

Festkörperaktoren mit Sensor-Eigenschaften

Pietro Pagliarulo, Hartmut Janocha und Klaus Kuhnen

Lehrstuhl für Prozessautomatisierung (LPA),
Universität des Saarlandes, Saarbrücken
Tel.: 0681 302-2880, E-Mail: Janocha@lpa.uni-saarland.de

Kurzfassung

Festkörperaktoren auf der Basis multifunktionaler Werkstoffe enthalten gleichzeitig und am selben Wirkort Informationen über die mechanischen Ausgangsgrößen Kraft und Auslenkung sowie über die elektrischen Eingangsgrößen; sie werden daher auch als Self-sensing-Aktoren bezeichnet. Im Wesentlichen gibt es zwei Möglichkeiten zur Nutzbarmachung des Self-sensing-Effektes: Die zustandsgrößenbasierte Methode und die parameterbasierte Methode. In diesem Beitrag werden beide Methoden sowie die konkrete Vorgehensweise zur Rekonstruktion der mechanischen aus den elektrischen Zustandsgrößen erläutert. Am Beispiel eines piezoelektrischen Mikropositionierantriebs wird abschließend die Leistungsfähigkeit des Self-sensing-Konzeptes demonstriert.

1 Einleitung

Bestimmte Werkstoffe wie piezoelektrische Keramiken und magnetostriktive Legierungen verfügen sowohl über aktorische als auch über sensorische Eigenschaften. Aktoren, die auf der Basis solcher Werkstoffe diesen Effekt nutzen, werden daher als Self-sensing-Aktoren bezeichnet [1,2].

In Bild 1 ist der Self-sensing-Aktor Teil einer geschlossenen Wirkungskette. Unter Nutzung des Self-sensing-Effektes lassen sich dann die Prozessgrößen Kraft F und Auslenkung s aus gemessenen elektrischen Größen rechnerisch rekonstruieren (F_r, s_r), ohne dass es hierzu eines besonderen Kraftsensors oder eines zusätzlichen Wegsensors bedarf. Bei Systemen oder Prozessen, in denen

ausschließlich Kraft- und Bewegungsgrößen (d. h. F , s und deren zeitliche Ableitungen oder Integrale) von Interesse sind, kann man auf den – hellgrau getönten – Sensorzweig sogar völlig verzichten. Der Self-sensing-Effekt hält noch weitere positive Eigenschaften bereit: Da die Rekonstruktion von F und s eine Modellierung der statischen Ausgang-Eingang-Kennlinie des Self-sensing-Aktors voraussetzt, kann auf dieser Basis auch ein hysteresebehaftetes Übertragungsverhalten der Aktoren linearisiert werden [3].

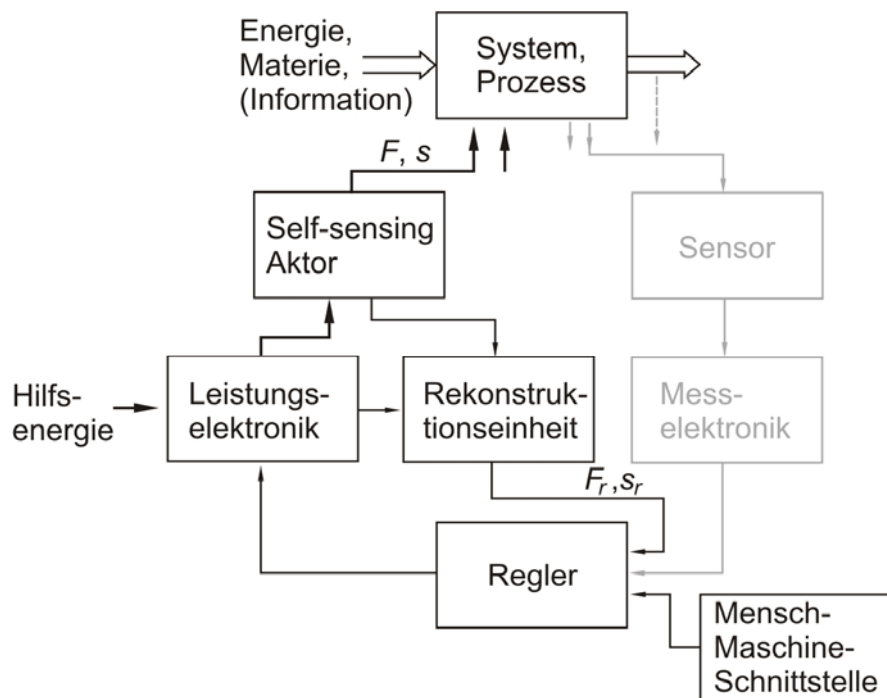


Bild 1: Geschlossener Regelkreis mit Self-sensing-Aktoren

Weitere Vorteile des Self-sensing-Effekts lassen sich am Beispiel einer schwingfähigen Platten- oder Schalenstruktur verdeutlichen, auf der streifenförmige Piezowandler appliziert sind, siehe Bild 2. Als Self-sensing-Aktoren liefern sie Sensorinformationen über die Eigenformen der Schwingungen an den Regler. Dieser verfügt über ein Modell der Struktur, das die Informationen nutzt, um geeignete Ansteuersignale für die Self-sensing-Aktoren zu generieren. Damit wird es möglich, das Schwingungsverhalten der Struktur gezielt zu beeinflussen. Aktor- und Sensorfunktionen sind prinzipbedingt kolloziert; dies führt dazu, dass der geschlossene Regelkreis einfacher stabilisiert werden kann, was wiederum vorteilhaft für die Auswahl und den Betrieb des Reglers ist.

Self-sensing-Aktoren bilden schließlich auch eine gute Voraussetzung für die Realisierung des „health monitoring“: Beispielsweise können – ähnlich wie in Bild 2 – piezoelektrische Self-sensing-Aktoren, die auf oder in einer Struktur appliziert sind, so betrieben werden, dass einige der Wandler aktorisch arbeiten und Testsignale in die Struktur leiten, während die anderen Wandler die Signale sensorisch erfassen und einem Auswerterechner zur Analyse übergeben. Die Rollen von Sender und Empfänger können dabei nach bestimmten Strategien vertauscht werden, um beispielsweise aus Abweichungen des Übertragungsverhaltens von einem Referenzmuster auf Materialfehler in der Struktur schließen zu können.

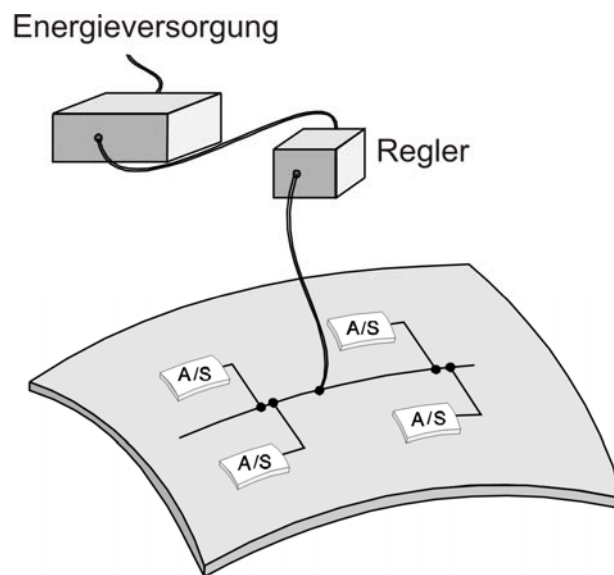


Bild 2: Regelung der Eigenformen einer mechanischen Struktur mit verteilten Self-sensing-Aktoren

2 Piezoelektrische Aktoren

Beispiele für Festkörperaktoren mit Self-sensing-Eigenschaften sind piezoelektrische, elektrostriktive und magnetostriktive Wandler, sowie Aktoren mit Gedächtnismetalllegierungen. Die weiteren Ausführungen müssen sich aus Platzgründen auf die piezoelektrischen Aktoren beschränken; gleichwohl wird an geeigneten Stellen dieses Beitrags eine Brücke auch zu magnetostriktiven Aktoren geschlagen.

Kleinsignal-Ersatzschaltbild

Bei piezoelektrischen Stapelaktoren bildet sich nach Anlegen der elektrischen Spannung $U(t)$ ein elektrisches Feld in Richtung ihrer Achse aus. Entsprechend führt eine Kraft $F(t)$ auf die Stirnfläche des Wandlers zu einer mechanischen Spannung im aktiven Material, deren Richtung ebenfalls mit der Achse übereinstimmt. Als Reaktion auf diese elektrische und mechanische Belastungssituation treten im Material Änderungen der elektrischen Polarisation P und der dielektrischen Verschiebungsdichte D sowie Dehnungen S auf, die sich in den messbaren, integralen Klemmengrößen elektrische Ladung q und Auslenkung s abbilden. Damit folgen für die Klemmengrößen die Systemgleichungen

$$q(t) = CU(t) + d_P F(t), \quad (1)$$

$$s(t) = d_P U(t) + \frac{1}{c_P} F(t). \quad (2)$$

Die Parameter in diesen Gleichungen heißen elektrische Kleinsignal-Kapazität C , Kleinsignal-Steifigkeit c_P und effektive piezoelektrische Ladungskonstante d_P . Der Strom I_g ist die Summe aus einem Polarisationsstromanteil dq/dt und einem Anteil aufgrund des Leitwerts G , der die Isolationseigenschaften des Keramikmaterials berücksichtigt:

$$I_g(t) = \frac{d}{dt} q(t) + GU(t). \quad (3)$$

Die Kraft F_g ergibt sich näherungsweise als Summe der Kraft F im piezoelektrischen Wandler und einem Anteil, der durch die Trägheitswirkung der effektiven Wandlermasse m bedingt ist:

$$F_g(t) = F(t) + m \frac{d^2}{dt^2} s(t). \quad (4)$$

Die Gleichungen (1), (2), (3) und (4) werden durch die elektromechanische Ersatzschaltung in Bild 3 anschaulich interpretiert. Der Eingang eines Piezowandlers kann demnach als elektrischer Kondensator mit der Kapazität C , sein Ausgang als mechanische Feder mit der Steifigkeit c_P betrachtet werden. In der Rea-

lität ist C verlustbehaftet und c_P massebehaftet, deswegen hat der Amplitudengang $|U/F_g|$ im elektrischen Leerlauf ($I_g = 0$) eine elektrisch bestimmte untere Grenzfrequenz f_u und eine mechanisch bedingte Eigenfrequenz f_0 . Aus demselben Grund hat der Amplitudengang $|s/U|$ im mechanischen Leerlauf ($F_g = 0$) eine mechanisch bedingte Eigenfrequenz f_0 [1].

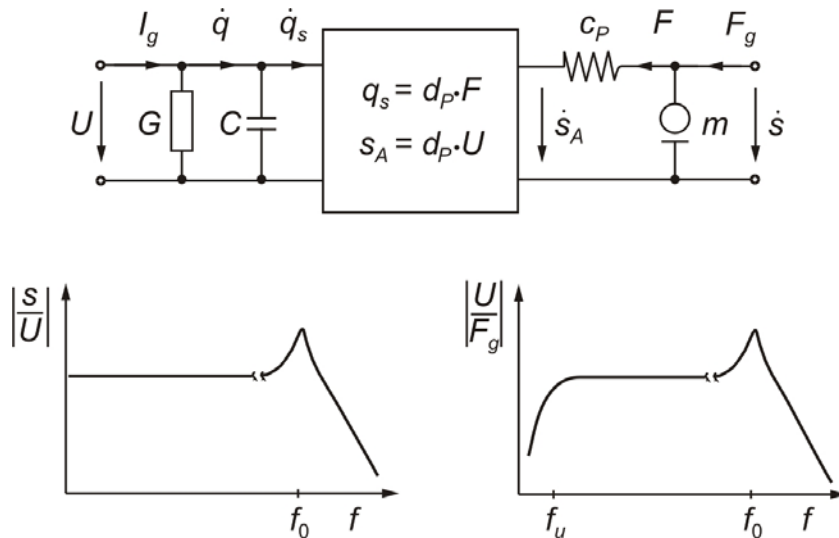


Bild 3: Piezowandler: Elektromechanische Ersatzschaltung und Amplitudengänge von Aktor- (links) und Sensor-Übertragungscharakteristik (rechts) im Kleinsignalbetrieb

3 Modellierung des Übertragungsverhaltens von Festkörperaktoren

3.1 Operatorbasierte Modellbildung

Im aktorischen Betrieb werde der Piezowandler in Bild 3 mit der Größe U angesteuert. Im unbelasteten Fall werden hierdurch ein elektrisches (q - U -Zusammenhang) und ein aktorisches Übertragungsverhalten (s - U -Zusammenhang) hervorgerufen (vgl. Bild 4). Eine zusätzliche Belastung F im Wandler führt außerdem zu einem sensorischen (q - F -Zusammenhang) und einem mechanischen Übertragungsverhalten (s - F -Zusammenhang). Ist die Amplitude hinreichend klein, verursacht die mechanische Belastung lediglich eine elastische Deformation der Ele-

mentarzellen und damit verbunden eine Verschiebung der Ladungsschwerpunkte. In diesem Fall sind die sensorischen und mechanischen Charakteristiken linear. Bei größeren Belastungen werden jedoch zusätzlich mechanisch Domänenprozesse angeregt, die nichtlineares Verhalten nach sich ziehen. Über diese Domänenprozesse entsteht eine Verkoppelung der elektrischen Steuergröße U mit der mechanischen Belastung F , deren analytische Beschreibung durch vektorielle Hystereseoperatoren erfolgen kann [4].

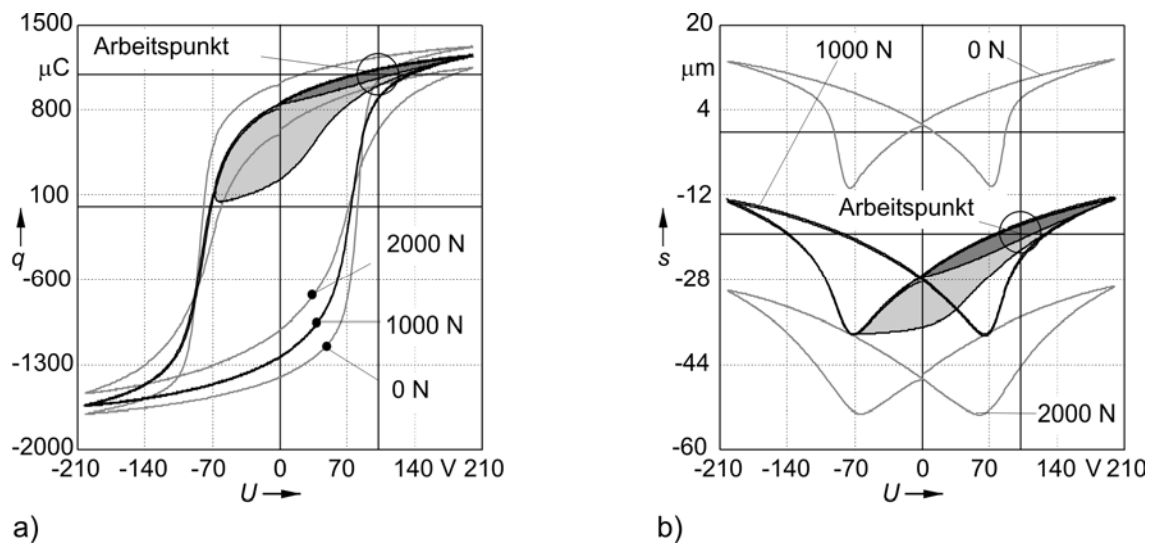


Bild 4: Kennlinien eines piezoelektrischen Stapelaktors für unterschiedliche mechanische Belastungen (hellgrau: bipolarer Betrieb, dunkelgrau: unipolarer Betrieb). a) Elektrische Charakteristik, b) Aktorcharakteristik

Um im Weiteren eine einheitliche, technologie neutrale Notation verwenden zu können, wird die elektrische Steuergröße U als Eingangsgröße X und die duale elektrische Größe q , die die Sensorinformationen über Auslenkung s und Kraft F enthält, als Ausgangsgröße y bezeichnet. Damit lässt sich der gerade erläuterte Sachverhalt formal durch die Operatorgleichungen

$$y(t) = \Gamma_S[X, F](t), \quad (5)$$

$$s(t) = \Gamma_A[X, F](t), \quad (6)$$

ausdrücken mit Γ_S und Γ_A als vektorielle Hystereseoperatoren für die Beschreibung des Sensor- und Aktorverhaltens. (5) wird als Sensorgleichung und (6) als Aktorgleichung des Festkörperwandlers bezeichnet.

Werden die elektrische Ansteuerung und die mechanische Belastung auf mittlere Amplituden beschränkt (bis ca. 40% der Großsignalaussteuerung), so dass die Abhängigkeit der hysteresebehafteten y - X - (q - U -) und s - X - (s - U -) Zusammenhänge von der mechanischen Belastung und die Abhängigkeit der hysteresebehafteten y - F - (q - F -) und s - F - Zusammenhänge von der elektrischen Aussteuerung vernachlässigt werden können, lassen sich die vektoriellen Operatoren in den Gleichungen (5) und (6) durch die additive Überlagerung skalarer Operatoren ersetzen [3,5,14]:

$$y(t) = \Gamma_E[X](t) + \Gamma_S[F](t), \quad (7)$$

$$s(t) = \Gamma_A[X](t) + \Gamma_M[F](t). \quad (8)$$

Hierin sind Γ_E , Γ_A , Γ_S , und Γ_M skalare Operatoren, mit denen die hysteresebehafteten y - X -, s - X - y - F - und s - F - Kennlinien beschrieben werden. Eine gute Möglichkeit dafür bietet beispielsweise der Preisach-Operator oder der sog. modifizierte Prandtl-Ishlinskii Hystereseoperator [6,7]. Ein (später erkennbarer) Vorteil des Letztgenannten ist, dass seine Invertierung analytisch erfolgen kann, wobei der inverse Operator dieselbe Struktur besitzt wie der ursprüngliche Operator. Aus diesem Grund kann er effizient für Echtzeitanwendungen eingesetzt werden [7,12]. Die Berechnung aus dem gemessenen Ausgang-Eingang-Verhalten des Festkörperaktors erfolgt mit Hilfe spezieller Syntheseverfahren, die ausführlich in [3] und [8] erläutert werden.

Erwähnt sei, dass bei hinreichend kleinen Amplituden von X und F (bis ca. 5% der Großsignalaussteuerung) auch die in den Übertragungstrecken auftretenden hysteresebehafteten Nichtlinearitäten vernachlässigt werden können. Dann folgen aus (7) und (8) die linearen Zusammenhänge

$$y(t) = \gamma_E X(t) + \gamma_S F(t), \quad (9)$$

$$s(t) = \gamma_A X(t) + \gamma_M F(t), \quad (10)$$

die mit den Gleichungen (1) und (2) formal übereinstimmen. Die Zuordnung der Parameter γ_E , γ_S , γ_A , und γ_M zu realen physikalischen Parametern findet man in Tabelle 1.

3.2 Modellbildung in Form von Signalflussplänen

Die vorgestellten Systemgleichungen lassen sich auch als Signalflusspläne interpretieren. Dies zeigt Bild 5 für den Piezowandler; diesem Diagramm liegen die Gleichungen (1) bis (3) zugrunde.

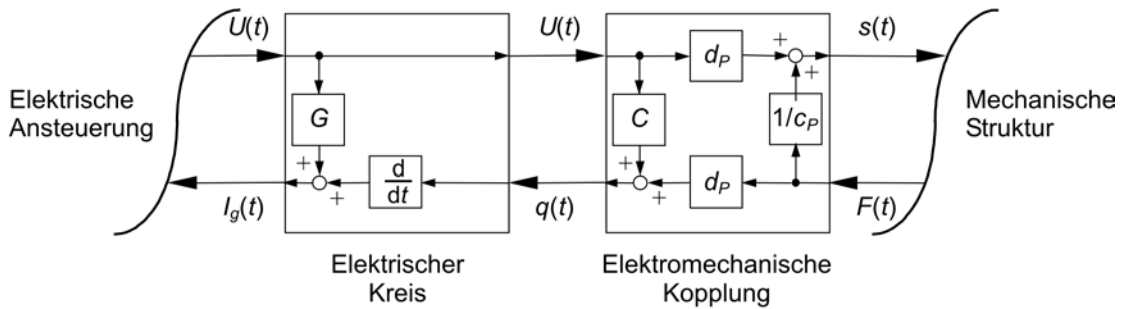


Bild 5: Signalflussplan für den piezoelektrischen Aktor auf Basis der Gleichungen (1) bis (3)

Die Sensor- und Aktorgleichungen (5) und (6) definieren, zusammen mit Gleichung (11), den allgemeinen Signalflussplan für Self-sensing-Festkörperaktoren in Bild 6.

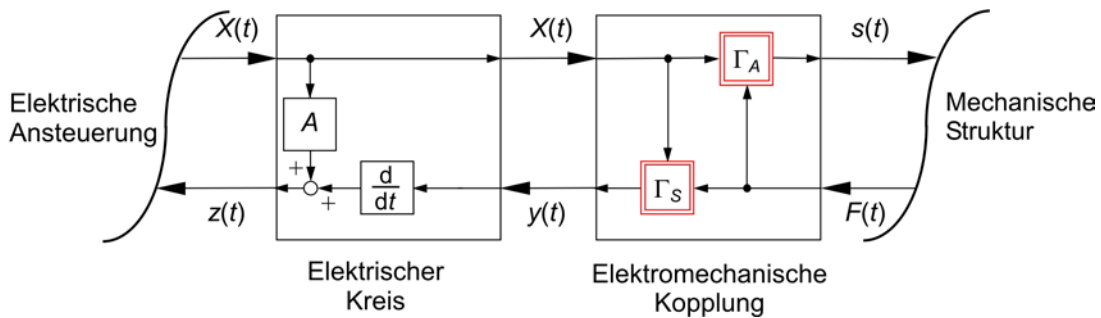


Bild 6: Signalflussplan zur allgemeinen Beschreibung von Festkörperaktoren auf Basis der Gleichungen (5), (6) und (11)

Das elektrische Wandlerverhalten wird durch

$$z(t) = \frac{d}{dt} y(t) + AX(t) \quad (11)$$

beschrieben, wobei A im piezoelektrischen Fall der elektrische Leitwert G ist. Die abstrakte Variable z beschreibt den elektrischen Strom I_g und beinhaltet die Sensorinformation aufgrund der inhärenten Sensoreigenschaften des Materials.

Dieser am Beispiel von piezoelektrischen Aktoren hergeleitete generalisierte Signalflussplan gilt auch für andere Festkörperaktoren. Tabelle 1 fasst die wichtigen Zustandsgrößen und Parameter für piezoelektrische und magnetostruktive Aktoren zusammen und ordnet sie den Größensymbolen des allgemeinen Modells zu.

Tabelle 1: Größen für piezoelektrische und magnetostruktive Aktoren

Allgemein	Piezoaktor	Magnetostruktiver Aktor
X : Eingangsgröße	U : Elektrische Spannung	I : Elektrischer Strom
y : Ausgangsgröße	q : Elektrische Ladung	ψ : Magnetischer Fluss
X : Eingangsgröße	q : Elektrische Ladung	ψ : Magnetischer Fluss
y : Ausgangsgröße	U : Elektrische Spannung	I : Elektrischer Strom
A : Elektrischer Parameter	G : Elektrischer Leitwert	R : Ohmscher Widerstand
γ_E : Elektrischer Parameter	C : Kleinsignal-Kapazität	L : Kleinsignal-Induktivität
γ_S : Sensorischer Parameter	d_P : Piezoelektr. Konstante	d_M : Magnetostr. Konstante
γ_A : Aktorischer Parameter	d_P : Piezoelektr. Konstante	d_M : Magnetostr. Konstante
γ_M : Mechanisch. Parameter	$1/c_P$: Kleinsignal-Elastizität	$1/c_M$: Kleinsignal-Elastizität

4 Methoden zur Nutzung des Self-sensing-Effektes

Zur Nutzung der Self-sensing-Eigenschaften [9] stehen zwei Methoden zur Verfügung: Die zustandsgrößenbasierte und die parameterbasierte Methode. In beiden Fällen besteht die Aufgabe darin, die mechanischen Größen F und s aus den gemessenen elektrischen Größen X und y zu rekonstruieren.

4.1 Zustandsgrößenbasierte Methode

Hier nutzt man die Abhängigkeit der elektrischen Ausgangsgröße y von der elektrischen Steuergröße X und von der mechanischen Last F nach (5). Die me-

chanische Last F_r wird aus den Messwerten X_m und y_m der Größen X und y wie folgt rekonstruiert:

$$F_r(t) = \Gamma_S^{-1}[X_m, y_m](t). \quad (12)$$

Dafür muss die y - F -Abbildung mit X als Parameter invertiert werden. Im zweiten Schritt rekonstruiert man dann die Auslenkung des Wandlers s_r durch Einsetzen der rekonstruierten Kraft F_r in die Aktorgleichung (6). Die entsprechende Gleichung lautet

$$s_r(t) = \Gamma_A[X_m, F_r](t) \quad (13)$$

und wird in einem – softwaremäßig realisierten – Rekonstruktionsfilter implementiert, siehe Bild 7. Die Bestimmung der Messwerte X_m und y_m aus den elektrischen Klemmengrößen X und z erfolgt mit Hilfe spezieller Messschaltungen, die in Abschnitt 5 beschrieben werden. Diese sind Teil der Mess- und Leistungselektronik in Bild 7. Sie erzeugen an ihren Ausgängen die Messspannungen

$$U_X(t) = G_X[X](t), \quad (14)$$

$$U_y(t) = G_z[z](t). \quad (15)$$

G_X und G_z sind Faltungsoperatoren und kennzeichnen das Übertragungsverhalten der Messschaltungen. Aus den Messspannungen werden durch Skalieren die Messwerte

$$X_m(t) = K_X^{-1}U_X(t), \quad (16)$$

$$y_m(t) = K_y^{-1}U_y(t), \quad (17)$$

zur Weiterverarbeitung im Rekonstruktionsfilter ermittelt. Ebenso werden die Rekonstruktionen F_r und s_r in diesem Filter durchgeführt. Die eingeprägte Steuergröße X wird von der Leistungselektronik gemäß

$$X(t) = G_V[U_C](t) \quad (18)$$

erzeugt. Der Faltungsoperator G_V kennzeichnet das (über einen weiten Frequenzbereich proportionale) Übertragungsverhalten der Leistungselektronik, diese erhält die Stellinformation vom übergeordneten Steuerrechner in Form der Steuerspannung U_C .

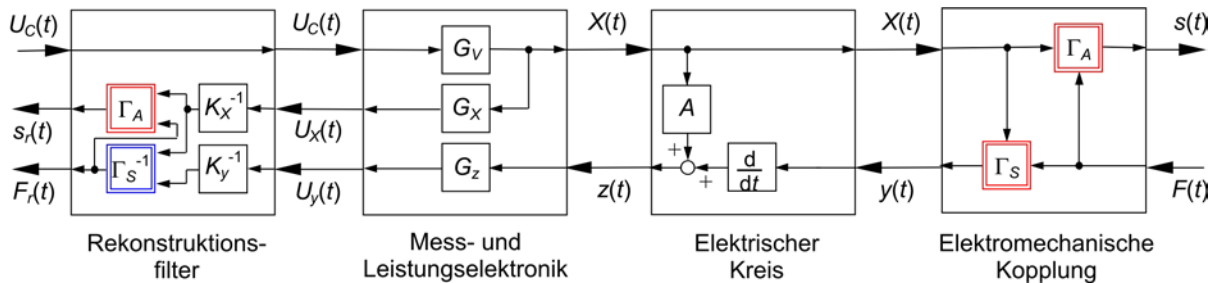


Bild 7: Self-sensing-Festkörperaktor nach der zustandsgrößenbasierten Methode

Als spezielles Beispiel, auf das in Kapitel 6 zurückgegriffen wird, werde das entkoppelte Modell nach (7) und (8) betrachtet. Hierfür erhalten die Rekonstruktionsgleichungen entsprechend (12) und (13) die Form

$$F_r(t) = \Gamma_S^{-1}[y_m - \Gamma_E[X_m]](t), \quad (19)$$

$$s_r(t) = \Gamma_A[X_m](t) + \Gamma_M[F_r](t). \quad (20)$$

Zur Bestimmung von F_r benötigt man also den inversen Sensoroperator Γ_S^{-1} vgl. Bild 8. Mit Hilfe des sog. modifizierten Prandtl-Ishlinskii Hystereseeoperators lässt sich der entsprechende Kompensator analytisch entwerfen [7]. Diese Eigenschaft und Gleichung (19) ermöglichen die Implementierung eines Echtzeit-Rekonstruktionsfilters [12].

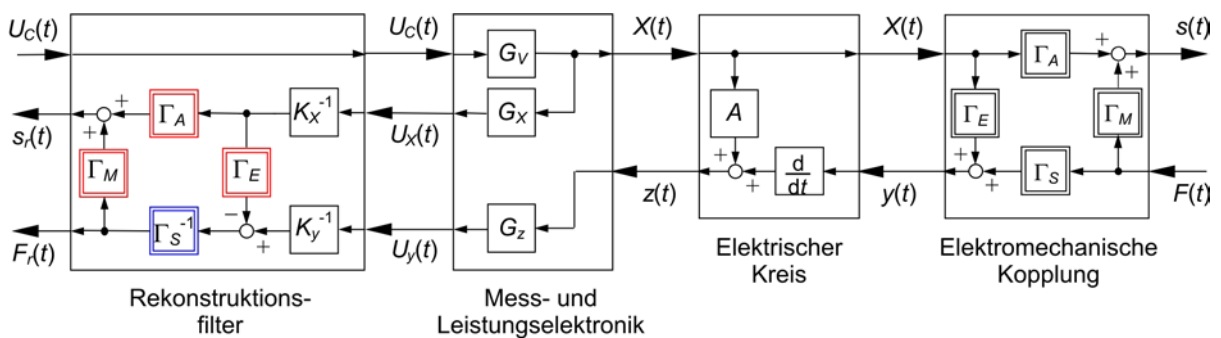


Bild 8: Self-sensing-Festkörperaktor mit Rekonstruktion der Kennlinienhysteresis

4.2 Parameterbasierte Methode

Die parameterbasierte Methode nutzt die Abhängigkeit eines elektrischen Kleinsignal-Parameters

$$\gamma_E(X(t), F(t)) := \frac{\partial \Gamma_S(X(t), F(t))}{\partial X(t)} \quad (21)$$

von der Steuergröße X und der Belastung F [9]. Nach (21) kann γ_E als effektive Steigung der y - X -Abbildung im von der Steuergröße X und der mechanischen Belastung F definierten Arbeitspunkt interpretiert werden.

Zur experimentellen Bestimmung des Kleinsignal-Parameters überlagert man der Steuerspannung U_{CA} eine sinusförmige hochfrequente Prüfspannung U_{CT} mit kleiner Amplitude, siehe Bild 9. Die Steuergröße $X(t)$ kann entsprechend als Summe von $X_A(t)$ und $X_T(t)$ betrachtet werden. Wenn die Amplitude des Testsignals ausreichend klein ist ($X_T(t) \ll X_A(t)$), kann sein Einfluss auf γ_E vernachlässigt werden. Daher besteht die elektrische Größe z aus einer (in Bild 9 nicht dargestellten) niederfrequenten Komponente z_A und einer hochfrequenten Komponente z_T . Letztere wird durch das Bandpass-Filter G_{zT} aus z bestimmt; X_T wird mit Hilfe des Bandpass-Filters G_{XT} aus X bestimmt.

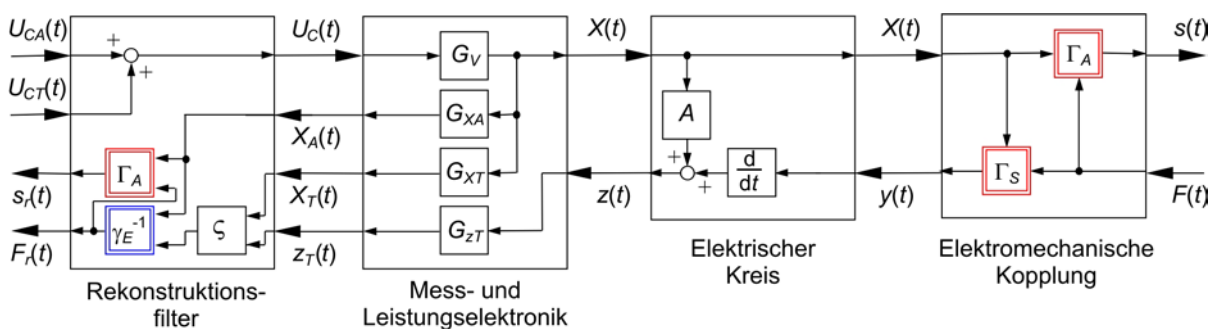


Bild 9: Self-sensing-Festkörperaktor nach der parameterbasierten Methode

Der Messwert γ_{Em} des Kleinsignal-Parameters γ_E folgt aus X_T und z_T durch phasenselektive Demodulation oder eine Parameteridentifikation oder eine auf der diskreten Fourier Transformation (DFT) basierende Signalanalyse [10]. Dieses Vorgehen realisiert eine Abbildung ζ entsprechend der Gleichung

$$\gamma_{Em}(t) = \zeta(X_T(t), z_T(t)). \quad (22)$$

Die Rekonstruktion der Kraft benötigt schließlich die Invertierung des Modells $\gamma_E(X_A, F)$ hinsichtlich der mechanischen Belastung F mit der Größe X_A als Parameter:

$$F_r(t) = \gamma_E^{-1}(X_A(t), \gamma_{Em}(t)). \quad (23)$$

Hierbei wird X_A mit Hilfe des Tiefpass-Filters G_{X_A} aus X bestimmt. Die Rekonstruktion der Auslenkung s erfolgt wie bei der zustandsgrößenbasierten Methode nach (13).

4.3 Voraussetzungen für die Rekonstruktion der mechanischen Größen

Wie gezeigt wurde, erfordert die Rekonstruktion der Aktorlast bei der zustandsgrößenbasierten Methode die Invertierung der y - F -Abbildung nach (12) und bei der parameterbasierten Methode die Invertierung der γ_E - F -Abbildung nach (23).

Hier sei stellvertretend die y - F -Abbildung betrachtet. Das Rekonstruktionsfilter ermittelt für einen willkürlich gewählten festen Zeitpunkt t den Wert der rekonstruierten Kraft $F_r(t)$, der den Messwert y_m für den gemessenen Wert X_m generiert. Dieses kann gemäß Sensorgleichung (5) durch Auflösen der impliziten Gleichung

$$y_m(t) - \Gamma_S[X_m, F_r](t) = 0 \quad (24)$$

erreicht werden. Diese Gleichung hat eine eindeutige Lösung für den Zeitpunkt t nur dann, wenn die stetige Abbildung y - F streng monoton für alle X ist.

Ähnliche Überlegungen zur γ_E - F -Abbildung führen darauf, dass die Stetigkeit und die strenge Monotonie der Abbildungen y - F und γ_E - F hinreichende Bedingungen für die Nutzung des Self-sensing-Effektes sind. Aus Großsignalcharakteristiken mit Wendepunkten – ein Beispiel ist die Sensorcharakteristik magnetostriktiver Werkstoffe – resultieren nichtmonotone Zusammenhänge zwischen dem elektrischen Parameter und der mechanischen Belastung; d. h. es gibt Ma-

xima in der γ_E - F -Abbildung, die eine Rekonstruktion der mechanischen Prozessgrößen verhindern. Aus diesem Grund ist die parameterbasierte Methode nur für den Kleinsignalbetrieb geeignet, wo diese Effekte nicht auftreten [9,10].

5 Mess- und Leistungselektronik

Die bisherigen Überlegungen haben gezeigt, dass die messtechnische Erfassung der elektrischen Eingangsgröße X und der dazu dualen elektrischen Ausgangsgröße y des Festkörperwandlers eine grundlegende Voraussetzung für die Realisierung eines Self-sensing-Aktors darstellt. Eine entsprechende Messschaltung kann aus Platzgründen hier nur für den Piezoaktor vorgestellt werden.

5.1 Messkreis für Spannung und Polarisationsladung

Ein bekanntes Verfahren zur Messung des q - U -Zusammenhangs von Dielektrika basiert auf dem in Bild 10 dargestellten Sawyer-Tower-Messkreis [11]. Das zentrale Element des Messkreises ist die Messimpedanz bestehend aus der Parallelschaltung einer Kapazität C_r zur Ermittlung der Polarisationsladung q und eines ohmschen Widerstandes R_r , über den der störende, aber unvermeidbare Leckstrom I_l durch den endlichen Isolationswiderstand des Wandlers abgeführt wird. Der piezoelektrische Wandler ist durch seine Kapazität C und seinen Isolationsleitwert G gekennzeichnet.

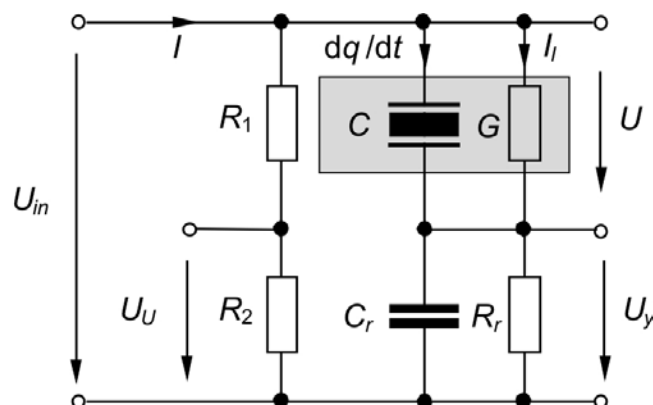


Bild 10: Sawyer-Tower-Messkreis

Der Zusammenhang zwischen der Messspannung U_y und der Polarisationsladung q sowie der Wandlerspannung U , die über den Leckstrom I_l die Messspannung beeinflusst, ist im Frequenzbereich durch

$$U_y(j\omega) = \frac{R_r G}{1 + j\omega R_r C_r} U(j\omega) + \frac{j\omega R_r}{1 + j\omega R_r C_r} q(j\omega) \quad (25)$$

gegeben. Gleichung (25) zeigt, dass für Frequenzen $f \gg f_{er} = 1/(2\pi R_r C_r)$ die Polarisationsladung über den Messkreis übertragen und die Wandlerspannung unterdrückt wird. Im Frequenzbereich $f \ll f_{er}$ hingegen wird die Polarisationsladung unterdrückt, während die Wandlerspannung auf die Messspannung durchgreift. Ein auf der Polarisationsladungsmessung aufbauendes Steuerungskonzept ist also nur für solche Anwendungen umsetzbar, bei denen die Wandlerspannung U sowie die Wandlerbelastung F außer einem konstanten Offsetanteil zur Arbeitspunkteinstellung nur Signalanteile mit Frequenzen genügend weit oberhalb der Grenzfrequenz f_{er} aufweisen.

5.2 Leistungselektronik

Ein durch Rückkopplung stabilisiertes Ansteuerkonzept für piezoelektrische Festkörperwandler basiert auf dem Sawyer-Tower-Messkreis und kann je nach Ausführung der Rückkopplung als Spannungsquelle oder Ladungsquelle konfiguriert werden, siehe Bild 11.

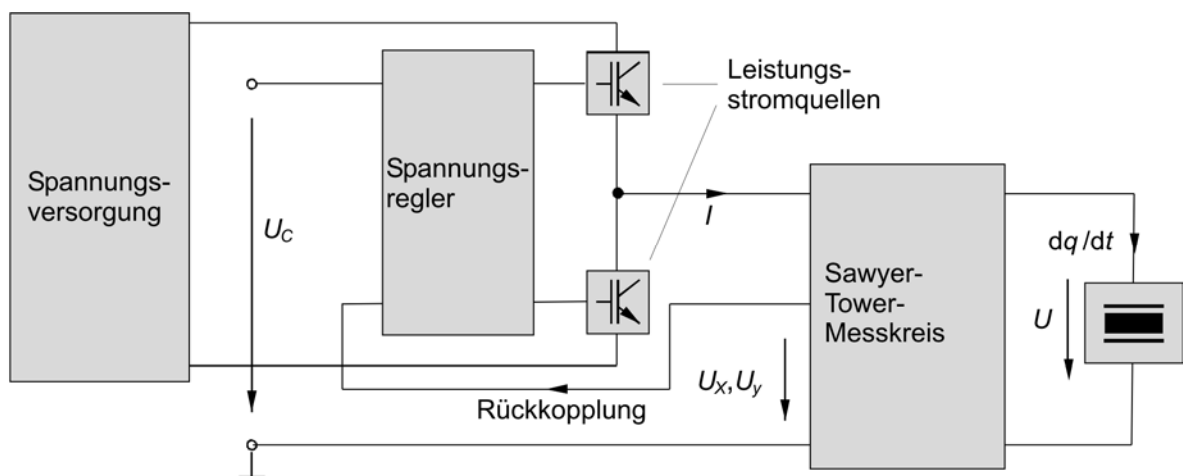


Bild 11: Stabilisierte analoge Ansteuerlektronik für Spannungs- bzw. Ladungssteuerung.

Zudem liefert die Ansteuerung des Wandlers über den Sawyer-Tower Messkreis die für die Rekonstruktions- und Kompensationsfilter notwendige Sensorinformation über Wandlerspannung und Polarisationsladung. Einzelheiten hierzu findet man in [13].

6 Anwendungsbeispiel: Piezoelektrischer Mikropositionierantrieb

Das Self-sensing-Konzept wurde nach der zustandsgrößenbasierten Methode gemäß Bild 8 in den kommerziellen Mikropositionierantrieb P-753 LISA (Linear Stage Actuator) der Fa. Physik Instrumente integriert. LISA-Systeme sind mit einem piezoelektrischen Stapelwandler ausgestattet, der eine von Festkörpergelenken geführte Plattform positioniert [3,5]. Die Rückkopplung der rekonstruierten Kraft F_r auf die Sollauslenkung s_d des Aktors erfolgt über die mechanische Charakteristik Γ_M und den Kompensator Γ_A^{-1} im Führungszweig, siehe Bild 12, und realisiert die Kompensationsgleichung

$$X_i(t) = \Gamma_A^{-1}[s_d - \Gamma_M[F_r]](t), \quad (26)$$

die aus (8) hergeleitet wurde. Die Skalierung des verallgemeinerten Ansteuersignals X_i zur Ansteuerspannung U_C führt zur Kompensation der hysteretischen Nichtlinearität Γ_A in der Aktorcharakteristik und zur Kompensation des Einflusses der mechanischen Belastung F auf die Auslenkung s des Self-sensing-Aktors.

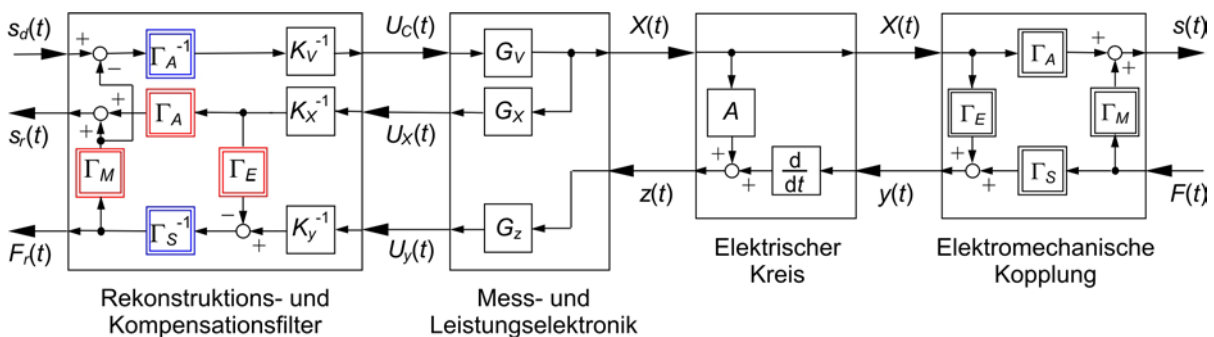


Bild 12: Self-sensing-Festkörperaktor mit operatorbasiertem Rekonstruktions- und Kompensationsfilter

Bild 14a zeigt für den Self-sensing-Piezoaktor mit operatorbasiertem Rekonstruktions- und Kompensationsfilter die gemessenen Charakteristiken $s - s_d$, $s_r - s$ und $F_r - F$ für den elektrischen Großsignalbetrieb.

Zum Vergleich wurde auch das lineare Rekonstruktions- und Kompensationsfilter implementiert, siehe Bild 13. In Bild 14b sind die entsprechenden, experimentell ermittelten Übertragungscharakteristiken der drei Übertragungspfade für den elektrischen Großsignalbetrieb dargestellt.

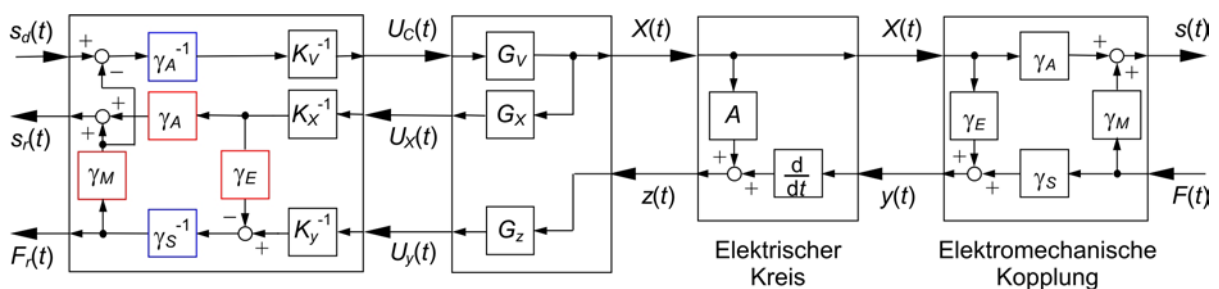


Bild 13: Self-sensing Festkörperaktor mit linearem Rekonstruktions- und Kompensationsfilter im Führungszweig

Wie in Bild 14b zu erkennen ist, entsteht bei Verwendung der linearen Rekonstruktions- und Kompensationsfiltergleichungen (9) und (10) durch die nicht berücksichtigten Hystereseffekte eine große relative Abweichung (ca. 153 %) zwischen der gemessenen Belastung F und der rekonstruierten Belastung F_r . Die relativen Abweichungen zwischen der gemessenen Auslenkung s und der rekonstruierten Auslenkung s_r einerseits und der Sollauslenkung s_d und der gemessenen Auslenkung s andererseits werden maßgeblich durch die unberücksichtigten Hystereseffekte erzeugt und liegen im Bereich von ca. 24 %.

Bei Verwendung der operatorbasierten Gleichungen (7), (8) wird der Einfluss der Kennlinienhysterese berücksichtigt. Die relative Abweichung zwischen der gemessenen Belastung F und der rekonstruierten Belastung F_r ist, wie Bild 14a zeigt, beträgt jetzt lediglich ca. 18 %. Abweichungen zwischen der gemessenen Auslenkung s und der rekonstruierten Auslenkung s_r einerseits und der vorgegebenen Sollauslenkung s_d und der gemessenen Auslenkung s andererseits sind in Bild 14a kaum erkennbar. Sie liegen im Bereich von ca. 3,5 % und sind damit

um ungefähr den Faktor 7 kleiner als bei Verwendung linearer Rekonstruktions- und Kompensationsmodelle.

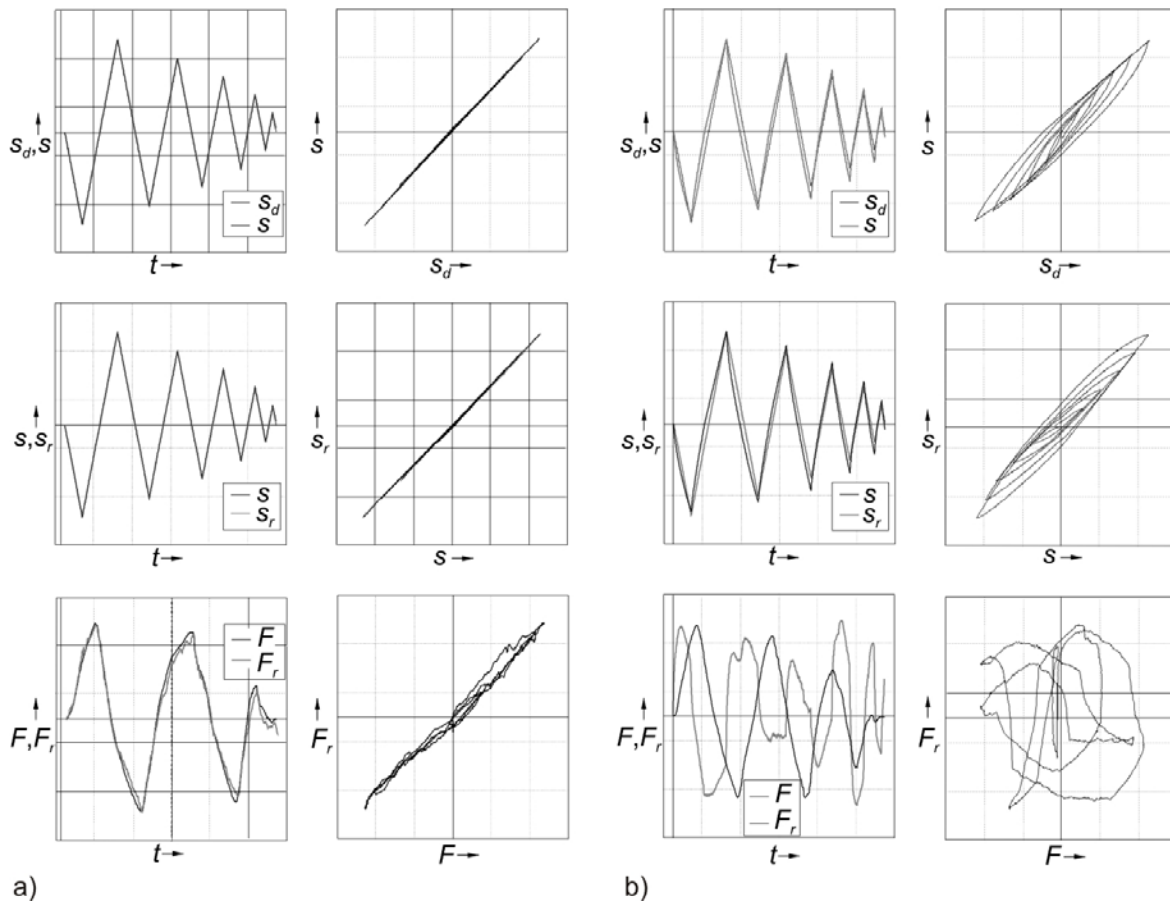


Bild 14: Self-sensing-Piezoaktor mit unterschiedlichen Rekonstruktions- und Kompensationsfiltern : a) Operatorbasiertes Filter (nach Bild 12), b) lineares Filter (nach Bild 13)

Zusammenfassung

Festkörperaktoren mit inhärenten Sensoreigenschaften ermöglichen die Erfassung von momentaner Aktorbelastung und -auslenkung, ohne dass entsprechende Sensoren erforderlich wären. Der hierfür genutzte Self-sensing-Effekt basiert auf der Messung elektrischer Größen, aus denen unter Zugrundlegung eines geeigneten Aktormodells die mechanischen Größen rekonstruiert werden. Als elektrische Größen hierfür kommen grundsätzlich sowohl Zustandsgrößen (z. B. Spannung, Strom) als auch Parameter (Kapazität, Induktivität) in Frage; die je-

weiligen Vorgehensweisen wurden im vorliegenden Beitrag erläutert und bewertet. Schließlich wurde am Beispiel eines piezoelektrischen Mikropositionierantriebs gezeigt, dass zur Erzielen kleiner Rekonstruktionsfehler eine genaue Modellierung von Kennlinienhysterese unerlässlich ist.

Literatur

- [1] H. Janocha (Hrsg.): Actuators - Basics and Applications, Berlin Heidelberg New York: Springer, 2004
- [2] D. Pawelczak: Nutzung inhärenter Messeffekte von Aktoren und Methoden zur sensorlosen Positionsmessung im Betrieb, Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Aachen, Shaker Verlag, 2005.
- [3] K. Kuhnen: Inverse Steuerung piezoelektrischer Aktoren mit Hysterese-, Kriech- und Superpositionsoperatoren, Dissertation, Universität des Saarlandes, Aachen, Shaker Verlag, 2001.
- [4] A. Bergqvist: On magnetic hysteresis modeling, Royal Institute of Technology, Electric Power Engineering, Stockholm, 1994.
- [5] K. Kuhnen und H. Janocha: Inverse Steuerung für den Großsignalbetrieb von Piezoaktoren, at-Automatisierungstechnik 50, 9, 2002, S. 439-450.
- [6] H.T. Banks, A.J. Kurdila und G. Webb: Identification of Hysteretic Control Influence Operators Representing Smart Actuators, Part II: Convergent Approximations. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 8, 1997, S. 536-550.
- [7] K. Kuhnen: Modeling, Identification and Compensation of complex hysteretic Nonlinearities - A modified Prandtl-Ishlinskii approach, European Journal of Control 9, 4, 2003, S. 407-418.
- [8] G.V. Webb, D.C. Lagoudas und A.J. Kurdila: Hysteresis Modeling of SMA Actuators for Control Applications, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 9, 1998, S. 432-448.
- [9] K. Kuhnen, H. Janocha und M. Schommer: Exploitation of inherent sensor effects in magnetostrictive actuators, Proc. 9th Int. Conf. on New Actuators, Bremen, 2004, S. 367-370.
- [10] M. Schommer und H. Janocha: Rekonstruktion der Belastung eines magnetostruktiven Aktors durch Signalanalyse, ETG-Fachbericht der ETG/GMM-Fachtagung 2004, Darmstadt, 2004, S. 189-194. (CD-ROM)

- [11] C.B. Sawyer und C.H. Tower: Rochelle Salt as a Dielectric, Physical Review 35, 1930, S. 269-273.
- [12] H. Janocha, D. Pesotski und K. Kuhnen: FPGA-based compensator of hysteretic actuator nonlinearities for highly dynamic applications. Actuator 2006, Proc. 10th International Conference on New Actuators, Bremen 14.-16. Juni 2006, S. 1013-1016.
- [13] K. Kuhnen und H. Janocha: Integrierte Mess- und Leistungselektronik für piezoelektrische Self-sensing Aktoren. Mechatronik 2005, Wiesloch, 01.-02.06.2005, VDI-Berichte 1892.2, S. 1137-1156.
- [14] K. Kuhnen, M. Schommer und H. Janocha: Integral feedback control of a self-sensing magnetostrictive actuator. Journal of Smart Materials and Structures 16 (2007), S. 1098-1108.