

Das Hybridaktorprinzip – vorgestellt am Beispiel eines Linearmotors

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Janocha, Saarbrücken, und Dr.-Ing. Bernd Clephas, Esslingen

Kurzfassung

Ausgangsidee für das in diesem Beitrag vorgestellte Hybridaktorprinzip war, den Wirkungsgrad von Aktoren durch Rückgewinnung reversibler elektrischer Energie zu erhöhen, und zwar auf Basis eines Austausches dualer Energieformen. Übertragen auf Festkörperwandler bedeutet dies, daß piezoelektrische oder elektrostriktive Wandler, die physikalisch bedingt Kapazitäten darstellen, und magnetostriktive Wandler, die eine Induktivität für die magnetische Erregung besitzen, ihre zur Erzeugung der Steuerfelder erforderliche Blindenergie untereinander austauschen. Die einfachste Form des Energieaustausches besteht darin, piezoelektrische und magnetostriktive Wandler in einer oszillierenden Schaltung zu betreiben. Die nichtlinearen und hysteresehafteten Wandlerigenschaften besitzen dabei einen so starken Einfluß auf das Betriebsverhalten, daß eine Ansteuerschaltung zu entwickeln war, in welche die Wandler direkt eingebettet sind. Das Hybridaktorprinzip läßt sich auf den nichtresonatorischen Betrieb oder auf Hybridaktoren bestehend aus einem Festkörperwandler und einem Blindelement erweitern. Als Anwendungsbeispiel steht ein Linearmotor nach dem Inch-worm-Prinzip im Mittelpunkt, bei dem der Einsatz eines Hybridaktors nicht nur zu einem neunmal höheren Wirkungsgrad des Gesamtsystems führt, sondern insgesamt viele Vorteile im Betriebsverhalten gegenüber konventionellen Lösungen aufweist.

1 Einführung

Neben konventionellen Stellgliedern wie Elektromotoren, gewinnen Festkörperwandler auf der Basis piezoelektrischer, elektrostriktiver oder magnetostriktiver Werkstoffe, die sich durch Stellkräfte bis in den Kilonewtonbereich und Reaktionszeiten im Sub-Millisekundenbereich bei Auslenkungen im Promillebereich auszeichnen, zunehmend an Bedeutung. Um die besonderen Fähigkeiten der Festkörperwandler bestmöglich zu nutzen, ist es nicht ausreichend (wenn auch oftmals üblich), den Wandler isoliert zu betrachten. Das gesamte System ist zu berücksichtigen, welches zum einen die äußere Mechanik umfaßt, in welche der Wandler eingefügt ist, zum anderen den Aktor selbst, der nicht nur aus dem Energiewandler besteht, sondern auch den zugehörigen Leistungsverstärker einschließt und gegebenenfalls eine integrierte Signalverarbeitung.

Zur Bestimmung des Energiebedarfs ist deshalb neben der elektromechanischen Kopplung des Wandlers der elektrische Energieverbrauch des kompletten Aktors einzurechnen. Da Festkörperwandler physikalisch bedingt Kapazitäten und Induktivitäten darstellen, ist es für einen hohen Wirkungsgrad des Gesamtsystems unerläßlich, die in diesen Blindelementen gespeicherte elektrische Energie zurückzugewinnen. Zu einem gewissen Grad kann das mit schaltenden Verstärkern realisiert werden, die allerdings konzeptbedingte Nachteile wie eine niedrige Dynamik und Güte der elektrischen Ausgangsgröße aufweisen. In diesem Beitrag wird daher die Idee des Hybridaktors zur

Wirkungsgradoptimierung untersucht, dessen Ansatz darauf beruht, daß komplementäre Wandlertypen ihre Blindenergie untereinander austauschen.

2 Prinzip des Hybridaktors

Die einfachste Form eines Hybridaktors besteht aus einem piezoelektrischen und einem magnetostriktiven Wandler, die elektrisch zu einem Schwingkreis verschaltet werden. Derartige oszillierende Hybridaktoren unterscheiden sich von resonatorischen Anwendungen einzelner (Piezo-)Wandler dadurch, daß sie im Großsignalbetrieb der Wandler arbeiten und damit deren maximal möglichen Stellweg ausnutzen. Untersuchungen zur Resonanzfrequenz und zum Energieinhalt der Wandler haben ergeben, daß Hybridaktoren am sinnvollsten mit piezoelektrischen Niedervolt-Stapelwandlern und magnetostriktiven Wandlern gleichen Bauvolumens realisiert werden können [1, 2]. Ihr Einsatz liegt somit auf dem Gebiet der miniaturisierten Aktoren mit einer Baugröße im Millimeter- bis Zentimeterbereich, bei denen auf spezielle Herstellungsverfahren wie LIGA-Technik oder andere mikromechanische Fertigungstechnologien verzichtet und auf kommerziell erhältliche Wandler und Wandlerwerkstoffe zurückgegriffen werden kann. Mechanisch setzt sich der einfachste Hybridaktor in der Stapelanordnung gemäß **Bild 1** aus einem piezoelektrischen Stack und einem magnetostriktiven Wandler in Form eines Rundstabs zusammen.

Der magnetostruktive Wandler besteht aus dem aktiven Material und der felderzeugenden Spule, wobei der Stab wenige Millimeter länger ist als der Spulenkörper. Berechnungen haben ergeben, daß diese Anordnung zu einer guten Einkopplung des Magnetfeldes in den Stab führt und gleichzeitig einen einfachen Aufbau ohne Bias-Magnetisierung und Flußführung ermöglicht. Zur Auslegung von Hybridaktoren wurde ein iteratives Rechenprogramm entwickelt, welches auf einer energiebasierten Modellierung der Wandler beruht und die nichtlinearen sowie hysteresebehafteten Wandlerkennlinien berücksichtigt [1, 3].

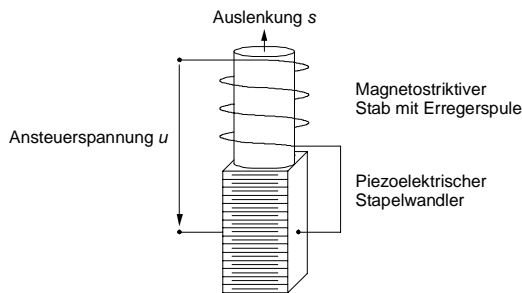


Bild 1 Aufbau eines Hybrid-Stapelwandlers

Das elektrische Netzwerk des Hybridaktors in Bild 1 besteht aus einem Serienschwingkreis der beiden Wandler, gespeist von einer sinusförmigen Spannungsquelle mit einstellbarer Frequenz, Amplitude und Gleichspannungsoffset.

3 Linearmotor auf der Basis eines Hybridaktors

3.1 Elektrische Ansteuerung

Problematisch bei der elektrischen Ansteuerung von Hybridwandlern durch einen Leistungsverstärker mit vorgeschaltetem Oszillator ist die starke Abhängigkeit der Resonanzfrequenz des aus den Wandlern gebildeten Schwingkreises von der mechanischen Last, da die Induktivität von magnetostruktiven Wandlern und die Kapazität von piezoelektrischen Wandlern nicht nur vom anliegenden Strom und der Spannung abhängig sind, sondern zusätzlich auch von der einwirkenden Kraft. Bei veränderlicher Last führt eine fest vorgegebene Frequenz dazu, daß diese nicht der Resonanzfrequenz des Hybridwandlers entspricht und der Wirkungsgrad des Gesamtsystems sogar kleiner werden kann, als wenn die Wandler einzeln ohne Energierückgewinnung betrieben werden. Die Frequenz der Ansteuerspannung muß deshalb auf die Resonanzfrequenz des Hybridwandlers abgestimmt werden, beispielsweise auf Basis eines Phasenvergleichs von Strom und Spannung und einem Oszillator mit steuerbarer Frequenz, der mit Hilfe einen Phase-locked-loop-Regelkreises nachgeführt

wird. Neben einem hohen Schaltungsaufwand können hierbei jedoch Stabilitätsprobleme auftreten.

Ein anderes Ansteuerkonzept beruht deshalb darauf, daß der aus piezoelektrischen und magnetostruktiven Wandlern gebildete Schwingkreis in seiner Eigenfrequenz oszilliert und nur zu Beginn jeder Periode die in Verluste und mechanische Arbeit umgesetzte Energie zugeführt wird. **Bild 2** zeigt den Stromlaufplan für einen Hybridaktor bestehend aus zwei piezoelektrischen und einem magnetostruktiven Wandler, die in die Steuerschaltung eingebettet sind.

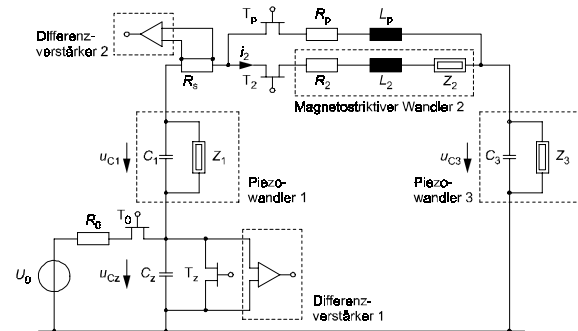


Bild 2 Stromlaufplan der schaltenden Ansteuerung

Zu Beginn der Schwingungsperiode (Zeitpunkt $t = 0$) sind der Piezowandler 1 (C_1, Z_1) auf die Betriebsspannung $u_{C1} = u_0$ und der Zusatzkondensator C_z auf die Spannung u_{Cz} geladen, vgl. **Bild 3**. Durch Schließen von T_2 wird der Strom i_2 durch den magnetostruktiven Wandler (L_2, R_2, Z_2) freigegeben (Phase 1 beginnt). T_z überbrückt den Zusatzkondensator C_z , sobald der Differenzverstärker 1 die Spannung $u_{Cz} = 0$ erkennt. Piezowandler 3 wird aufgeladen, bis der Differenzverstärker 2 an dem Widerstand R_s den Strom Null detektiert, daraufhin wird T_2 gesperrt und T_p wird geöffnet (Phase 2 beginnt), so daß die Ladung über die Parallelspele (L_p, R_p) von C_3 auf C_1 zurückgeführt wird. Ist die Eingangsspannung am Differenzverstärker 2 und damit auch der Strom erneut Null, öffnet T_p und der Zyklus ist beendet. C_1 befindet sich wieder auf seiner Betriebsspannung u_0 , T_z wird geöffnet und C_z kann über T_0 für einen neuen Zyklus geladen werden. **Bild 3** zeigt den Strom-/Spannung-Zeit-Verlauf während eines Zyklus.

Der Hybridaktor schwingt immer in der Resonanzfrequenz, welche von der Kapazität und der Induktivität der Wandler bestimmt wird, und nicht mit einer von einem Oszillator vorgegebenen Frequenz. Auf diese Weise kann sich die schaltende Ansteuerung den von der mechanischen Last hervorgerufenen Frequenzänderungen selbsttätig anpassen, und ihr Betriebsverhalten ist damit unabhängig von der äußerem Last. Die maximale Arbeitsfrequenz des Hybridaktors ist durch seine Resonanzfrequenz vorgegeben, geringere Frequenzen bis hinab zum quasistatischen Betrieb können

durch Pausen vor Beginn eines neuen Zyklus erreicht werden. Die Arbeitsfrequenz des Hybridaktors ist damit einstellbar [3].

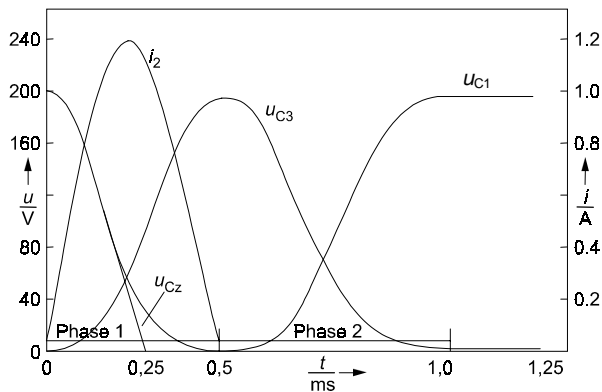


Bild 3 Strom-/Spannung-Zeit-Verlauf

3.2 Mechanischer Aufbau

Der Auslenkung-Zeit-Verlauf der schaltenden Ansteuerung mit zwei piezoelektrischen und einem magnetostruktiven Wandler entspricht auch dem Bewegungsablauf von Klemmung und Vorschub eines Linearmotors nach dem Inch-worm-Prinzip, wenn die piezoelektrischen Wandler für die Klemmer und der magnetostruktive Wandler für den Vorschub verwendet werden. Die realisierte Konstruktion eines solchen Motors ist in **Bild 4** dargestellt [5].

Zu Beginn des Zyklus ist Klemmer (1) geschlossen und Klemmer (3) geöffnet. Die Spule des magnetostruktiven Wandlers (2) wird angesteuert und der magnetostruktive Stab dehnt sich aus. Die Klemmung wechselt von (1) auf (3) und die Spule

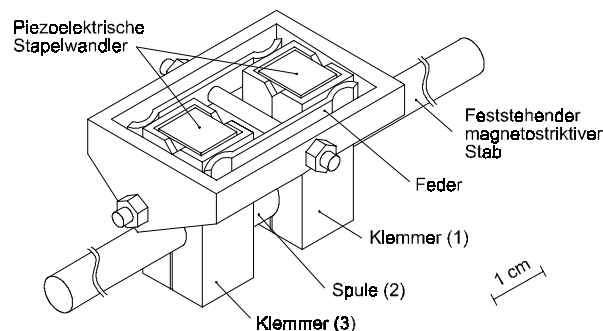


Bild 4 Linearmotor mit Hybridaktor

wird abgeschaltet, so daß der magnetostruktive Stab auf seine ursprüngliche Länge kontrahiert. Die Klemmung wechselt wieder von (3) auf (1), der Läufer hat sich um die Auslenkung des magnetostruktiven Wandlers bewegt und ein Zyklus ist abgeschlossen.

Kernstück des Läufers sind die beiden Klemmer, die jeweils von einem piezoelektrischen Stapelwandler mit einer Länge von 10 mm betätigt werden. Die Klemmer arbeiten nach dem Scherenprinzip, wobei die Seite,

welche den Stab klemmt, doppelt so lang ist wie die Seite mit den Piezowandlern. Zwei Federn erzeugen die erforderliche Vorspannung für die Wandler und drücken diese gleichzeitig kraftschlüssig in die Klemmer. Auffallend gegenüber bisher realisierten Linearmotoren mit Festkörperwandlern sind der fest eingespannte magnetostruktive Stab und die bewegliche Spule. Diese Anordnung nutzt das aktive magnetostruktive Material zwar nicht vollständig aus, ermöglicht aber einen einfachen Aufbau ohne zusätzliches Flußführungsmaterial oder Biasmagneten und trägt damit wesentlich zu einem kompakten und miniaturisierten Gesamtsystem bei. Die Vorspannung des magnetostruktiven Stabes erfolgt durch die Federeigenschaften einer Schraube, die Art der Einspannung gewährleistet, daß der magnetostruktive Stab nicht auf Zug oder Biegung beansprucht wird, was auch für das Anbringen der Last erfüllt sein muß, beispielsweise durch eine Ankopplung über Faden und Umlenkrolle.

Ein kritischer Punkt ist die Konstruktion der Klemmer, welche bei einer Wandlerauslenkung von 10 µm durch die Wegübersetzung von zwei einen Klemmweg von 20 µm aufweisen. Der kommerziell erhältliche magnetostruktive Stab hat ohne (aufwendige) Nachbearbeitung eine Durchmesser-toleranz von 10 µm, dieses entspricht bereits der halben Auslenkung der Klemmer. Die Klemmer müssen derart gestaltet sein, daß sie eine möglichst hohe Reibkraft gegenüber dem magnetostruktiven Stab aufbringen, ohne diesen zu beschädigen. Sie werden aus Messing gefertigt, eine Erhöhung des Reibkoeffizienten wäre mit anderen Materialien möglich.

3.3 Betriebsverhalten

3.3.1 Resonatorischer Betrieb

Der magnetostruktive Wandler hat eine Auslenkung von 10 µm; bei der Arbeitsfrequenz von 650 Hz liegt die Geschwindigkeit des Motors damit bei 7.8 mm/s. Die erreichbare Vorschubkraft beträgt 20 N, in diesem Betriebspunkt besitzt der Motor eine mechanische Leistung von 100 mW, und der Wirkungsgrad ist neunmal so hoch, als wenn die in den Wandlern gespeicherte Energie nicht zurückgewonnen wird. Außer einem hohen Wirkungsgrad bietet die schaltende Ansteuerung speziell beim Einsatz im Linearmotor noch weitere nennenswerte Vorteile: Durch Zuschalten einer Hilfsspule (L_p , R_p , vgl. Bild 2) läßt sich die Schrittweite des Motors stufenlos bis auf Null reduzieren. Unabhängig davon werden die Piezowandler in den Klemmern stets mit ihrer maximalen Betriebsspannung angesteuert und stellen damit eine zuverlässige Klemmung sicher. **Bild 5** zeigt die Klemmkraft (erzeugt von den Piezowandlern) sowie den Vorschub des Läufers (erzeugt vom magnetostruktiven Wandler) als Funktion der Zeit.

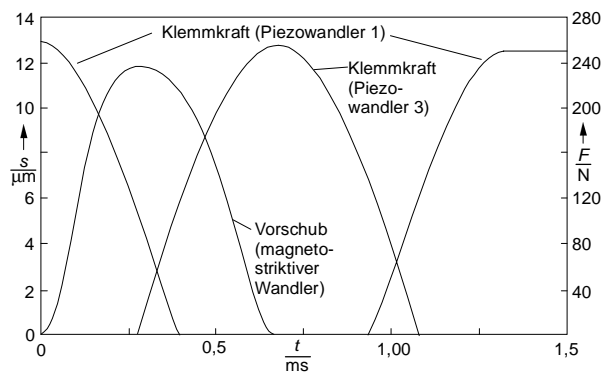


Bild 5 Klemmkraft-Vorschub-Diagramm des Hybridaktors im Linearmotor

Man erkennt, daß der magnetostriktive Wandler aufgrund seiner nichtlinearen Auslenkung-Strom-Kennlinie bereits eine Auslenkung von $10 \mu\text{m}$ erreicht (zum Zeitpunkt $t = 0.2 \text{ ms}$), wenn die Klemmkraft von Klemmer 1 noch 200 N beträgt. Bei einer linearen Kennlinie des magnetostriktiven Wandlers läge die Klemmkraft bei wesentlich niedrigeren Werten. Darüber hinaus besitzt der Piezowandler in Klemmer 1 zu diesem Zeitpunkt aufgrund der Hysterese in seiner Auslenkung-Spannung-Kennlinie noch eine größere Auslenkung und damit eine höhere Klemmkraft, als er bei einer linearen Kennlinie hätte. Auf diese Weise verbessern die nichtlinearen Eigenschaften der Wandler sogar das Betriebsverhalten des Motors, wobei allerdings nicht verschwiegen werden darf, daß die Hysterese unerwünschte innere Verluste verursacht.

Mit der bewegten Last ändert sich zwar die Kraft auf den magnetostriktiven Stab und damit auch die Resonanzfrequenz des Hybridaktors, durch die schaltende Ansteuerung ist dieser jedoch in der Lage, sich den Frequenzänderungen und unterschiedlichen Betriebspunkten des Motors selbsttätig anzupassen. Der Startimpuls für einen Schritt der Motorbewegung wird von einem Mikrocontroller vorgegeben, die Geschwindigkeit wird damit von der Taktfrequenz der Startimpulse bestimmt und ist nicht nur lastunabhängig, sondern beliebig zwischen Null und der Resonanzfrequenz des Hybridaktors einstellbar. Im Stillstand ist einer der beiden Piezowandler geladen und ein Klemmer geschlossen, der Motor verfügt so über eine leistungslose Haltekraft.

3.3.2 Nichtresonatorischer Betrieb

Im resonatorischen Betrieb des Hybridaktors sind die Wegauslenkungen der Wandler zwar durch die Nichtlinearitäten und Hystereseeffekte verzerrt, die Grundwelle ist jedoch so dominierend, daß die Auslenkung insgesamt als nahezu sinusförmig bezeichnet werden kann. Es werden noch mehr Anwendungsgebiete erschlossen, wenn sich auch andere Ausgangssignale erzielen lassen, wie etwa ein dreieckförmiger, rechteckförmiger oder frei

vorgegebbarer Weg-Zeit-Verlauf. Durch eine geeignete Ansteuerung des Hybridwandlers ist dieses möglich, wobei das erforderliche Eingangssignal mit einer Erweiterung des iterativen Rechenprogrammes bestimmt werden kann [1, 6]. Neben den nichtlinearen Wandlerkennlinien werden in diesem Programm auch Grenzwerte für Spannung, Strom und Frequenz berücksichtigt, so daß dasjenige Eingangssignal ermittelt wird, welches zu einer Wegauslenkung des Hybridaktors führt, die unter den vorgegebenen Randbedingungen der Vorgabe am nächsten kommt. Auf diese Weise läßt sich beispielsweise eine schnelle Schaltfunktion realisieren, in welcher im Gegensatz zu Lösungen mit einem einzelnen Wandler keine hohen Spannungen oder Ströme auftreten. Neben einem analogen Spannungssignal kann zur Ansteuerung auch ein schnell schaltendes digitales Signal verwendet werden, da der Hybridaktor aus einem Schwingkreis mit Kapazität und Induktivität besteht und sich so weder Spannung noch Strom am Wandler sprunghaft ändern können. Der Aufwand für die Leistungselektronik reduziert sich dadurch beträchtlich.

4 Konzept des smarten Linearmotors

Festkörperwerkstoffe verfügen über inhärente Sensoreffekte, so daß die Wandler nicht nur als Aktoren, sondern gleichzeitig auch als Sensoren genutzt werden können (smarte Aktoren). Die mechanische Größe Kraft, und bei bekannter Dehnung-Strom-Kennlinie des Wandlers auch seine Auslenkung, lassen sich auf diese Weise allein aus den elektrischen Größen am Wandler bestimmen [7]. Der Vorteil von smarten Aktoren liegt nicht nur in der Einsparung eines separaten Sensors, sondern kann darüber hinaus zu einer Vereinfachung der mechanischen Konstruktion beitragen, da das oftmals aufwendige Anbringen des Sensors, etwa im Kraftfluß, entfällt.

Piezokeramiken besitzen einen ausgeprägten direkten Sensoreffekt, indem sie eine elektrische Ladung bei Einwirken einer mechanischen Kraft generieren. Ein derartiger direkter Sensoreffekt ist beim magnetostriktiven Werkstoff weit weniger ausgeprägt und nur schwer auszuwerten. Festkörperaktoren verfügen jedoch auch über einen indirekten Sensoreffekt, der beim magnetostriktiven Wandler darin besteht, daß sich die Permeabilität des Werkstoffes und damit auch die felderzeugende Induktivität mit der mechanischen Kraft ändern. Von den verschiedenen Verfahren zur Bestimmung der Induktivität hat die Parameteridentifikation die besten Ergebnisse gezeigt, wobei eine Modifikation der bekannten Methoden ermöglicht, den stromabhängigen Momentanwert der Induktivität im Großsignalbetrieb des Wandlers zu identifizieren [8]. Bei oszillierenden Hybridaktoren gibt es neben der Parameteridentifikation noch eine

andere Möglichkeit zur Auswertung der indirekten Sensorinformation, die darin besteht, die Resonanzfrequenz zu messen, welche allerdings sowohl von den piezoelektrischen als auch von den magnetostriktiven Wandlern bestimmt wird.

Bei dem Linearmotor erzeugen die piezoelektrischen Wandler die Klemmung, welche stets mit Betriebsspannung erfolgt und unabhängig von der bewegten Last ist, so daß die Kapazität der Wandler gleich bleibt. Die externe Last verändert damit nur die Induktivität des magnetostriktiven Wandlers und eine eindeutige Zuordnung zwischen der Resonanzfrequenz des Hybridaktors und der äußeren mechanischen Last ist gewährleistet. Der Zusammenhang ist in **Bild 6** dargestellt und analytisch in seine zwei Einflußgrößen aufgespalten. Von der Kraft Null an beginnend steigt die Periodendauer T_0 der schaltenden Ansteuerung zunächst an, was auf den zunehmenden Energieverbrauch des Motors zu höheren Kräften hin zurückzuführen ist; anschließend verkleinert sich die Wandlerinduktivität und verringert die Periodendauer.

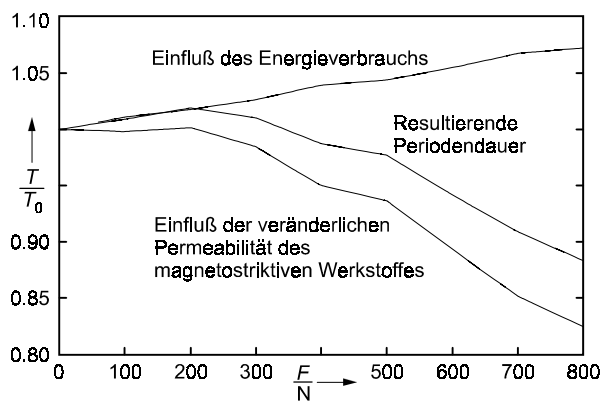


Bild 6 Periodendauer des Linearmotors

Wird der magnetostriktive Stab mit einer Kraft von 300 N vorgespannt, addiert sich zu der Vorspannkraft vorzeichenbehaftet die Kraft auf den Läufer, welche sowohl von Beschleunigungsvorgängen herrührt als auch von verrichteter Arbeit, beispielsweise Anheben einer Last. Je nach Krafrichtung vergrößert oder verkleinert diese Kraft die Vorspannkraft und entsprechend die Periodendauer; bei bekannter Vorspannkraft kann die Kraft auf den Läufer ohne zusätzlichen Sensor bestimmt werden. Die Berechnung kann in dem ohnehin in der Ansteuerung vorhandenen Mikrocontroller erfolgen, in welchem dann die erforderliche Kennlinie für die Zuordnung der Kraft zur Periodendauer abzuspeichern ist. Im Betrieb des Motors können Überlasten erkannt und eine Abschaltung vorgenommen werden, bevor Schäden auftreten. In einem weiteren Schritt kann zusätzlich die kraftabhängige Auslenkung-Strom-Kennlinie im Mikrocontroller abgelegt werden, so daß aus der berechneten Kraft und dem gemessenen Strom der

vom Motor zurückgelegte Weg ohne zusätzlichen Sensor bestimmt werden kann.

5 Weitere Anwendungsbeispiele

Andere Einsatzmöglichkeiten für Hybridaktoren im nichtresonatorischen Betrieb sind Einspritzventile für Verbrennungsmotoren. Ein geformter Einspritzverlauf mit Piloteinspritzung optimiert die Verbrennung im Kolben und führt zu einer Minimierung des Kraftstoffverbrauchs sowie einer Senkung der Geräuschemission. Bei einer Drehzahl von etwa 2000/min benötigt ein Motor für eine Umdrehung 30 ms, der Einspritzvorgang findet nur in einem Bruchteil dieser Zeit statt. Wenn er darüber hinaus noch geformt werden soll, muß das Ventil Frequenzen weit oberhalb 1 kHz schalten können. Derart schnelle Schaltvorgänge sind mit konventionellen Aktoren nicht mehr realisierbar, der Hybrid-Stapelwandler kann aber hierfür eingesetzt werden. Für den Einsatz in Kraftfahrzeugen ist besonders die vereinfachte Leistungselektronik interessant, darüber hinaus ist der Energieverbrauch geringer als bei Konstruktionen mit einem einzelnen Festkörperwandler.

Aufgrund ihres hohen Innenleitwertes haben piezoelektrische und elektrostriktive Wandler, genau wie kapazitive Blindelemente, die Fähigkeit, elektrische Ladungen nahezu verlustlos zu speichern. Bei konstanter Ansteuerspannung ist daher nur ein minimaler Strom erforderlich, damit die Wandler ihre Auslenkung beibehalten. Für eine schaltende Ansteuerung (vgl. Bilder 2 und 3) bedeutet diese Eigenschaft, daß der Zustand vor Beginn der Phase 1 (wenn der Piezowandler C_1 geladen ist) oder Phase 2 (wenn der Piezowandler C_3 geladen ist) mit vernachlässigbar kleinem Energieaufwand erhalten werden kann, solange der Stromfluß durch den magnetostriktiven Wandler nicht freigegeben wird. Die schaltende Ansteuerung eignet sich daher gut für einen quasistatischen Betrieb: Eine mögliche Anwendung ist das in **Bild 7** dargestellte Relais mit zwei piezoelektrischen Stapelwandlern und einem magnetostriktiven Wandler. Prinzipiell sind mit einem

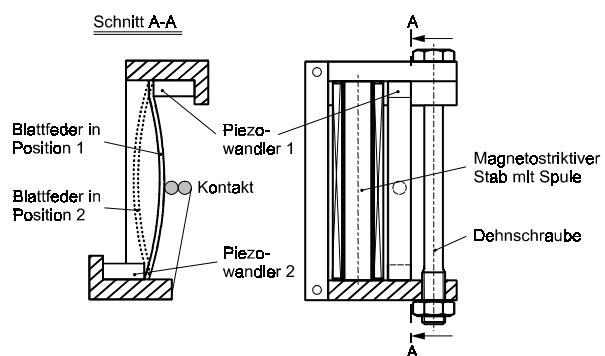


Bild 7 Relais mit Festkörperwandlern

solchen Relais Schaltzeiten von 2 ms möglich, die mitkonventionellen Schaltgliedern nicht mehr erreichbar sind. Wenn allerdings kurze Schaltzeiten nicht erforderlich sind, wird es sich aufgrund der Kosten für drei Festkörperwandler, kombiniert mit hohen Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit, nicht gegen elektromechanische Lösungen durchsetzen können.

6 Ausblick

Grundlegende Überlegungen zum mechanischen Aufbau von Festkörperwandlern und deren Energieinhalten haben gezeigt, daß die Hybridaktoridee am sinnvollsten für piezoelektrische Niedervolt-Stapelwandler mit einer Baugröße im Zentimeterbereich und magnetostruktive Wandler ähnlicher Abmessung anzuwenden ist; die Untersuchungen haben sich daher auch hauptsächlich auf diese Bauart konzentriert. Eine Erweiterung des Prinzips auf Hybridaktoren bestehend aus einem Einzelwandler und einem elektrischen Blindelement ist möglich, dann können beispielsweise auch piezoelektrische Niedervolt-Biege wandler verwendet werden. Ein solcher Hybridaktor hat in der aktiven Schwingungsdämpfung zu guten Resultaten geführt. Eine Übertragung auf Hybridaktoren, bestehend aus einem magnetostruktiven Wandler und einem Kondensator, ist ebenso denkbar wie eine Kombination mehrerer gleichartiger Wandlertypen, etwa in verteilten Aktorsystemen, mit entsprechenden Blindelementen.

Eine Übertragung der Hybridaktoridee auf elektrisch steuerbare Fluide (elektorrheologische und magnetorrheologische Flüssigkeiten) ist jedoch wenig sinnvoll, da die Kapazitäten von elektorrheologischen Aktoren sehr klein sind und daher zu einer Resonanzfrequenz führen, die weit oberhalb der Grenzfrequenz der Flüssigkeiten liegt. Eine Kombination von magnetorrheologischen Aktoren mit Piezowandlern ist vom Energieinhalt und Frequenzbereich der Wandler her gesehen sinnvoll, hier liegt das Problem in den vollkommen unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der Wandler. Falls diese sich für eine Anwendung jedoch geeignet kombinieren lassen, stellt ein Hybridaktor einen interessanten Ansatz dar, den Wirkungsgrad des Systems zu erhöhen. Vorstellbar wäre etwa ein resonatorischer Antrieb durch einen Piezowandler, verbunden mit einer aktiven Dämpfung durch die magnetorrheologische Flüssigkeit.

7 Literatur

[1] Clephas, B.: Untersuchung von hybriden Festkörperaktoren. Dissertation. Universität des Saarlandes, Saarbrücken (1999)

- [2] Janocha, H., Clephas, B.: Hybrid actuators with piezoelectric and magnetostrictive material. Proceedings Actuator, Bremen, Germany (1996), pp. 304-307
- [3] Clephas, B., Janocha, H.: Mathematische Methoden zur Berechnung und Simulation von adaptiven Systemen. VDI Fortschrittsberichte 244, Düsseldorf, Deutschland: VDI-Verlag (1997), S. 117-126
- [4] Janocha, H., Clephas, B.: High efficiency linear motor utilizing hybrid actuators. Proceedings II Mechatronics, Guimarães, Portugal (1996), pp. 249-254
- [5] Clephas, B., Janocha, H.: New linear motor with hybrid actuator. Proceedings SPIE Smart Structures and Materials 3041, San Diego, USA (1997), pp. 316-325
- [6] Clephas, B., Janocha, H.: Extended performance of hybrid actuators. Proceedings 4th European Conference on Smart Structures and Materials, Harrogate, UK (1998), pp. 81-88
- [7] Janocha, H., Kuhnen, K., Clephas, B.: Inherent sensory capabilities of solid state actuators. VDI Fortschrittsberichte, Reihe 11 Nr. 268. Düsseldorf, Deutschland VDI-Verlag (1998), S. 33-42
- [8] Clephas, B., Janocha, H.: Simultaneous sensing and actuation of a magnetostrictive transducer. Proceedings SPIE Smart Structures and Materials 3329, San Diego, USA (1998), pp. 174-184

Literaturangaben zum Thema Hybridaktoren sind in größerer Breite in [1] zu finden.

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung der Untersuchungen.