

Gebrauchsmuster **DE 202 01 578.5**, Deutschland:

**Zusammengesetzter, symmetrischer Biegeaktuator mit Memory-Elementen**

*Anmelder:* 1<sup>st</sup> Memory Alloys GmbH

*Erfinder:* H. Steckmann, V. Prieb

*Int. Cl.:* F25B 49/02

Tag der Anmeldung **2.02.2002**

Beschreibung:

Die Erfindung betrifft einen Memory-Biegeaktuator zum Erzeugen von periodischen, wechselseitigen Biegebewegungen, der aus zwei Streifen aus einer Memory-Legierung bzw. aus zwei Memory-Streifen und einer elastisch biegsamen, die beiden Memory-Streifen voneinander elektrisch und thermisch gut isolierenden Zwischenschicht besteht und symmetrische Biegebewegungen in zwei Gegenrichtungen bei wechselnder Erwärmung einer Memory-Streifen nach der anderen durch elektrischen Stromimpulse aufweist. Der auf diese Weise zusammengesetzte Memory-Aktuator wird durch einen Umschalter an eine Stromquelle angeschlossen, so daß jede Memory-Streife eine nach der anderen durch den Umschalter in einen Stromkreis mit der Stromquelle angeschlossen und durch periodische Stromimpulse erwärmt wird. Die Stromimpulse werden durch einen elektronischen Zeitgeber gesteuert. Um die Abkühlungsgeschwindigkeit der Memory-Streifen und dadurch die Arbeitsfrequenz des erfindungsgemäßen Memory-Aktuators zu vergrößern, kann der Memory-Aktuator mit seinem passiven, unbeweglichen Rand an einem Kühlthermostat angeschlossen werden.

Aus dem Stand der Technik sind verschiedene Aktuatoren mit elektromechanischen Memory-Elementen bekannt. Ihrem Funktionsprinzip liegt eine Formänderung eines Memory-Elements bei seiner Erwärmung durch elektrischen Strom zugrunde, die in Translations- oder Rotationsbewegungen übersetzt wird.

In DE 198 43 739 A1 ist ein elastisches Gelenkelement beschrieben, das aus einem schlauchartigen Polymergrundkörper und aus einigen, in seine Wand eingebauten Memory-Drähten besteht. Durch die Erwärmung der vorverformten Memory-Drähten in verschiedenen Reihenfolgen können somit verschiedene Bewegungsarten erzielt werden. Die für die reversiblen und wiederkehrenden Bewegungen notwendige Wiederherstellung der martensitischen Rastverformung von Memory-Elementen erfolgt während Abkühlungsstadien beim Ausschalten des elektrischen Stroms durch die Wirkung der elastischen Kraft des mit einer Flüssigkeit gefüllten Polymerrohres und durch den Druck dieser Flüssigkeit.

In DE 100 30 025 A1 ist eine Vorrichtung zur Positionierung eines Stellelements vorgelegt, die ein reversibel dehnbares und kontrahierbares, elektromechanisches Element aus einer Memory-Legierung enthält, dessen Hinbewegung durch den elektrischen Strom mit steuerbarer Stromstärke und dessen Rückbewegung durch die elastische Kraft einer Gegenfeder beim ausgeschalteten Strom initiiert werden.

Ein Biegeaktuator mit großen Ablenkungen aus einem in ein elastisches Rohr eingebetteten Memory-Draht wird von Wang und Shahinpoor in „A new design for a bending muscle with an embedded SMA wire aktuator“ (SPIE, Vol. 2715, 1996, 51-61) vorgeschlagen, in dem die martensitische Rastverformung eines aktiven Memory-Drahtes im Tieftemperaturzustand ebenfalls durch die elastische Kraft des Rohres wiederhergestellt wird.

In all diesen Lösungsvarianten wird für die Wiederherstellung der Tieftemperaturform bzw. der martensitischen Rastverformung von Memory-Elementen während ihrer Abkühlung eine elastische Gegenkraft gebraucht, die während der Erwärmung entgegenwirkt, linear zunimmt und dadurch die aktive Kraft des Aktuators stark reduziert.

Von denselben Autoren wird in „Design for shape memory alloy rotatory joint aktuators using shape memory effect and pseudoelastic effect“ (SPIE, Vol.3040, 1997, 23-30) ein Drehaktuator dargelegt, in dem ein passiver Memory-Draht in seinem pseudoelastischen Zustand, anstatt einer normalen, linear elastischen Gegenfeder, einem anderen, aktiven, durch den elektrischen Strom erwärmten Memory-Draht in seinem pseudoplastischen Zustand entgegengesetzt

wird. Dies läßt zwar die lineare Steigung der elastischen Gegenkraft vermeiden, aber das Spannungsniveau im passiven Memory-Draht, das für seine pseudoelastische Verformung notwendig ist, bleibt hoch, wodurch der Nutzungsgrad des Memory-Aktuators ebenfalls verringert wird.

Außer den oben bezeichneten Nachteilen weisen derartige Memory-Aktuatoren noch einen wesentlichen Nachteil auf. Ein Arbeitszyklus besteht aus einem aktiven Erwärmungsstadium und einem nachfolgenden, passiven Abkühlungsstadium, das wegen Wärmeaustauschbedingungen viel länger als das erste dauert. Dies bedeutet für alle bisher bekannten Aktuatoren mit aktiven Memory-Elementen, daß sie nicht nur auf die Kraft bezogene, durch die Anwendung eines passiven elastischen Elements verursachte Asymmetrie, sondern auch die auf die Zeit bezogene Asymmetrie ihres Arbeitszyklus nachteilig aufweisen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen Memory-Biegeaktuator darzulegen, der eine große Kraft bei großen Ablenkungen ausübt, in beide Biegerichtungen aktiv gesteuert werden kann und einen sowohl auf die Kraft, als auch auf die Zeit bezogen symmetrischen Arbeitszyklus aufweist.

Erfindungsgemäß gelingt die Lösung dieser Aufgabe durch die Merkmale des unabhängigen Patentanspruchs 1. Vorteilhafte Ausführungsformen und zweckmäßige Weiterbildungen der Erfindung sind in Unteransprüchen beschrieben.

Die für einen wechselseitig aktiv gesteuerten symmetrischen Aktuator geeignete Lösung nutzt den Memory- sowie den mit ihm verbundenen Krafteffekt zweier in einem Zwillingungsverhältnis zusammengesetzten Memory-Biegeelementen, die bei ihrer wechselnden Erwärmung durch den elektrischen Strom gegeneinander wirken und dadurch kraft- und zeitsymmetrische Bewegungen mit einer bestimmten Frequenz produzieren.

Der erfindungsgemäße Memory-Aktuator besteht aus zwei mit Strom beaufschlagbaren Memory-Biegeelementen, aus einer elastischen, elektrisch und thermisch isolierenden Zwischenschicht, die die beiden Biegeelemente voneinander trennt, aus einem Befestigungsbolzen, der auch als ein elektrischer Kontakt dient, und aus zwei weiteren elektrischen Kontakten an den anderen, beweglichen Endungen der Memory-Elemente.

Die vorteilhafte Zusammensetzung der elektromechanischen Memory-Biegeelemente in einem Zwillingungsverhältnis besteht darin, daß jedes Memory-Element bei der Formrückstellung durch seine, zur Erwärmung führende Strombeaufschlagung mit einer von der Temperatur abhängigen Kraft gegen sein Zwillingselement wirkt. Da sich das Zwillingselement während dessen im Abkühlungsstadium bzw. im abgekühlten, vollkommen martensitischen Zustand mit der kleinen pseudoplastischen Fließgrenze des Martensits  $\sigma_p^M$  befindet, wird es durch die mit der Temperatur steigende Rückstellungskraft des anderen, zu erwärmenden Memory-Elements martensitisch verformt. Diese Ausführung vereinfacht die Konstruktion durch das Wegfallen eines passiven elastischen Elements, das die ursprüngliche martensitische Rastverformung während der Abkühlung des aktiven Memory-Elements wiederherstellt.

Die Rückstellungskraft bzw. -spannung  $\sigma_R^E(T)$  eines Memory-Elements kann durch die Temperatursteigerung bis zur echten plastischen Fließgrenze  $\sigma_y$  erhöht werden, ohne reversible Memory-Eigenschaften bzw. Arbeitscharakteristiken des Memory-Aktuators zu beeinflussen. Die martensitische Fließgrenze  $\sigma_F^M(T)$  sinkt im austenitischen Zustand mit der Temperatursenkung bis zur Fließgrenze  $\sigma_p^M$ , die nicht mehr von der Temperatur abhängig ist. Auf diese Weise kann die Spannungsdifferenz  $\sigma_R^E(T) - \sigma_F^M(T) = \sigma(T)$  bis zu ihrem maximalen Wert  $\sigma_y - \sigma_p^M = \sigma_{\max}$  erhöht und für die nützliche Arbeit des erfindungsgemäßen Memory-Biegeaktuators eingesetzt werden.

Besonders vorteilhaft ist es dabei, daß diese Spannungsdifferenz bzw. die beim Ablenken des Aktuators aus seiner neutralen Mittelposition ausgeübte Kraft, im Unterschied zu Aktuatoren mit einem passiven elastischen Element, mit dem Ablenkungswinkel nicht abnimmt sondern zunimmt und bleibt bei einem maximalen Wert konstant. Der Wert der konstanten Kraft oder der Kraftzunahme kann dabei durch die Temperaturdifferenz von beiden Memory-

Zwillingselementen gesteuert werden, d.h. durch die Dauer des erwärmenden Stromimpulses an einem Biegeelement und durch die Wärmeabfuhrbedingungen, die die Abkühlungstemperatur und dementsprechend die Fließgrenze  $\sigma_F^M(T)$  des zweiten Memory-Biegeelements bestimmen.

Der erfindungsgemäße Memory-Aktuator weist durch Verzicht auf ein passives, elastisches Element und Verwendung von zwei aktiven, als Zwillinge zusammengesetzten Memory-Biegeelementen weitere wesentliche Vorteile auf.

Bei bekannten Ausführungsformen von Memory-Aktuatoren wird seine Bewegung in einem Arbeitszyklus nur in eine Richtung durch die Strombeaufschlagung aktiv gesteuert, so daß die Rückstellungskraft des Memory-Elements die nützliche Arbeit gegen eine Außenkraft nur in eine Richtung leisten kann. Die zweite Hälfte des Arbeitszyklus besteht in einer passiven Wiederherstellung der ursprünglichen martensitischen Rastverformung des aktiven Memory-Elements durch eine elastische Gegenfeder. Bei der erfindungsgemäßen, vorteilhaften Zusammensetzung von zwei aktiven Memory-Elementen in einem Zwillingeverhältnis werden die Biegebewegungen des erfindungsgemäßen Memory-Aktuators in beiden Richtungen während eines Arbeitszyklus durch den elektrischen Strom aktiviert. Dabei wird bei den Bewegungen in beide Richtungen sowohl die Arbeit für die Wiederherstellung der martensitischen Rastverformung im anderen Memory-Zwillingselement, als auch die nützliche Arbeit gegen eine Außenkraft ausgeübt, so daß ein Arbeitszyklus des erfindungsgemäßen Memory-Aktuators kraftsymmetrisch wird.

Bei bekannten Memory-Aktuatoren besteht ein asymmetrischer Arbeitszyklus aus einer Erwärmung bis zur Endtemperatur  $A_f$  der martensitischen Rückumwandlung und einer Abkühlung mindestens bis zur Endtemperatur  $M_f$  der martensitischen Hinumwandlung, wobei die durch Stromstärke einstellbare Erwärmungszeit mehrfach kürzer ist als die durch Wärmeabfuhr bestimmte Abkühlungszeit. Bei dem erfindungsgemäßen Memory-Aktuator ist die vollständige Hinumwandlung durch die Abkühlung nicht notwendig, denn die martensitische Hinumwandlung und die Wiederherstellung der pseudoplastischen martensitischen Rastverformung eines der Memory-Zwillingselemente können durch die während der Erwärmung steigende Rückstellungskraft des anderen Memory-Zwillingselements bereits bei der Starttemperatur  $A_s$  der martensitischen Rückumwandlung erfolgen. Wenn die Stromstärke so eingestellt wird, daß die Erwärmungszeit auch für die Abkühlung eines Memory-Zwillingselements bis zur Temperatur  $A_s$  ausreicht, besteht der Arbeitszyklus des erfindungsgemäßen Memory-Aktuators aus den einander gleichen Erwärmungszeiten der beiden Zwillingselemente und ist dadurch zeitsymmetrisch.

Weitere Einzelheiten, Aufbaudetails und Funktionsbesonderheiten werden anhand der Zeichnungen erläutert. Es zeigen:

Fig. 1: Eine der Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Memory-Aktuators in seiner neutralen Position (a) und zwei wechselseitigen Ablenkungspositionen (b, c).

Fig. 2: Hochtemperaturformen der beiden Memory-Streifen (1) (a, b) und ihr Zusammenbau (c) in einem Zwillingeverhältnis zu dem erfindungsgemäßen Memory-Aktuator mit einem angeschlossenen Kühlthermostat (4).

Fig. 3: Spannung-Verformung- (pseudoplastische Verformung des Martensits) (a), Verformung-Temperatur- (Formrückstellung) (b) und der Spannung-Temperatur- (Rückstellungskraft) (c) Diagramme von Memory-Legierungen.

Fig. 4: Arbeitszyklusdiagramme – Zeitabhängigkeiten des elektrischen Stroms  $I$  und der Temperaturen  $\theta_{E1}, \theta_{E2}$  in den beiden Memory-Elementen (1) (a), des Ablenkungswinkels  $\alpha$  (b) und der Kraft  $\Phi$  in einzelnen Memory-Elementen (E1, E2) und in dem zusammengesetzten Memory-Aktuator (A) (c).

Fig. 1 zeigt schematisch die Ausführungsform des erfindungsgemäßen, vom elektrischen Strom betriebenen Memory-Aktuators (a) und seine Funktionsweise (b, c). Der

Memory-Aktuator (a) besteht aus zwei Memory-Streifen (1), aus einer elastisch biegsamen, elektrisch und thermisch isolierenden Zwischenschicht (2) und einem Befestigungsbolzen (3), der gleichzeitig als ein elektrischer, an eine Stromquelle permanent angeschlossener Kontakt für die beiden Memory-Streifen (1) dient. Zwei weiteren elektrischen Kontakte an den beweglichen Endungen der Memory-Schleifen (1) werden wechselnd an dieselbe Stromquelle durch einen Umschalter angeschlossen, der hier, wie auch die Verdrahtung, der Umschalter und die Stromquelle selbst, nicht näher definiert wird. Eine Beaufschlagung der oberen Memory-Streife (1) mit dem elektrischen Strom führt zur Ablenkung des erfindungsgemäßen Memory-Aktuators auf einen bestimmten Winkel nach unten (b), während das Umschalten des elektrischen Stroms an die untere Memory-Streife (1) die Ablenkung des erfindungsgemäßen Memory-Aktuators nach oben (c) verursacht. In der weiteren Beschreibung werden die Arbeitsphase (b) im positiven und die Arbeitsphase (c) im negativen Bereich gezeichnet

Nähere Aufbaudetails des erfindungsgemäßen Memory-Aktuators sind in Fig. 2 a, b, c dargestellt. Die beiden Memory-Streifen (1) mit der Stärke  $2t$  und der zu erwärmenden, aktiven Länge  $L$  (der Abstand zwischen den elektrischen Kontakten) werden zu einem Bogen mit dem gleichen Radius  $R$  plastisch verformt (a, b). Diese plastische Verformung kann auf zwei Wegen eingeprägt werden. Entweder werden die beiden bei der Raumtemperatur durch die leichte martensitische Verformung gebogen und in einer diese Form fixierenden Vorrichtung bei ca.  $800^{\circ}\text{C}$  kurz geglüht, oder direkt bei der Temperatur ca.  $800^{\circ}\text{C}$  plastisch verformt. Die konkaven Streifenseiten (in Fig. 2a und 2b durch  $k$  bezeichnet) sollen vor weiteren Behandlungen markiert werden. Die durch die plastische Verformung erhaltene Hochtemperaturform wird dann bei der Raumtemperatur durch die martensitische Verformung zu der geraden Tieftemperaturform geändert. In dieser geänderten Tieftemperaturform werden die beiden Memory-Streifen (1) mit den konkaven, markierten Seiten zu einander, also in einem Zwillingsverhältnis, zusammengesetzt (Fig. 2c) und mit einem Bolzen (3) befestigt, wobei zwischen den beiden Memory-Streifen (1) eine elastisch biegsame, elektrisch und thermisch gut isolierende Zwischenschicht (2) gelegt wird, die mit beiden Memory-Streifen (1) in einem freigleitenden Kontakt ist. Der passive, mit dem Bolzen (3) befestigte Rand des erfindungsgemäßen Memory-Aktuators kann mit einem Kühlthermostat (4), beispielsweise, bei  $0^{\circ}\text{C}$  (Fig. 2 c) in einen guten thermischen Kontakt gebracht werden, damit eine größere und konstante Abkühlungsgeschwindigkeit der Memory-Streifen (1) erreicht wird. Da bei der Rückstellung der martensitischen Verformung (der Rückkehr der Memory-Streife (1) zu ihrer gebogenen Hochtemperaturform) einer durch den elektrischen Stromimpuls beaufschlagten Memory-Streife (1) die andere abgekühlte Memory-Streife (1) weiter und am Endeffekt doppelt martensitisch verformt wird und die martensitische Verformung bei polykristallinen Memory-Legierungen nicht mehr als  $\varepsilon_{\max}^M = 0.05$  beträgt, soll das Verhältnis  $\varepsilon_{\max}^M = \frac{t}{R} \leq 0.05$  oder  $R \geq 20t$  gewährt werden, damit keine irreversible plastische Verformung in Memory-Streifen (1) bei der Arbeit des erfindungsgemäßen Memory-Aktuators auftritt.

Fig. 3 zeigt die den Memory-Legierungen eigenschaftlichen Diagramme, die das Funktionsprinzip des erfindungsgemäßen Memory-Aktuators zu verstehen helfen. Das Spannungs-Verformungs-Diagramm (Fig. 3 a) zeigt die pseudoplastische Verformung des Martensits bei Temperaturen  $T \leq A_s$  durch die Außenzug- und Außendruckspannungen, die bei der Formänderung zu der geraden Tieftemperaturform an der Zug- und Druckseiten (in der Hochtemperaturform entsprechend die konvexe und konkave Seiten) stattfindet. Auf den Achsen sind relative Spannungs- und Verformungseinheiten aufgetragen. Wenn die Außenspannung die martensitische Fließgrenze  $\sigma_F^M$  erreicht,

beginnt die pseudoplastische martensitische Verformung. Die Fließlinie weist normalerweise einen sehr kleinen Verfestigungskoeffizienten auf, d. h. die martensitische Verformung bis zur oben genannten Grenze  $\varepsilon_{\max}^M = 0.05$  findet bei einer fast konstanten Außenspannung  $\sigma = \sigma_F^M \approx \sigma_{\max}^M$  statt. Die martensitische Verformung der Memory-Streifen (1) in ihrer geraden Tieftemperaturform entspricht dem Punkt A an der Zugseite und dem Punkt B an der Druckseite bzw. den Punkten A' und B' nach ihrer elastischen Entlastung.

Die Rückstellung der martensitischen Verformung einer der Memory-Streifen (1) bei ihrer Erwärmung entspricht dem Temperaturbereich  $A_s \div A_f$  des Diagramms in Fig. 3 b. Hier sind die Koordinatenachsen ebenfalls durch relative Verformungs- und Temperatureinheiten bezeichnet. Das Diagramm beschreibt in allgemeinem die Formänderung eines Memory-Elements bei seiner Temperaturänderung unter konstanter Last  $P$ . Beim Abkühlen im Intervall  $M_s \div M_f$  verformt sich das Element unter der Wirkung der konstanten Last, und beim Erwärmen im Intervall  $A_s \div A_f$  wird diese martensitische Verformung zurückgestellt, wobei das Memory-Element eine nützliche Arbeit leistet, indem es die Last  $P$  bewegt. Ein Memory-Element mit einem Querschnitt  $S$  kann eine Last bzw. eine Außenkraft  $P$  bis zu seiner plastischen Fließgrenze  $\sigma_y = \frac{P}{S}$  bewältigen, ohne seine reversible Memory-Eigenschaften zu verlieren.

Wenn das Memory-Element die Last  $P$  nicht bewältigen kann (Festklemmung  $P \rightarrow \infty$ ), entwickelt sich in diesem Element bei seiner Erwärmung, beispielsweise, bis zur Temperatur  $T_y$ , bei der die plastische Fließgrenze erreicht wird, eine Innenspannung (Fig. 3 c). Wenn das Memory-Element nach dem Erreichen einer Temperatur  $T_{\max}$  wieder abgekühlt wird, sinkt die Innenspannung reversibel, aber mit einer Hysterese wieder auf die Null.

Aufgrund dieser grundsätzlichen Eigenschaften von Memory-Legierungen funktioniert auch der erfindungsgemäße Memory-Aktuator. Das Diagramm in Fig. 3 a kann für die Beschreibung des Funktionsprinzips des erfindungsgemäßen Memory-Aktuators benutzt werden, wenn wir ein Teil des Diagramms, oben rechts, für die martensitische Verformung der oberen Memory-Streifen (1) (Fig. 1a und 2c) und ein anderes, unten links, für die martensitische Verformung der unteren Memory-Streife (1) festlegen. Beim ersten Erwärmen der oberen Memory-Streife (1), deren anfängliche Rastverformung auf diesem Diagramm dem Punkt A' entspricht, wird die martensitische Verformung in dieser Memory-Streife (1) entsprechend dem Diagramm in Fig. 3 b zurückgestellt (A'-0 in Fig. 3 a), wobei sich der erfindungsgemäße Memory-Aktuator nach unten biegt. Da die untere Streife sich währenddessen abkühlt, führt diese Biegung zu ihrer zusätzlichen martensitischen Verformung (B'-B-D-D' in Fig. 3 a) durch die in der oberen Memory-Streife (1) entwickelten Rückstellungskraft (Fig. 3 c), nachdem diese Kraft die martensitische Fließgrenze erreicht. Beim Umschalten des Stroms und Erwärmen der unteren Memory-Streife (1) kühlt sich die obere Memory-Streife (1) ab, während in der unteren Memory-Streife (1) die Rückstellung der martensitischen Verformung (D'-0) statt findet. Dadurch, wie bereits beschrieben, wird die obere Memory-Streife (1) wieder martensitisch verformt (0-C bzw. 0-C' in Fig. 3 a). Bei wiederholten Zyklen ändert sich die Verformung in den Memory-Streifen (1) reversibel zwischen C und D bzw. zwischen C' und D', wobei der erfindungsgemäße Memory-Aktuator mit einem Streifenquerschnitt  $S$  eine

Last  $P = \frac{\sigma_y - \sigma_F^M}{S}$  (Fig. 3 c) bewegen und eine nützliche Arbeit

$$A = P \cdot s = P \cdot 2R \sin \frac{\alpha}{2} = \frac{\sigma_y - \sigma_F^M}{S} \cdot 2R \sin \frac{180^\circ \cdot L}{2\pi R}$$
 leisten kann, wobei  $\alpha$  der Ablenkungswinkel (Fig. 4 b) und  $s$  der Projektionsweg (Fig. 2 a, b) sind, den die bewegliche Endung des erfindungsgemäße Memory-Aktuators mit der Länge  $L$  und dem Krümmungsradius  $R$  bei seinen Biegebewegungen hinterlegt.

Fig. 4 a, b und c zeigen Zeitdiagramme von Arbeitszyklen des erfindungsgemäßen Memory-Aktuators. Wenn eine der beiden Memory-Streifen (1) bzw. eins der beiden Memory-Elemente (1) (Fig. 1 b) mit einem, beispielsweise, 2 Sekunden dauernden Stromimpuls beaufschlagt wird (Fig. 4 a, Linie I), steigt die Temperatur in diesem Memory-Element (1) der Linie  $\theta_{E1}$  entlang. Während dessen befindet sich das andere Memory-Element (1) im Abkühlungsstadium entlang der Linie  $\theta_{E1}$ . Wenn der elektrische Strom auf das andere Memory-Element (1) (Fig. 1 c) umgeschaltet wird (in Fig. 4 a wird im unteren Minusbereich gezeigt), wird es erwärmt, während sich das erste Memory-Element (1) abkühlt. Danach beginnt ein neuer Arbeitszyklus des erfindungsgemäßen Memory-Aktuators. Die Zyklusperiode gleicht in diesem Beispiel 4 Sekunden, was einer Arbeitsfrequenz  $f_A = 0.25\text{Hz}$  entspricht und nah zum von Memory-Legierungen zu leistenden Grenzfrequenzwertwert liegt.

Der Winkel  $\alpha$  (Fig. 4 b) der Ablenkung von der neutralen Position (Fig. 1 a bzw. 2 c) vergrößert sich nach einer Verzögerung  $\Delta\tau$  nach rechts (Fig. 1 b) beim Erwärmen des ersten Memory-Elements (1). Beim Umschalten des elektrischen Stroms auf das zweite Memory-Element (1) bewegt sich der erfindungsgemäße Memory-Aktuator, ebenfalls nach einer Verzögerung, zunächst zurück zu seiner neutralen Position (Null-Punkt) und dann weiter nach links (Fig. 1 c) entsprechend der Linie in unterem negativen Bereich in Fig. 4b.

Die Ablenkungsverzögerungen  $\Delta\tau$  (Fig. 4 b, c) sind auf das Spannungsverhältnis in beiden Memory-Elementen während ihrer Erwärmung und Abkühlung zurückzuführen (Fig. 3 c). Die in eine Richtung biegende bzw. die Arbeit leistende Gesamtkraft  $\Phi$  (Fig. 4 c, Linie A) des erfindungsgemäßen Memory-Aktuators steigt über den Nullwert in den positiven Bereich, erst wenn die Rückstellungskraft im erwärmten Memory-Element (1) (Fig. 4 c, Linie E1) die sinkende Kraft im abgekühlten Memory-Element (1) (Fig. 4 c, Linie E2) übersteigt und umgekehrt im negativen Bereich, also in die andere Richtung, beim Erwärmen des anderen Memory-Elements (1). Diese Verhaltensweise ist in der Fig. 3 c deutlich zu sehen, in der die mit der Temperatur steigende Spannung im erwärmten Memory-Element (1) bei einer Temperatur  $T_w$  die martensitische Fließgrenze

$\sigma_F^M$  im sich bis zur Temperatur  $T_F^M$  abgekühlten Memory-Element (1) erreicht. Erst in diesen Moment beginnt der erfindungsgemäße Memory-Aktuator sich in eine Richtung im positiven bzw. negativen Bereich in Fig. 4 c fortzubewegen und mit der weiter steigenden Temperatur eine Kraft für die nützliche Arbeit (Fig. 4 c, Linie A) zu entwickeln. Die Zeitverzögerung  $\Delta\tau$  zwischen den Kehrpunkten auf den Ablenkungswinkel- und Kraftdiagrammen des erfindungsgemäßen Memory-Aktuators (Fig. 4 b, c) wird durch die zum Erreichen dieser Spannungsgleichheit notwendige Zeit  $\tau_A$  bestimmt, die ihrerseits von der Abkühlungs- ( $\dot{T}_k$ ) und Erwärmungsgeschwindigkeiten ( $\dot{T}_w$ ), sowie von der Temperatur  $T_F^M$  (Fig. 3 c), von der Hysteresebreite der martensitischen Umwandlung und von der minimalen Abkühlungs- ( $T_{\min}$ ) und der maximalen Erwärmungstemperatur

( $T_{\max}$ ) abhängt:  $\Delta\tau = \tau_A = \tau_k = \frac{T_{\max} - T_F^M}{\dot{T}_k} = \frac{T_F^M + \Delta T - T_{\min}}{\dot{T}_w} = \tau_w$ . Also, je näher die

Temperaturen  $T_{\min}$  und  $T_{\max}$  zur Temperatur  $T_F^M$  liegen, je kleiner die Umwandlungshysterese und je größer die Abkühlungs-  $\dot{T}_k$  und Erwärmungsgeschwindigkeiten  $\dot{T}_w$  sind, desto kürzer ist die Zeitverzögerung  $\Delta\tau$  zwischen den Kehrpunkten eines Arbeitszyklus des erfindungsgemäßen Memory-Aktuators, wo er passiv bleibt. Es können beispielsweise folgende Arbeitstemperaturen mit diesem Zweck als optimal ausgewählt werden:  $T_F^M = T_{\min} = A_s$  und  $T_{\max} = A_f$ .

#### Schutzansprüche

Aktuator zum Erzeugen von periodischen Biegebewegungen dadurch gekennzeichnet, daß der Aktuator aus zwei Streifen aus einer Memory-Legierung oder Memory-Streifen (1) besteht, die durch die elektronisch gesteuerten Stromimpulse wechselhaft und getrennt erwärmt werden (Fig. 1 a, b, c).

Aktuator nach Anspruch 1 dadurch gekennzeichnet, daß die Memory-Streifen (1) aus derselben Memory-Legierung mit denselben Umwandlungstemperaturen und Memory-Eigenschaften besteht.

Aktuator nach Ansprüche 1 und 2 dadurch gekennzeichnet, daß den Memory-Streifen (1) durch die gleiche plastische Biegeverformung die gleiche Hochtemperaturform (Fig. 2 a, b) eingepreßt wird.

Aktuator nach Ansprüche 1 bis 3 dadurch gekennzeichnet, daß die plastisch eingepreßte Hochtemperaturform der beiden Memory-Streifen (1) durch die martensitische Verformung bei der Raumtemperatur zu ihrer geraden Tieftemperaturform (Fig. 2 c) geändert wird.

Aktuator nach Ansprüche 1 bis 4 dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Memory-Streifen (1) in ihrer geraden Tieftemperaturform in einem Zwillingsverhältnis zusammengesetzt werden, so daß die ihre Hochtemperaturform bestimmten Krümmungsradien bzw. ihre konkaven Seiten einander entgegen gerichtet sind (Fig. 2 c).

Aktuator nach Ansprüche 1 und 5 dadurch gekennzeichnet, daß zwischen den beiden Memory-Streifen (1) eine dünne elastisch biegsame Zwischenschicht (2) gesetzt wird (Fig. 1 a, b, c und Fig. 2 c).

Aktuator nach Ansprüche 1, 5 und 6 dadurch gekennzeichnet, daß die elastisch biegsame Zwischenschicht (2) aus einem elektrisch und thermisch gut isolierenden Werkstoff besteht.

Aktuator nach Ansprüche 1, 5 und 6 dadurch gekennzeichnet, daß die beiden durch eine Zwischenschicht (2) getrennten Memory-Streifen (1) an einem, passiven Rand beispielsweise mit einem Bolzen (3), zusammengebunden werden, wobei der Bolzen (3) gleichzeitig als ein elektrischer Kontakt für die beiden Memory-Streifen (1) gestaltet wird (Fig. 1).

Aktuator nach Ansprüche 1 bis 8 dadurch gekennzeichnet, daß jede der beiden Memory-Streifen (1) an ihrem anderen, aktiven Rande mit einem elektrischen Kontakt versehen wird.

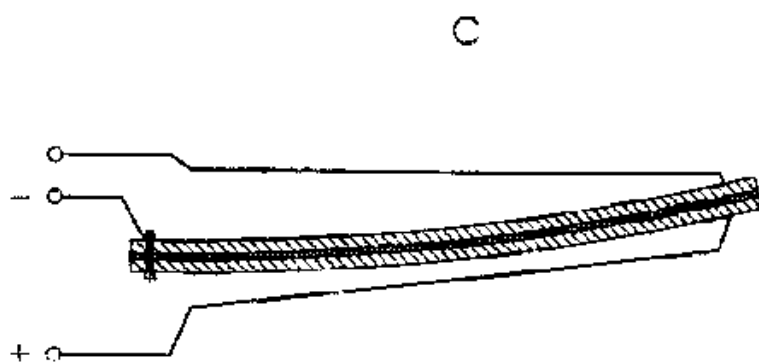
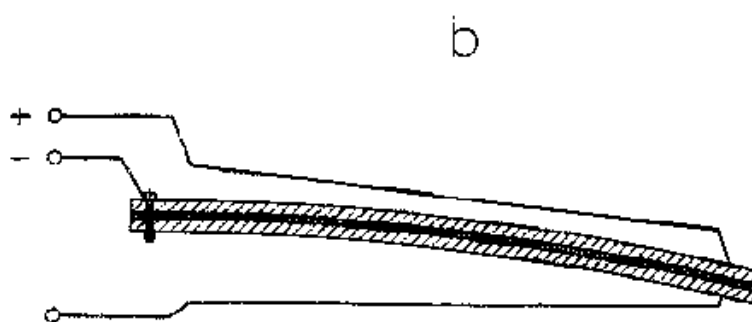
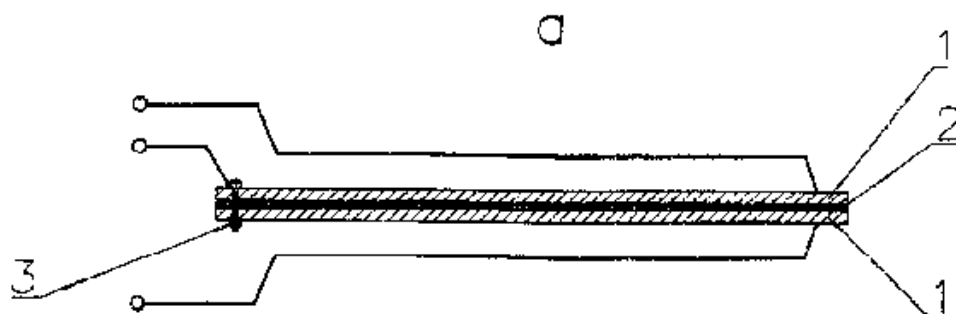
Aktuator nach Ansprüche 1 und 5 bis 9 dadurch gekennzeichnet, daß eine Stromquelle durch einen Umschalter an die beiden Memory-Streifen (1) angeschlossen wird, so daß jede der beiden Memory-Streifen (1) wechselhaft nacheinander durch die Stromimpulse erwärmt werden, wobei die Impulsdauer durch einen elektronischen Zeitgeber gesteuert werden.

Aktuator nach Ansprüche 1 und 10 dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Memory-Streifen an ihrem passiven, zusammengebundenen Rande mit einem Kühlthermostat durch einen guten Wärmekontakt verbunden bzw. befestigt sind (Fig. 2 c).

Aktuator nach Ansprüche 1 bis 11 dadurch gekennzeichnet, daß er als ein Antrieb für verschiedene Mechanismen verwendet wird, in dem er eine maximale Kraft  $F = \frac{\sigma_y - \sigma_p^M}{S}$  auf einem maximalen Weg  $s = 4R$  wiederholt ausübt.

Hierzu 4 Seiten Zeichnungen

Fig. 1



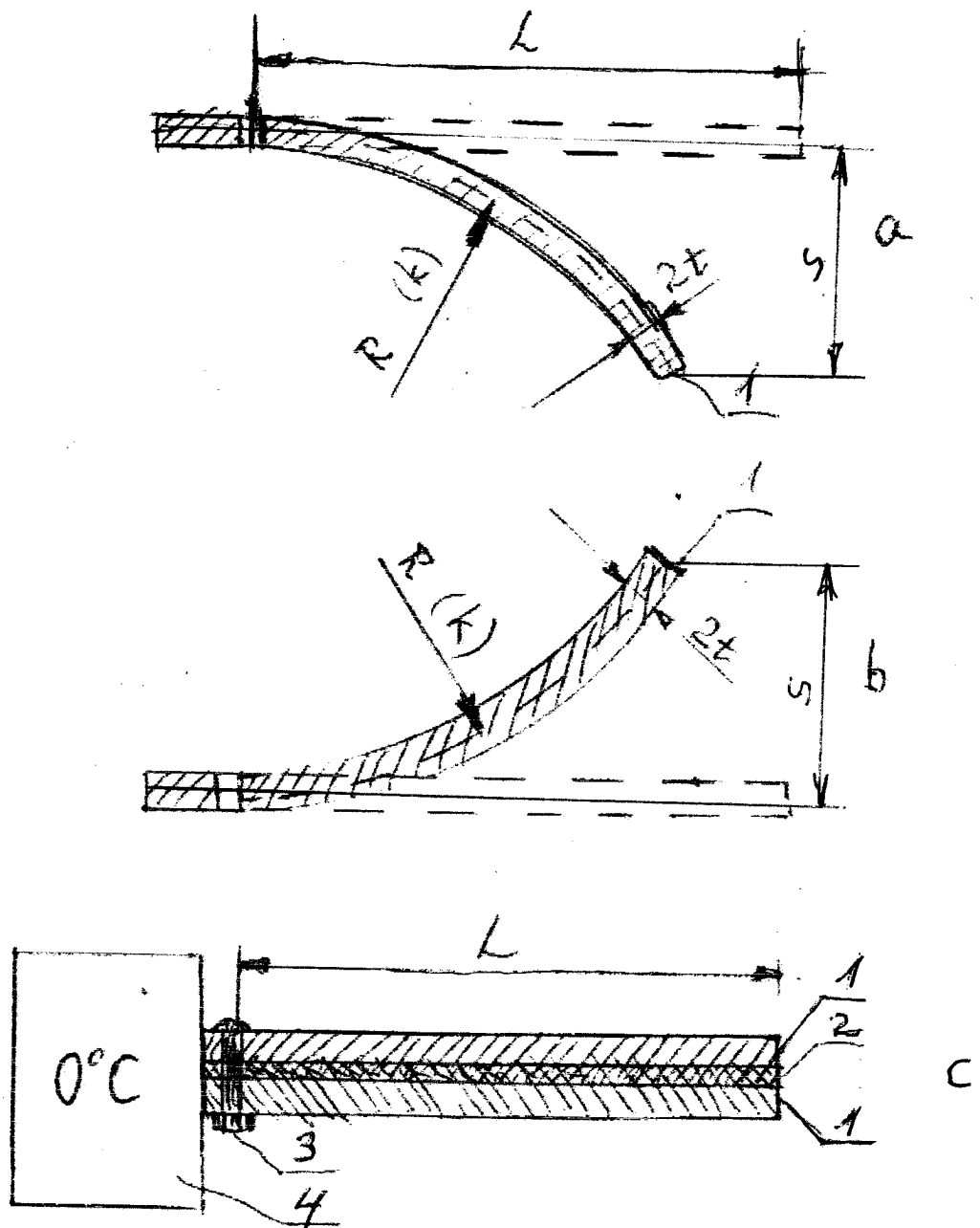
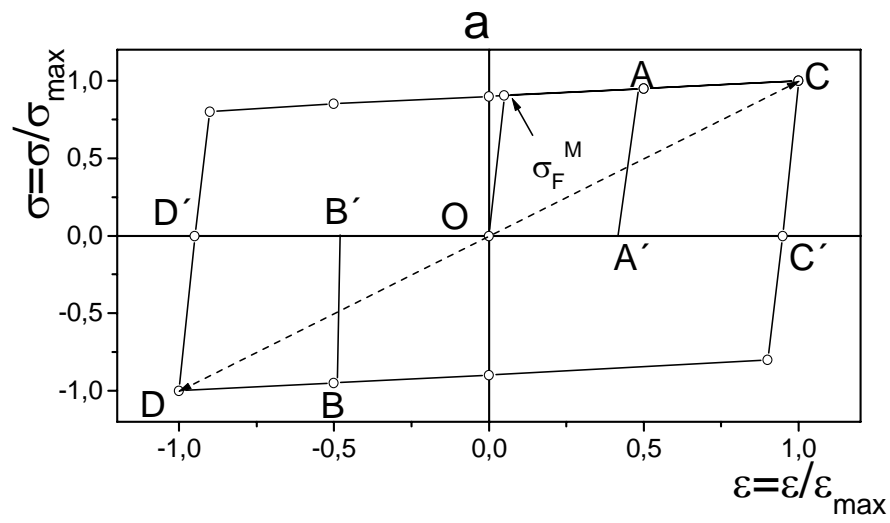
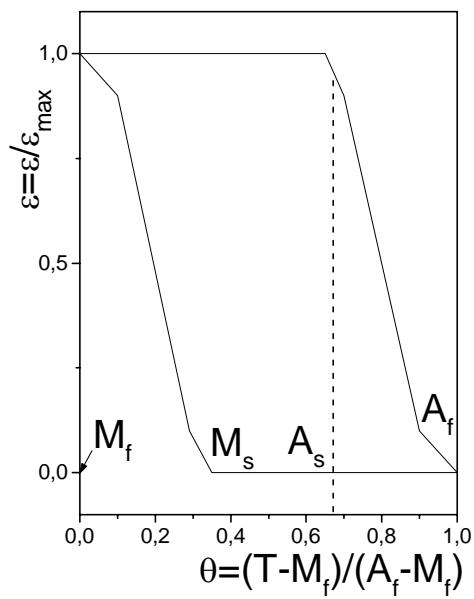


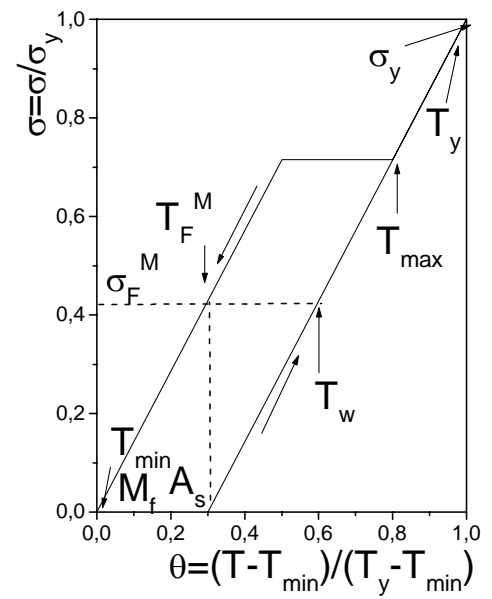
Fig. 2



**b**



**c**



**Fig. 3**

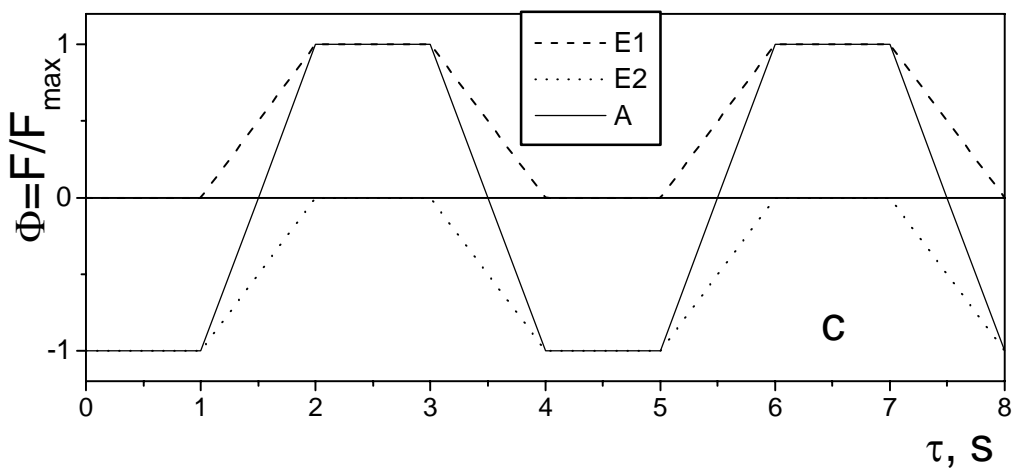
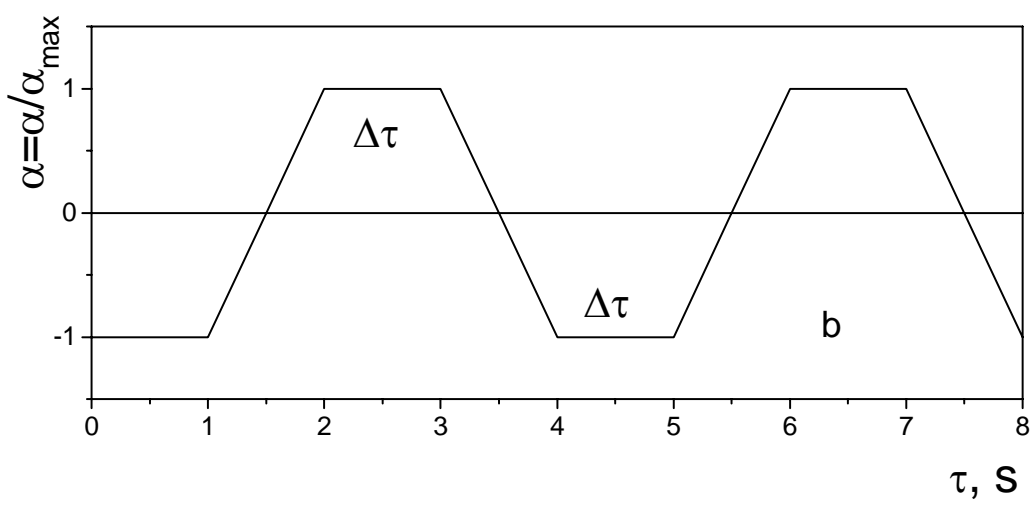
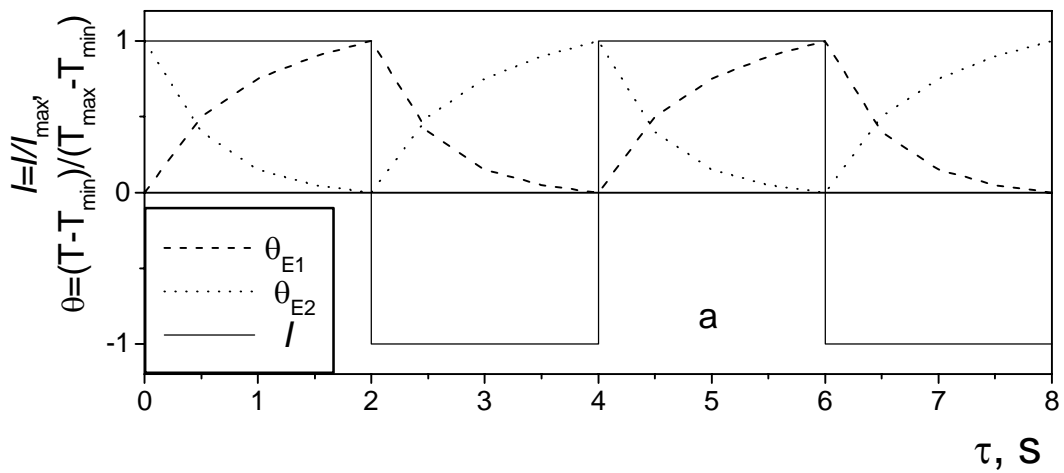


Fig. 4