

Neue Aktoren aus der Sicht der Mechatronik

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Janocha

Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Lehrstuhl für Prozeßautomatisierung (LPA)

Der Begriff Mechatronik ist zu einem Synonym für die synergistische Verknüpfung von unterschiedlichen technischen Fachgebieten beim Entwurf neuer, heterogener Produkte geworden. Der folgende Beitrag beschreibt den Stand der Technik und erläutert Forschungstrends im Bereich der neuen Aktoren, die besonders gut geeignet sind, um Sinn und Nutzen einer durch mechatronische Grundsätze geprägten Sichtweise zu verdeutlichen.

1. Aktoren in der Automatisierungstechnik

Die Aufgabe der Automatisierungstechnik besteht darin, Vorgänge und Abläufe der unterschiedlichsten Art so zu beeinflussen, daß vom Menschen vorgegebene Ziele unter Einhaltung bestimmter Nebenbedingungen und trotz des Einflusses von Störungen bestmöglich erreicht werden. Bild 1 zeigt den allgemeinen Aufbau von Systemen zur Prozeßautomatisierung.

Ein Beispiel ist das Fertigen eines metallenen Werkstücks auf einer Drehmaschine. Hierbei wird - üblicherweise: elektrische - Energie bereitgestellt, aus der - nach Energiewandlung - die erforderliche mechanische Leistung zum Zerspanen des Materials erzeugt wird, durch die der Rohling schließlich die gewünschte Form erhält: Prozeß. Voraussetzung hierfür sind geometrische und technologische Informationen, um die benötigte Zerspanleistung zum richtigen Zeitpunkt und am rechten Ort in den Fertigungsprozeß einbringen zu können: Steuerrechner. Es ist klar, daß eine geeignete Gerätetechnik anzubieten ist, sowohl um lenkend in den Prozeßablauf eingreifen zu können, als auch seinen jeweils aktuellen Zustand zu erkennen: Aktoren und Sensoren. Beide Automatisierungskomponenten werden über den Steuerrechner funktionell verknüpft. In ihm ist ein Modell des globalen Prozeßverhaltens abgespeichert ("qualitatives Erfahrungswissen"); auf dieser Basis wertet er die sensorisch erfaßten Prozeßzustände aus ("quantitatives Wissen") und liefert damit eine vollständige Beschreibung des Prozesses: Prozeßidentifikation. Dieselben Prozeßdaten (Parameter) können auch dazu dienen, ein durch Algorithmen realisiertes Reglerverhalten (z. B. PID- oder Dead-beat-Regler) zu parametrieren: Reglersynthese. Hieraus werden schließlich die zielführenden Steuersignale für die Aktoren abgeleitet.

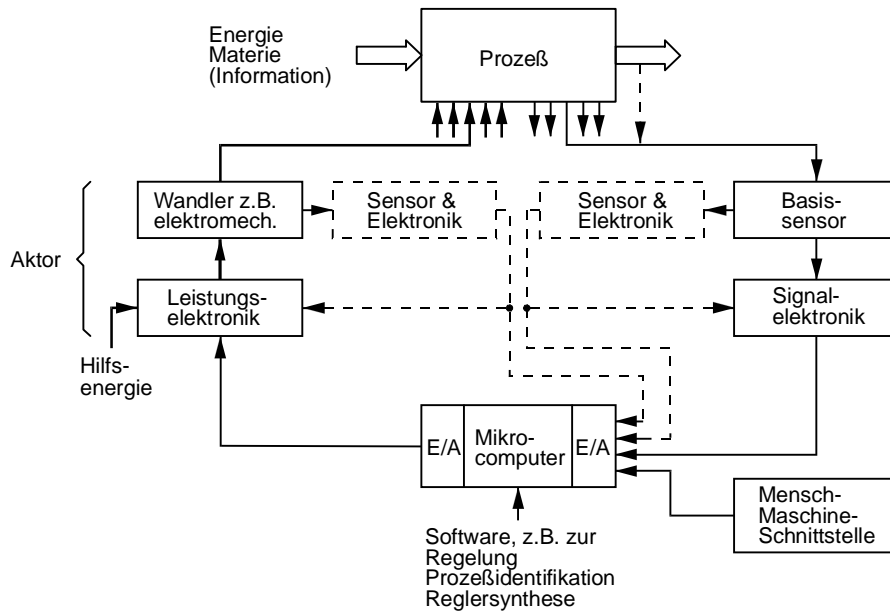


Bild 1: Allgemeiner Aufbau von Systemen zur Prozeßautomatisierung

2. Neue Aktoren

Unter neuen Aktoren versteht man Aktoren, deren Funktion wesentlich auf den Eigenschaften neuer Wandlerwerkstoffe beruht [1]. Beispiele sind piezoelektrische und magnetostruktive Festkörperwandler [2], Aktoren mit elektrorheologischen und magnetorheologischen Flüssigkeiten [3] sowie elektrochemische Aktoren und Aktoren mit Gedächtnismetalllegierungen. Wegen des begrenzten Platzes werden sich die weiteren Ausführungen auf Piezoaktoren beziehen; gleichwohl sind die meisten Aussagen auf andere neue Aktoren übertragbar.

Bild 2a zeigt den Aufbau eines Stapeltranslators, bei dem der longitudinale piezoelektrische Effekt genutzt wird. In diesem Wandler sind elektrisch gegensinnig polarisierte Keramikscheiben übereinander geschichtet, die somit elektrisch parallel und mechanisch in Reihe geschaltet sind. Damit realisiert man elektrisch steuerbare Stellelemente, die Kräfte im Kilonewtonbereich bei Frequenzen bis zu einigen Kilohertz (vgl. Amplitudengang in Bild 2b) aufbringen können; allerdings sind wegen der Materialdehnungen von maximal 1,5 % Wege von lediglich einigen zehn Mikrometern erzielbar; Anwendungsbeispiele sind schnelle Ventilantriebe, Präzisionspositionierungen und aktive Dämpfersysteme. Das vereinfachte elektromechanische Vierpol-Ersatzschaltbild zeigt, daß der Wandler elektrisch gesehen eine Kapazität und mechanisch gesehen eine Feder darstellt. Ferner ist erkennbar, daß er sowohl "von rechts" als auch "von links" betrieben werden kann: im ersten Fall wirkt er als Sensor, im zweiten als

Aktor. Dieses duale Verhalten bildet die Grundlage der später zu erläuternden smarten Aktoren.

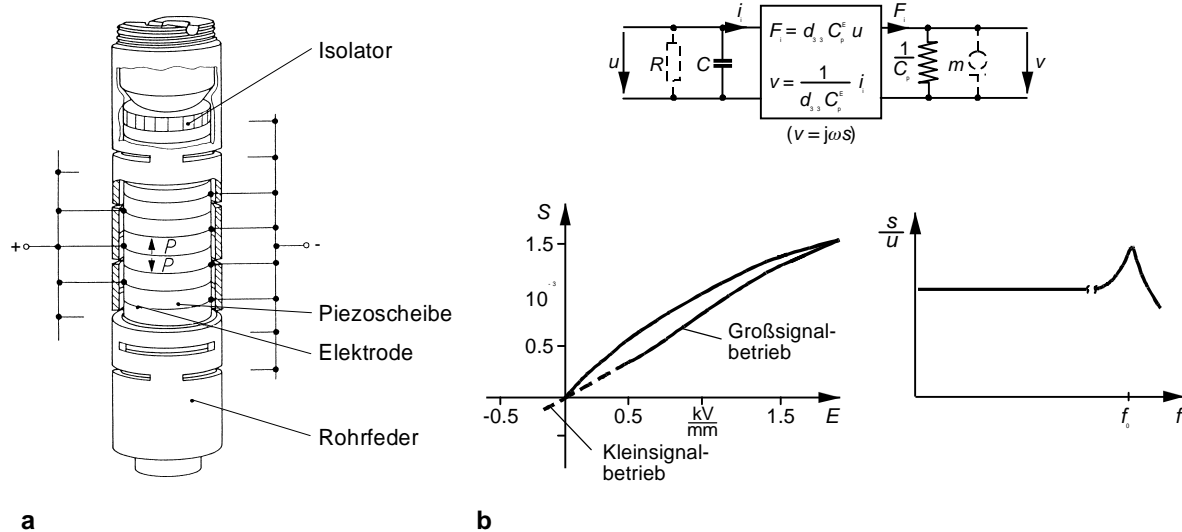


Bild 2: Piezoelektrischer Stapeltranslator. **a** Aufbau. **b** Elektromechanisches Ersatzschaltbild und Kennlinien

Für die analytische Beschreibung des elektromechanischen Wandlerverhaltens („Wandlermodell“) braucht man vier physikalische Größen. Diese können auf der elektrischen Seite die Spannung $u(t)$ und die Ladung $q(t)$ und auf der mechanischen Seite die Kraft $f(t)$ und die Auslenkung $s(t)$ sein. Welche beiden der elektrischen und mechanischen Größen als eingepreist oder unabhängig und welche beiden als abhängig angesehen werden können, hängt von den elektrischen und den mechanischen Betriebsbedingungen des Wandlers und damit von dem jeweiligen Einsatzfall ab. Damit stehen sich prinzipiell vier Möglichkeiten zur Beschreibung des Wandlerverhaltens gleichwertig gegenüber, von denen die folgende am häufigsten Anwendung findet.

$$q(t) = \Gamma_s [u(t), f(t)] \quad (1)$$

$$s(t) = \Gamma_a [u(t), f(t)] \quad (2)$$

In diesem Gleichungssystem wird das Übertragungsverhalten des Wandlers durch die beiden Operatoren Γ_s und Γ_a beschrieben, welche die Zeitsignale der unabhängigen elektrischen und mechanischen Größen in eindeutiger Weise auf die Zeitsignale der abhängigen elektrischen und mechanischen Größen abbilden. Es handelt sich dabei um eine sehr allgemeine Darstellung des Systemverhaltens, bei der die wechselseitige Verkopplung der elektrischen und mechanischen Größen auch auf systemtheoretischer Ebene zum Ausdruck kommt.

3. Leistungsverstärker

Bild 1 zeigt, daß Aktoren immer aus der Reihenschaltung von Energiewandler und Energiesteller (Leistungsverstärker) bestehen. Sehr wichtig für den erfolgreichen Einsatz eines Systems aus Wandler und Leistungsverstärker ist die exakte Abstimmung der beiden Komponenten aufeinander unter Berücksichtigung der mechanischen Randbedingungen; umso mehr überrascht es, daß die Komponente "Leistungsverstärker" in Veröffentlichungen über Aktoren so gut wie nie thematisiert wird.

Zur Realisierung von Leistungsverstärkern kommen heutzutage in der Aktorik zwei Konzepte in Frage, nämlich schaltende und analoge Verstärker. Hierbei ist zu beachten, daß ein analoger Leistungsverstärker üblicherweise einen weiten Lastbereich bedienen kann, während ein schaltender Verstärker mit Energierückgewinnung unter Umständen an eine bestimmte Last angepaßt werden muß. Eine aktorbezogene, vergleichende Bewertung ihrer wichtigen Eigenschaften liefert Tabelle 1; sie zeigt, daß beide Konzepte sich ergänzen und keines ausschließlich Vorteile bietet.

Tabelle 1: Wichtige Eigenschaften von schaltenden und analogen Verstärkern

	Schalt-Verstärker	Analog-Verstärker
Verluste in den Leistungstransistoren	Nur beim Schalten	Ständig bis zum Wert der Ausgangsleistung
Rückgewinnung gespeicherter Feldenergie	Prinzipiell möglich	Nicht möglich
Restwelligkeit des Ausgangssignals	Sehr hoch	Vernachlässigbar gering
Klirrfaktor des Ausgangssignals	Sehr groß	Sehr klein
Elektromagnetische Verträglichkeit	Erzeugung hochfrequenter Störfelder	Sehr geringe Störfelder
Verfügbarkeit der Leistungstransistoren	Gut	Weniger gut
Schaltungsaufwand	Größer ²	Geringer

¹ bei kapazitiver Last (Piezowandler) weniger starke Störfelder
² bei induktiver Last (magnetostriktive Wandler) erheblich größerer Schaltungsaufwand

Mit einem neuen Schaltungskonzept wird darum versucht, die Vorteile des schaltenden mit denen des analogen Verstärkers zu kombinieren und einen Hybridverstärker zu realisieren. Bild 3 zeigt einen Schaltungsvorschlag für einen solchen Verstärker [4].

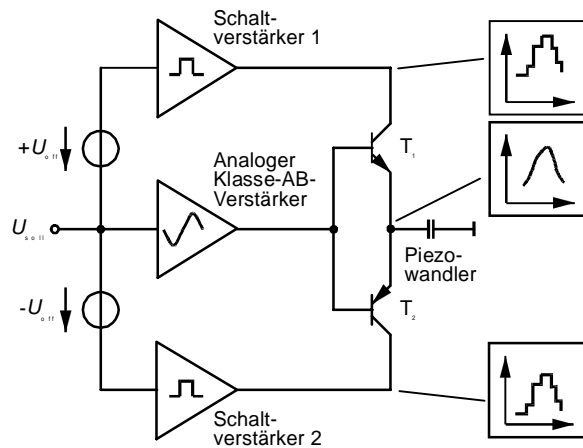


Bild 3: Prinzip eines Hybridverstärkers für piezoelektrische Wandler

Zwei Schaltverstärker erzeugen hierbei elektrische Potentiale symmetrisch zum Sollwert der Ausgangsspannung (Spannungsdifferenz $U_{\text{off}} \approx 10 \text{ V}$). Zwischen diesen beiden Potentialen arbeitet ein analoger Klasse-B-Verstärker, der als Stromquelle wirkt und alle durch das Schalten entstehenden Diskontinuitäten vom Piezowandler fernhält. In dieser Anordnung müssen die Leistungstransistoren T_1 und T_2 der analogen Endstufe zwar den vollen Ladestrom des Wandlers führen, doch der Spannungsabfall über ihnen ($\text{max. } U_{\text{off}}$) und somit auch die Verlustleistung bleiben gering. Auf Grund der bidirektionalen Arbeitsweise der Schaltverstärker läßt sich über T_2 die im Wandler gespeicherte Feldenergie zurückgewinnen. Somit sind die Vorteile der beiden Konzepte, nämlich hohe Signaltreue und geringe Verlustleistung, vereint.

4. Hybridaktoren

In den bisherigen Betrachtungen waren Energiewandler und Energiesteller zwei Komponenten, die zwar aufeinander abgestimmt sind, aber jeweils ein eigenständiges Teilsystem darstellen. Für ein optimales Betriebsverhalten ist es jedoch oftmals von Vorteil, diese Aufspaltung nicht vorzunehmen und den gesamten Aktor als ein System anzusehen. Der Nutzen einer solchen Vorgehensweise soll am Beispiel eines Hybridaktors verdeutlicht werden.

Die Idee des Hybridaktors basiert darauf, komplementäre Wandlertypen, in diesem Fall piezoelektrische und magnetostriktive Wandler, elektrisch zu einem Schwingkreis zu verschalten, so daß sie ihre Blindenergie untereinander austauschen und von der Quelle nur die inneren Verluste und die in mechanische Arbeit umgesetzte Energie zur Verfügung gestellt werden muß. Auf diese Weise läßt sich ein hoher Wirkungsgrad des Gesamtsystems erzielen [5].

Untersuchungen haben dabei ergeben, daß äußere Einflußgrößen wie die Temperatur, insbesondere aber die externe mechanische Last, einen so starken Einfluß auf die Eigenfrequenz

des aus den Wandlern gebildeten Schwingkreises haben, daß eine Ansteuerung mit einer von außen aufgeprägten Frequenz zu keinem zufriedenstellenden Betriebsverhalten führt. Daher wurde die in Bild 4a gezeigte schaltende Ansteuerung entwickelt, in welcher die Wandler direkt in die Leistungselektronik eingebettet sind.

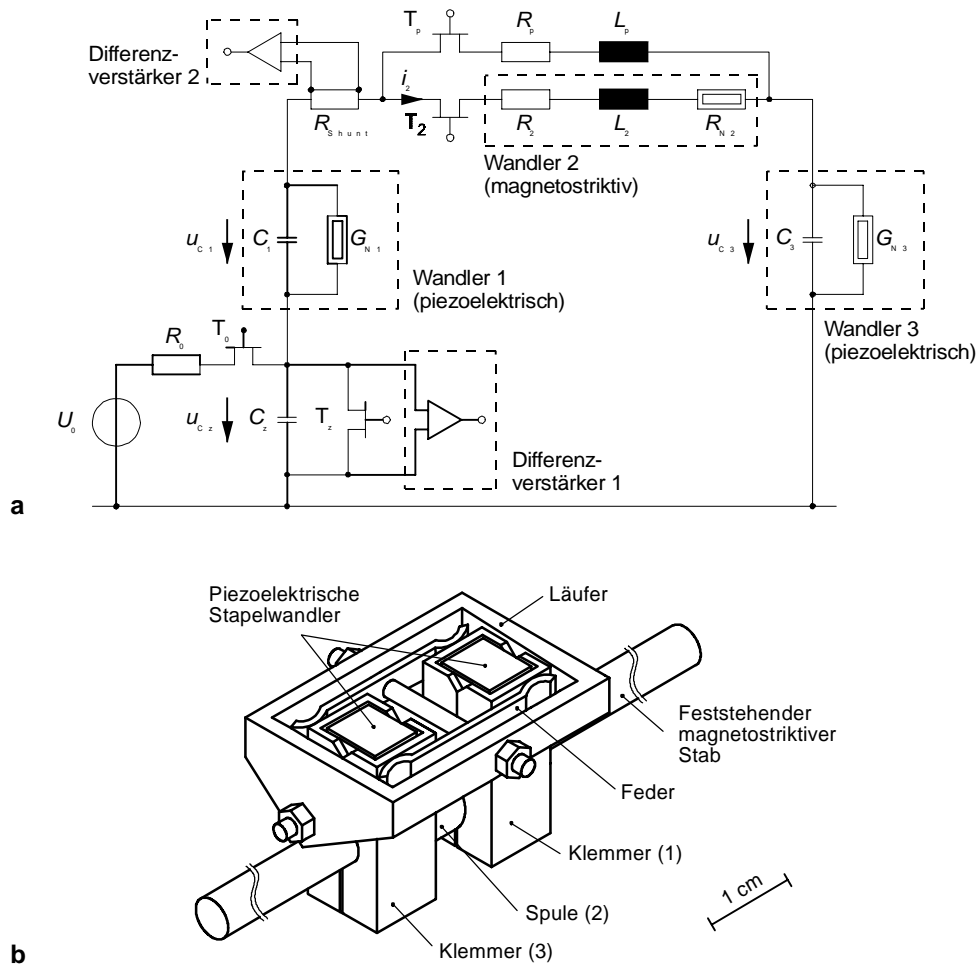


Bild 4: Hybridaktor. **a** Schaltende Ansteuerung. **b** Linearmotor

Die elektronische Schaltung schwingt in der von den Wandlern bestimmten Eigenfrequenz; Energiewandler und Energiesteller bilden einen nicht mehr in Teilsysteme aufspaltbaren Aktor. Eingesetzt werden kann dieser Hybridaktor beispielsweise in einem Linearmotor nach dem Inch-worm-Prinzip, welcher aus zwei von piezoelektrischen Stapelwandlern angetriebenen Klemmern und einem Vorschub mit magnetostruktivem Wandler besteht. Bild 4b zeigt einen aufgebauten Prototypen.

Dieser Linearmotor besitzt gegenüber dem Fall, daß die in den Wandlern gespeicherte Blindenergie nicht zurückgewonnen würde, einen neunmal höheren Wirkungsgrad. Darüber

hinaus bietet diese Realisierung im Vergleich zu bestehenden Konzepten weitere Vorteile, wie ein lastunabhängiges Betriebsverhalten, eine einstellbare Geschwindigkeit sowie die Möglichkeit der Präzisionspositionierung im Sub-Mikrometerbereich.

5. Intelligente Aktoren

Aktoren werden - einem verbreiteten Sprachgebrauch folgend - dann als intelligent bezeichnet, wenn ihr Übertragungsverhalten wesentlich durch eine funktionell zugeordnete, mikroelektronisch integrierte "Rechnerintelligenz" bestimmt wird, ggf. unter Einschluß von Sensorunterstützung. Solche "intelligenten" Aktoren sind in der Lage, beispielsweise Abweichungen vom gewünschten eigenen Übertragungsverhalten als Folge von inneren und äußeren Unvollkommenheiten und Einflußgrößen wie Kennlinienhysterese, Temperaturschwankungen, Lastrückwirkungen usw. zu erkennen und selbsttätig zu korrigieren. Hierzu sind die *aktorbezogen* störenden Größen sensorisch zu erfassen und einem schnellen Digitalrechner zuzuführen, der letztlich die erforderlichen Korrektursignale erzeugt, vgl. die gestrichelten Linien im linken Teil von Bild 1. Am Beispiel der bei vielen Wandlertypen auftretenden, unerwünschten Hysterese der statischen Ausgang-Eingang-Kennlinie soll die Vorgehensweise kurz erläutert werden.

Ausgehend von den Weisschen Bezirken in Ferromagneten hat der deutsche Physiker Preisach in den dreißiger Jahren vorgeschlagen, diese Magnete mathematisch durch elementare Hystereseoperatoren mit unterschiedlichen Aufwärts- und Abwärts-Schwellen zu modellieren. Damit wird das hysteresebehaftete System durch Superposition unendlich vieler Elementaroperatoren beschreibbar. Kern dieses Modells bildet die Parallelschaltung der einzelnen Operatoren, wodurch die „lokalen Gedächtnisse“ der Einzeloperatoren zu einem „Globalgedächtnis“ des gesamten Systems erweitert werden. In der praktischen Anwendung wird - ausgehend von dem Aktormodell Gl. (2) - beispielsweise auf einem digitalen Signalprozessor das inverse Hysteresemodell gebildet und mit dem physikalischen System in Reihe geschaltet. Bild 5 zeigt das Ergebnis für den Fall eines piezoelektrischen Wandlers; hierbei sind die Ausgang-Eingang-Kennlinien des ursprünglichen, hysteresebehafteten und des kompensierten Systems einander gegenübergestellt; man erkennt, daß durch Rechnereinsatz die Kennlinien-Hysterese nahezu vollständig kompensiert und das Übertragungsverhalten linearisiert werden konnte [6].

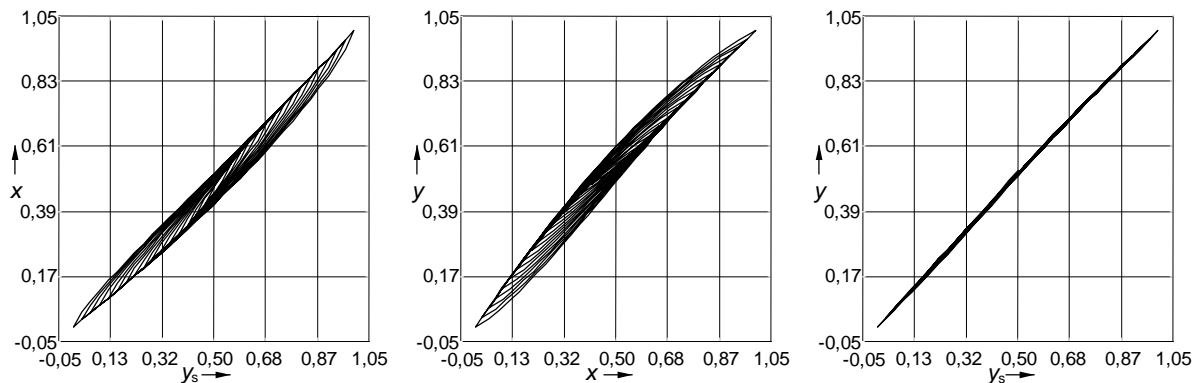
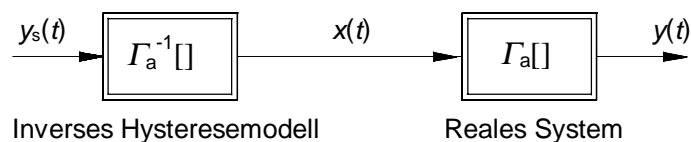


Bild 5: Kompensation von Kennlinien-Hysterese durch inverse Anregung

Aktuelle Forschungsarbeiten in diesem Bereich versuchen im Hinblick auf den On-line-Einsatz die Echtzeitfähigkeit des Verfahrens zu erreichen sowie durch ein modifiziertes Preisach-Modell die Temperaturabhängigkeit des Aktor-Übertragungsverhaltens und den Einfluß weiterer Parameter wie Last, Stellgeschwindigkeit oder Langzeitdrift zu erfassen. Voraussetzung hierfür ist die sensorische Erfassung der Einflußgrößen; Ziel ist die möglichst gute Kompensation äußerer Störgrößen.

6. Smarte Aktoren

Die Darstellung der geschlossenen Wirkungskette in Bild 1 oder die Beschreibung des "intelligenten" Aktors kann den Eindruck erwecken, daß die Funktionen "erfassen" und "stellen" immer diskreten Bauelementen oder Geräten zuzuordnen sind. Diese Vorstellung wird durch Energiewandler überkommen, bei denen die aktiv den Stellprozeß bestimmenden Werkstoffe über inhärent sensorische Fähigkeiten verfügen („multifunktionale Werkstoffe“). Genau durch diese Eigenschaft sind smarte Aktoren definiert. Beispiele für entsprechende Wandlerwerkstoffe sind bestimmte Formgedächtnislegierungen aus Nickel-Titan, bei denen eine etwa lineare Abhängigkeit zwischen Formänderung und elektrischem Widerstandswert besteht. Ein anderes Beispiel sind elektrorheologische Flüssigkeiten, in denen ein reproduzierbarer Zusammenhang zwischen elektrischer Leitfähigkeit und eingprägter mechanischer Scherbelastung genutzt werden kann. Auch die Piezokeramiken verfügen über einen mit dem

Werkstoff untrennbar verbundenen Sensoreffekt (direkter Piezoeffekt = Ladungsverschiebung bei Kräfteinwirkung).

Dieses Verhalten ist am Beispiel eines piezoelektrischen Wandler in Bild 6 dargestellt: Dem Piezowandler ist eine sinusförmige Steuerspannung eingeprägt, die einen etwa sinusförmigen Strom zur Folge hat. Durch mechanische Belastung des Wandler ergibt sich eine kaum erkennbare Stromänderung; durch Differenzbildung und zeitliche Integration des Differenzstroms wird aber erkennbar, daß der Ladungsverlauf ein getreues Abbild des Kraft-Zeit-Verlaufes liefert, ohne daß eine mechanische Größe sensorisch erfaßt werden muß.

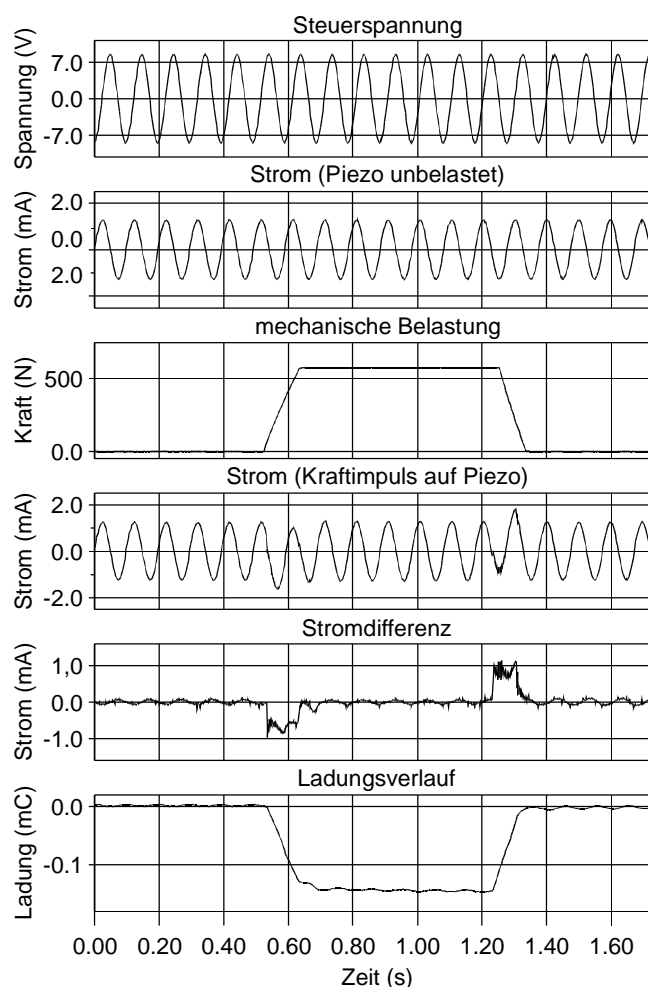


Bild 6: Zustandsgrößen bei einem smarten Piezoaktor

Der Grundgedanke zur Realisierung eines smarten Aktors ist in Bild 7 für den Fall dargestellt, daß die elektrische Spannung $u(t)$ und die Kraft $f(t)$ die unabhängigen Größen sind. Im aktori-schen Betrieb werden $u(t)$ und die Ladung $q(t)$ zu jedem Zeitpunkt durch geeignete Sensoren erfaßt. Aus dieser Information sollen die als nicht meßbar vorausgesetzten mechanischen Größen Kraft $f(t)$ und Auslenkung $s(t)$ rekonstruiert werden. Dazu wird ein mathematisches

Rekonstruktionsmodell benötigt, das auf den beschreibenden Wandlergleichungen, also dem Sensormodell Gl. (1) und dem Aktormodell Gl. (2), basiert [7].

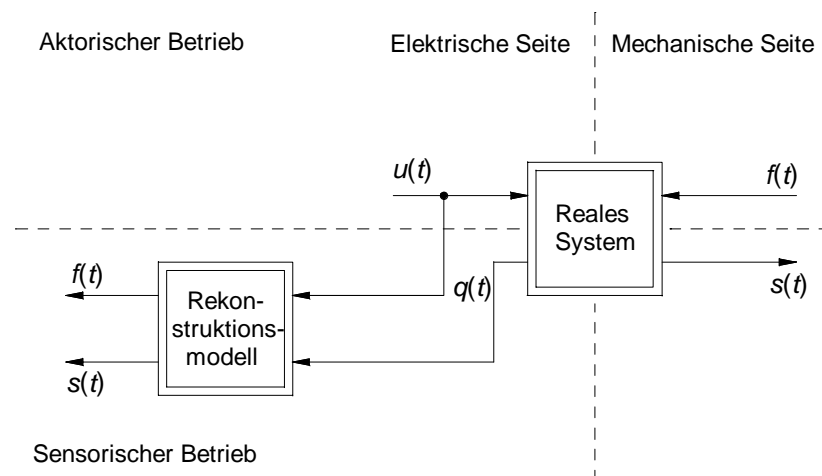


Bild 7: Piezoelektrischer Wandler als smarter Aktor

Die Rekonstruktion der mechanischen Größen geschieht nun in zwei Schritten. Zunächst erfolgt die Realisierung eines inversen Operators bezüglich des q - f -Zusammenhangs mit der Spannung u als Parameter auf der Basis des Sensormodells Gl. (1). Mit Hilfe dieses inversen Operators kann die Kraft $f(t)$ rekonstruiert werden:

$$f(t) = \Gamma_s^{-1}[u(t), q(t)] \quad (3)$$

Danach wird die Auslenkung mit Hilfe des Aktormodells Gl. (2) ermittelt, indem man in dieses die gemessene Spannung und die rekonstruierte Kraft einsetzt:

$$s(t) = \Gamma_a[u(t), \Gamma_s^{-1}[u(t), q(t)]] \quad (4)$$

Für nichtlineare Wandlermodelle läßt sich der inverse Operator (3) und damit auch das Rekonstruktionsmodell nur unter bestimmten Voraussetzungen geschlossen analytisch angeben, so daß die Inversion in der Regel numerisch mit Hilfe iterativer Berechnungsverfahren durchgeführt werden muß. Bedingung für die Existenz und die Eindeutigkeit des inversen Systems Gl. (3) sowie für die sichere Konvergenz der Berechnungsverfahren sind die Stetigkeit und die strenge Monotonie des mehrdeutigen q - f -Zusammenhangs im realen Wandler.

Das Rekonstruktionsmodell (3), (4) läßt sich für lineare Wandlergleichungen in einfacher Weise durch analoge Schaltungstechnik nachbilden. Bei Berücksichtigung der im Großsignalbetrieb auftretenden Nichtlinearitäten wird jedoch der Einsatz von digitalen Signalprozessoren zur Realisierung des Rekonstruktionsmodells unumgänglich.

7. Smarte Strukturen

Aktoren mit den beschriebenen Eigenschaften bilden ihrerseits die Grundlage für sogenannte smarte oder adaptive Strukturen. Diese basieren auf mechanischen Mehr-Freiheitsgrad-Strukturen, beispielsweise in Form von Platten oder Fachwerken, bei denen eine unerwünschte betriebsmäßige Anregung von Eigenschwingungen von vornherein zu verhindern oder im nachhinein zu beseitigen ist. Bild 8 zeigt zwei verschiedene Prinzipien als Grundlage von adaptiven Strukturen.

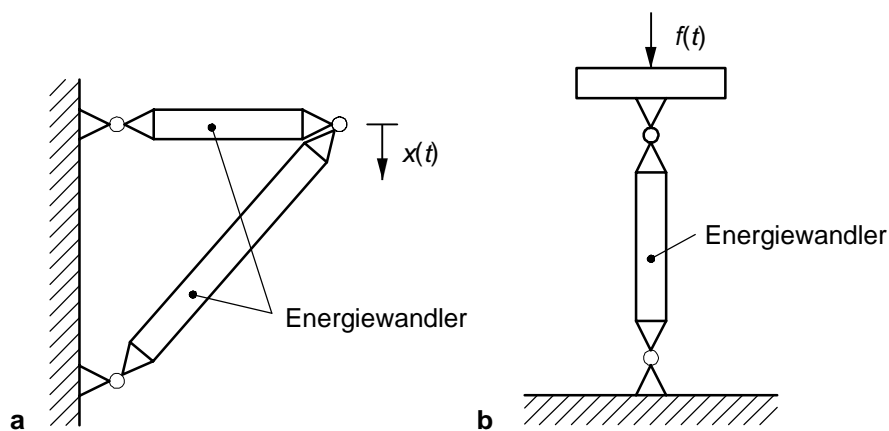


Bild 8: Realisierung einer nahezu beliebig **a** steifen **b** weichen mechanischen Struktur

Im ersten Fall (Bild 8a) kann mit Hilfe von Festkörper-Energiewandlern eine nahezu beliebig steife, mechanische Struktur realisiert werden, um unerwünschte Relativbewegungen $x(t)$ von Strukturpunkten oder -bereichen zu kompensieren. Dazu werden die Wandler so angesteuert, daß sie eine Stellbewegung erzeugen, die sich der Störschwingung überlagert und diese kompensiert. Im zweiten Fall (Bild 8b) realisiert ein Wandler einen Dämpfer zur Entkopplung der durch die Kraft $f(t)$ zu Schwingungen angeregten mechanischen Struktur von der sie tragenden Unterlage.

Das Leistungspotential von smarten Strukturen wird anhand des Anwendungsbeispiels in Bild 9 deutlich. Die dargestellte Antennenanordnung umkreist auf einem Raumfahrzeug die Erde und wird dabei auch zyklischen Temperaturschwankungen unterworfen. Hieraus folgen, durch Materialdehnungen verursacht, langperiodische Richtungsänderungen der Reflektorachse. Zusätzlich werden durch den Betrieb bestimmter Satellitenkomponenten kurzperiodische Schwingungen des gesamten Stabwerkes mit Amplituden im Mikrometerbereich hervorgerufen.

Die hierdurch erzeugten, unerwünschten Auslenkungen können mit Hilfe adaptiver Konzepte kompensiert werden [1]. Der Lösungsansatz besteht darin, bestimmte Stabverbindungen in der Fachwerkstruktur unter Zuhilfenahme von Festkörperwandlern zu verlängern oder zu verkürzen und damit die Ausrichtung dieser Fachwerkregionen gezielt zu steuern. Die notwendigen Informationen über die störenden Schwingungsgrößen liefert herkömmliche Sensorik oder – zukünftig – das Sensormodell smarter Aktoren.

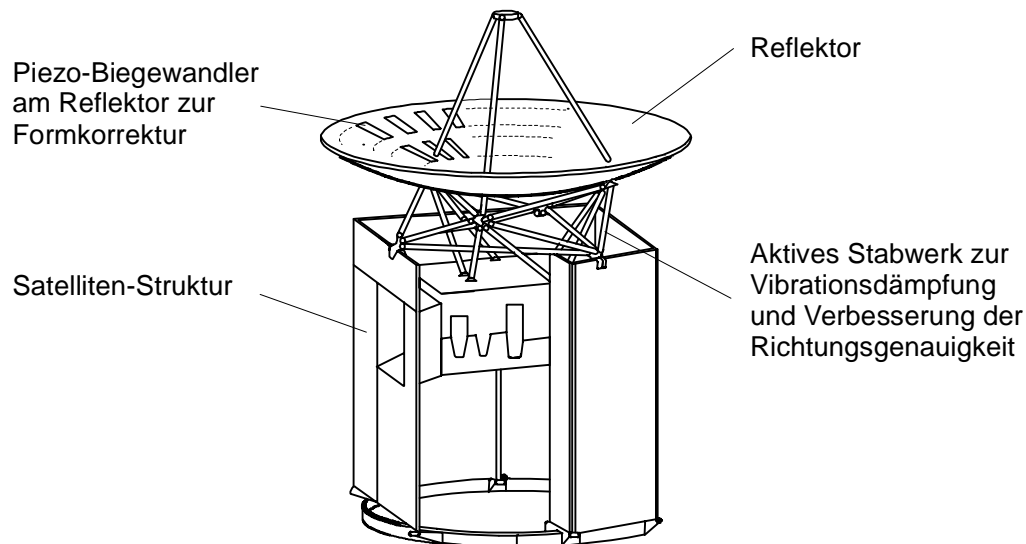


Bild 9: Beispiel für eine smarte Struktur (Quelle: DASA)

Darüber hinaus läßt sich der Krümmungsradius der Antennenschüssel mit Hilfe piezoelektrischer Wandler, die nach dem transversalen Piezoeffekt arbeiten (Biegewandler), so beeinflussen, daß die Sende- und Empfangsleistung immer optimal bleibt. Hierzu wird die notwendige Anzahl von Biegewandlern gleichmäßig auf dem Umfang des Reflektors appliziert und so angesteuert, daß sich die aktuelle Krümmung stets der Sollform in gewünschter Weise anpaßt, vgl. Bild 9.

Die "richtige" Applikation von verteilten Wandlern auf oder in einer Struktur ist ein aktuelles Forschungsthema. Hierbei wird untersucht, an welchen Orten einer Struktur die Wandler am besten positioniert werden oder nach welchen Verfahren integrierte Aktor-Struktur-Verbünde hergestellt werden können [8]. Damit eng verknüpft und zur Zeit erst teilweise geklärt sind die Aspekte Langzeitstabilität und Funktionssicherheit [9].

Literatur

- [1] Janocha, H. (Editor): *Adaptronics and Smart Structures – Basics, Materials, Design and Applications*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, erscheint im Frühjahr 1999
- [2] Clephas, B.; Janocha, H.: Aktoren mit piezoelektrischen und magnetostruktiven Festkörperwandlern. *atp – Automatisierungstechnische Praxis* 40 (1998) 4, S. 10-17
- [3] Bölter, R.; Janocha, H.: Aktoren mit elektrorheologischen und magnetorheologischen Flüssigkeiten. *atp – Automatisierungstechnische Praxis* 39 (1997) 5, S. 18-26
- [4] Janocha, H.; Stiebel, C.: New Approach to a Switching Amplifier for Piezoelectric Actuators. *Proc. 6th Conf. New Actuators*, Bremen (1998), pp. 189-192
- [5] Clephas, B.; Janocha, H.: New linear motor with hybrid actuator. *Proc. SPIE Smart Structures and Materials 3041*, San Diego, USA (1997), pp. 316-325
- [6] Kuhnen, K.; Janocha, H.: Compensation of the Creep and Hysteresis Effects of Piezoelectric Actuators with Inverse Systems. *Proc. 6th Conf. New Actuators*, Bremen (1998), pp. 309-312
- [7] Janocha, H.; Kuhnen, K.; Clephas, B.: Inherent Sensory Capabilities of Solid State Actuators. In: Gabbert, U. (Hrsg.): *Modelling and Control of Adaptive Mechanical Structures*. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 11 Nr. 268. Düsseldorf: VDI Verlag 1998, pp. 33-42
- [8] Sonderforschungsbereich 409 der DFG: *Adaptive Strukturen im Flugzeugbau und Leichtbau*, Stuttgart (ab 1998)
- [9] Schwerpunktprogramm der DFG: *Wechselwirkungen zwischen elektronischen und mechanischen Eigenschaften keramischer Multifunktionswerkstoffe* (ab 1996)

(In den hier angegebenen Veröffentlichungen des Autors und seiner Mitarbeiter befinden sich zahlreiche Literaturhinweise auf die Arbeiten anderer Autoren)