approach-. Automatica, zur Veröffentlichung eingereicht.
- [13] *Kuhnen, K., Janocha, H.*: Operator-based compensation of hysteresis, creep and force-dependence of piezoelectric actuators. Proc. of the 1st IFAC-Conf. on Mechatronic Systems, Darmstadt (2000), S. 421–426.
- [14] *Kuhnen, K., Janocha, H.*: An operator-based controller concept for smart piezoelectric actuators. Proc. of the IUTAM-Symposium on Smart Structures and Structronic Systems, Magdeburg (2000), S. 299–306.
- [15] *Krasnosel'skii, M.A., Pokrovskii, A.V.*: Systems with hysteresis. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1989.
- [16] *Brokate, M., Sprekels, J.*: Hysteresis and phase transitions. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1996.
- [17] *Krejci, P.*: Hysteresis, convexity and dissipation in hyperbolic equations. Gakuto Int. Series Math. Sci. & Appl. 8, Gakotoscho, Tokyo, 1996.
- [18] *Kortendieck, H.*: Entwicklung und Erprobung von Modellen zur Kriech- und Hysteresiskorrektur, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 326, VDI Verlag, Düsseldorf, 1993.
- [19] Physik Instrumente: Nanopositionierung 98. Physik Instrumente Produktkatalog, Waldbronn, 1998.
- [20] *Janocha, H., Kuhnen, K.*: Real-time compensation of hysteresis and creep in piezoelectric actuators. Sensors & Actuators Physical A 79 (2000), S. 83–89.

Manuskripteingang: 30. Oktober 2001.



Dr.-Ing. Klaus Kuhnen ist wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Prozessautomatisierung (LPA) der Universität des Saarlandes. Seine Hauptarbeitsgebiete sind die Festkörperaktorik und -sensorik sowie die Modellbildung, Identifikation und Steuerung hysterese- und kriechbehafteter Systeme. Zu seinen Forschungsinteressen gehören außerdem die adaptive Steuerungs- und Regelungstechnik sowie die nichtlineare Signalverarbeitung.

Adresse: Lehrstuhl für Prozessautomatisierung (LPA), Universität des Saarlandes, Im Stadtwald, Gebäude 13, 66123 Saarbrücken, Tel.: 0681-3024715, E-Mail: kuhnen@lpa.uni-sb.de



Prof. Dr.-Ing. Hartmut Janocha ist Inhaber des Lehrstuhls für Prozessautomatisierung (LPA) der Universität des Saarlandes und Direktionsmitglied im Zentrum für Innovative Produktion (ZIP Saarland). Hauptarbeitsgebiete sind Steuern/Regeln von Maschinen und Prozessen, Prozessmesstechnik, Aktorik, Robotik und Bildverarbeitung.

Adresse: siehe oben