

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: **A 631/2009**
(22) Anmeldetag: **24.04.2009**
(43) Veröffentlicht am: **15.11.2010**

(51) Int. Cl.⁸: **G05B 11/42** (2006.01),
G05D 17/02 (2006.01),
F16C 32/04 (2006.01)

(73) Patentinhaber:

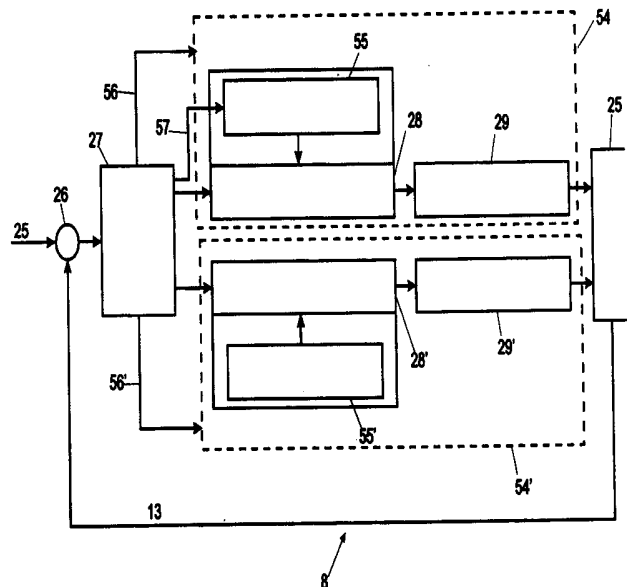
TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
A-1040 WIEN (AT)

(72) Erfinder:

SCHULZ ALEXANDER DIPL.ING. DR.
WIEN (AT)
WEHSE MICHAEL ING.
PUCH (AT)
WASSERMANN JOHANN DR.
WIEN (AT)
NEUMANN MANFRED ING.
WIEN (AT)

(54) **AKTORSYSTEM**

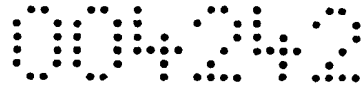
(57) Beschrieben ist ein Aktorsystem (2) mit wenigstens einem Stellglied (29, 29') und einer zugehörigen Regelkette (8), welche für wenigstens zwei Betriebsmodi ausgelegt ist, von denen wenigstens einer deaktivierbar ist.



Zusammenfassung:

Beschrieben ist ein Aktorsystem (2) mit wenigstens einem Stellglied (29, 29') und einer zugehörigen Regelkette (8), welche für wenigstens zwei Betriebsmodi ausgelegt ist, von denen wenigstens einer deaktivierbar ist.

(Fig. 6)



Die Erfindung betrifft ein Aktorsystem mit wenigstens einem Stellglied und einer zugehörigen Regelkette.

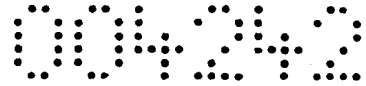
Als „Aktor“ wird allgemein und auch hier ein Energiewandler mit zugehörigem Energiesteller (typischerweise Verstärker) bezeichnet, der eine typischerweise von einer Steuerung oder Regelung zugeführte Führungsgröße in eine Stellgröße, z.B. für ein mechanisches System, umsetzt. Dazu ist in der Regel eine Hilfsenergie notwendig, die dem Aktor ebenfalls zuzuführen ist.

Unter „Intelligenter Aktor“ wird ein geschlossenes System verstanden, das unter Berücksichtigung von Störeinflüssen das geforderte Stellsignal mit einer definierten Genauigkeit vorgibt. Intelligente Aktoren ermöglichen einen gesteuerten oder geregelten Betrieb. Neben der Stellaufgabe werden Diagnosefunktionen zur Selbstüberwachung integriert.

In diversen technischen Bereichen (z.B. im Produktions- oder Transportbereich) werden Aktoren beispielsweise zur Krafteinbringung (Stoffbeförderung oder -mischung, Strukturlagerung oder -positionierung etc.), oder zur Schwingungsdämpfung (z.B. als Ersatz für herkömmliche Quetschöldämpfer bei der Schwingungsreduktion von Turbinenrotoren) eingesetzt.

Ganz allgemein werden Aktoren in praktisch allen technischen Bereichen, wie z.B. im Maschinenbau, in der Verfahrenstechnik oder in der Medizintechnik, eingesetzt. Eine Einteilung der Aktoren kann beispielsweise nach den Wirkprinzipien erfolgen; vgl. elektromagnetische Aktoren, piezoelektrische Aktoren, elektro- bzw. magnetostruktive Aktoren, pneumatische, hydraulische Aktoren etc..

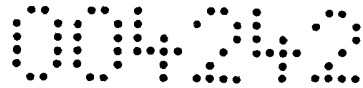
In Fig. 1 ist zur Erläuterung als Beispiel schematisch ein in ein mechatronisches System 1 eingebundener Aktor 2 gezeigt, (wobei aber auch mehrere Aktoren 2 vorgesehen sein können). Der Aktor 2 liefert über eine Verbindung 3 eine Stellgröße an ein z.B. mechanisches Grundsystem 4, auf das weiters, bei 5, mechanische, elektrische und/oder chemische Größen sowie, bei 6, externe Störgrößen einwirken. Die mit einem Ausgang 7 angedeuteten Reaktionen werden in einer Steuer- oder Regelkette 8 von einem oder



mehreren Sensoren 9 erfasst, die üblicherweise Wandler oder Umformer 10, Messverstärker 11 und eine Signalaufbereitungseinheit 12 aufweisen. Entsprechende Sensor- bzw. Messsignale werden über eine Verbindung 13 einem Steuer- oder Regelsystem 14 zugeführt, das auch einen Eingang 15 zur Sollwert-Vorgabe aufweist. Dieses Steuer- oder Regelsystem 14 gibt bei 16 eine Führungsgröße an den Aktor 2 ab, der eine Signalaufbereitungseinheit 17, einen Energiesteller 18 und einen Energiewandler bzw. -umformer 19 aufweist, wobei dem Aktor 2 bei 20 Energie zugeführt wird.

Eine konkrete Ausführung eines elektromagnetischen Aktors ist z.B. ein aktives Magnetlager, das zur berührungsfreien Lagerung von Strukturen, beispielsweise einer drehenden Welle, dient. Ein aktives Magnetlager zur radialen Lagerung einer drehenden Welle weist typischerweise einen Regler, Sensoren für die Bestimmung des Abstands der zu lagernden Struktur von einer Referenzposition, Leistungsverstärker, Stromsensoren und einen Lagermagneten bestehend aus einem ferromagnetischen Statorteil in einem Lagergehäuse samt auf Polschenkeln montierten Spulen und einem ferromagnetischen Rotorteil, der auf der Welle montiert ist, auf. Der Statorteil und der Rotorteil werden bevorzugt jeweils zur Verringerung von Wirbelströmen aus einzelnen, dünnen ferromagnetischen Blechen, ähnlich wie bei der Herstellung eines Elektromotors, aufgebaut. Die Bleche des Rotorteils sind kreisförmig mit einer für den erforderlichen magnetischen Fluss, vorgegeben durch die gewünschten Lagerkräfte, benötigten Stegbreite ausgeführt. Der Statorteil des Lagermagneten besteht ebenfalls meist aus gestanzten kreisrunden Einzelblechen mit nach innen gerichteten, ausgeprägten Polschenkeln, die mit einer Klemmeinrichtung zusammengehalten werden. Auf den einzelnen Polschenkeln befinden sich Spulen, durch die mit Hilfe von elektrischem Strom, nach dem Prinzip des Hubmagneten, Kräfte auf den Rotorteil aufgebracht werden. Damit wird eine berührungsfreie Lagerung der Struktur, in diesem Beispiel eines Rotors, ermöglicht.

Anstelle der bei konventionellen Lagern vorhandenen Lagerreibung tritt bei einem Magnetlager ein Bremsmoment aufgrund von Ummagnetisierungsverlusten auf, die sich aus Hystereseverlusten und Wirbelstromverlusten zusammensetzen. Eine Ansteuerung der Elektromagnete mittels Schaltverstärkern ermöglicht eine Rückspeisung



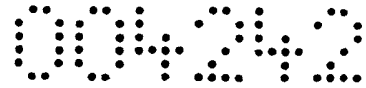
von in den Induktivitäten gespeicherter Energie in einem Zwischenkreis. In den Elektromagneten, Zuleitungen und Steckverbindern treten somit nur Ohm'sche Verluste auf, die proportional dem Laststrom sind.

Eine Reduktion des zur Lagerung erforderlichen Energiebedarfs ermöglichen sogenannte Hybrid-Magnetlager, die eine Kombination aus Permanentmagnetlagern, zur Bereitstellung von statischen Lagerkräften, und aus aktiven Magnetlagern darstellen. Eine Energieeinsparung ergibt sich hier durch die im statischen Lastfall wesentlich geringeren Spulenströme.

Die Verluste in den Schaltverstärkern setzen sich im Wesentlichen aus Leitverlusten, Schaltverlusten und Verlusten der Treiberschaltungen zusammen. Die Leitverluste sind proportional zu den an den im jeweiligen Betriebszustand leitenden Leistungshalbleitern abfallenden Spannungen und zum Laststrom. Die Schaltverluste sind laststromabhängig und direkt proportional zur Schaltfrequenz und Zwischenkreisspannung.

Bei bekannten Schaltverstärkerkonzepten mit direkter digitaler Ansteuerung erfolgt die Auslegung der Zwischenkreisspannung sowie der Schaltfrequenz in Entsprechung zur erforderlichen maximalen Regeldynamik. Unter Teillastbedingungen, wenn nicht die volle Regeldynamik des aktiven Magnetlagers erforderlich ist, beispielsweise bei einer geringeren Drehzahl als der maximalen Rotordrehzahl, treten somit unnötig hohe Verluste auf.

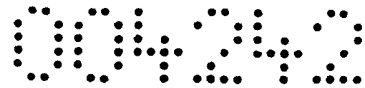
Hierzu ist ganz allgemein festzustellen, dass in der Regel Aktoren für den Worst-Case-Betriebszustand, beispielsweise für eine maximale erforderliche Kraft, Verfahrensgeschwindigkeit, Leistung, Dynamik etc., ausgelegt werden. Im Teillastbereich resultiert daraus ein hoher Energie-Eigenverbrauch, da die Regelung, die Leistungsansteuerung und die Stellglieder typischerweise mit konstanten, für den Worst-Case erforderlichen Parametern, wie Abtastrate der digitalen Regelung, Schaltfrequenz der Leistungsschaltverstärker bzw. -umrichter, Zwischenkreisspannung etc., arbeiten. Für Anwendungen mit unterschiedlichen Betriebszuständen sowie bei allen Anwendungen, wie beispielsweise die aktive magnetische Lagerung von Strukturen, wo zwar beim Durchfahren



kritischer Rotordrehzahlen sehr hohe Lagerkräfte, in den meisten Betriebszuständen aber wesentlich reduzierte Lagerkräfte erforderlich sind, resultiert abgesehen vom Worst-Case-Betriebspunkt eine unnötig hohe Verlustleistung des Aktors. Es ist daher wünschenswert, durch eine spezielle Ausführung des Aktors samt Ansteuerung eine wesentliche Reduktion der Verlustleistung in Teillastbereichen und somit eine ökologische und ökonomische Lösung für den Einsatz von Aktoren zu ermöglichen

Neben den seit mehr als 30 Jahren eingesetzten Regelungen basierend auf P(I)D-Positionsreglern wird schon seit langem die Möglichkeit genutzt, mittels aktiver Magnetlager die Lagersteifigkeit und -dämpfung gezielt zu verändern bzw. Kräfte auf einen Rotor aufzubringen, um eine Verbesserung der Laufeigenschaften zu erzielen. Eine wesentliche Reduktion der Lagerkräfte und damit auch des zur Lagerung erforderlichen Energiebedarfs ergibt sich durch eine Lagerung des Rotors um seine Hauptträgheitsachse.

Daher wurde ausgehend vom klassischen Einsatz von Notch-Filtern (vgl. Knospe, C.R., „Reducing unbalance response with magnetic bearings“, Int. Rep., Center for Magnetic Bearings, University of Virginia, VA, 1992) eine Vielzahl von adaptiven Verfahren zur Unwuchtkompensation entwickelt. In Herzog, R., et al., „Unbalance compensation using generalized notch filters in the multivariable feedback of magnetic bearings“; IEEE Transactions on control systems technology, Vol. 4, No. 5, Sep. 1996, wird beispielweise ein Konzept mit „Generalized Notch-Filter“ vorgestellt, das ein zweistufiges Modulationsverfahren einsetzt, welches durch die Einführung drehzahlabhängiger Faktoren an die variable Frequenz der Unwuchterregung angepasst wird. Die zur Regelung eines Hybrid-Magnetlagers vorgeschlagene „Adaptive Vibration Control“ (AVC) (s. Betschon, F., „Design Principles of Integrated Magnetic Bearings“, Dissertation, ETH Zürich, 2000, S. 78-86; 99-102) ermöglicht eine Reduktion der Spulenströme um bis zu 90% gegenüber deaktivierter AVC. Dabei zeigt sich weiters, dass für eine optimale AVC-Funktion die Digitalisierungsrate der Sensorsignale, die Reglerabtastrate und die Schaltfrequenz gegenüber der Rotordrehzahl zumindest um einen Faktor sechs höher zu wählen ist. Bemerkenswert ist, dass die Summe aus Schaltver-



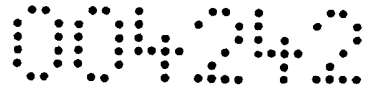
stärker- und Eisenverlusten der ausgeführten Konstruktion im Leerlauf bereits 92% des bei mittlerer Rotordrehzahl auftretenden Gesamtenergieverbrauchs ausmacht.

Was die im Stand der Technik verwendeten Leistungsverstärker betrifft, so haben Analogverstärker allgemein die Nachteile, dass sie speziell im Teillastbereich eine hohe Verlustleistung aufweisen, dass für induktive Lasten keine Rückspeisung der in der induktiven Last gespeicherten Energie in den Zwischenkreis möglich ist, was eine weitere Erhöhung der Verlustleistung zur Folge hat, und dass keine direkte digitale Ansteuerung von einem digitalen Regler möglich ist, was zusätzliche Bauteile erfordert und u.U. eine schlechtere Signalqualität mit sich bringt.

Klasse-G-Verstärker haben entweder unterschiedliche, fixe Zwischenkreisspannungen, mit dem Nachteil eines hohen Aufwands und damit hoher Kosten bei der Implementierung der in der Regel erforderlichen Anzahl von Zwischenkreisspannungspegeln, oder eine variable Zwischenkreisspannung, wobei die Zwischenkreisspannungshöhe abhängig vom Eingangssignalpegel ist, mit dem Nachteil, dass die Signalanstiegsgeschwindigkeit und damit die Dynamik durch die Anstiegsgeschwindigkeit der Zwischenkreisspannung begrenzt wird.

Dieser Nachteil ergibt sich auch bei Schaltverstärkern in Form von Klasse-D-Verstärkern, wenn diese unterschiedliche, fixe Zwischenkreisspannungen aufweisen. Bei Audioverstärkern erfolgt eine Lautstärkeregelung über eine Veränderung der Zwischenkreisspannung, was den Nachteil hat, dass keine hohe Regeldynamik der Zwischenkreisspannungsregelung erzielbar ist (was in der Anwendung zur Lautstärkeregelung auch nicht das Ziel ist).

Weiters werden Hybridverstärker als Kombination eines Analog- und eines Digitalverstärkers vorgeschlagen; vgl. z.B. ERTL, H., J. KOLAR und F. ZACH, „A New 1kW Class-D Supported Linear Power Amplifier Employing a Self-Adjusting Ripple Cancellation Scheme“, Proc. of the 29th International Conference on Power Electronics and Intelligent Motion (PCIM), Nürnberg, Germany, May 21-23 1996. Die grundsätzliche Idee eines Hybridverstärkers (Klasse-H-Verstärker) ist, dass - wie in Fig. 2 gezeigt - ein Linearver-

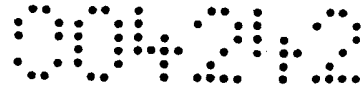


stärker 21 als „Master“ eine Ausgangsspannung (bzw. Ausgangsstrom I_{Linear}) an einem Ausgang 22 vorgibt und ein Schaltverstärker 23 als „Slave“ den dazu notwendigen Ausgangsstrom I_{Schalt} für eine Last 24 liefert. Dieser Last 24 wird insgesamt ein Strom $I_{\text{Ges}} = I_{\text{Linear}} + I_{\text{Schalt}}$ zugeführt. Hybridverstärker verbinden daher die Vorteile einer geringen Verlustleistung und einer hohen Ausgangssignalqualität. Der Linearverstärker 21 kann hierbei auch als aktives Filter, das den Stromschwankungsanteil („Strom-ripple“) und das Modulationsrauschen des Schaltverstärkers möglichst gut kompensiert, angesehen werden. Ein Nachteil dieser Hybridverstärker ist jedoch das Fehlen einer Möglichkeit zur direkten digitalen Ansteuerung.

Ein alternatives Konzept eines Hybridverstärkers wird in WASSERMANN, J. und H. SPRINGER: „A Linear Power Amplifier with Current Injection (LACI) for Magnetic Bearings“; in: SCHWEITZER, G., R. SIEGWART und R. HERZOG (Hrsg.): Proc. of Fourth Int. Symp. on Magnetic Bearings, S. 371-376, Zurich, Switzerland, August 23-26 1994. Int. Center for Magnetic Bearings, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich, Hochschulverlag, ETH Zürich, vorgestellt. Hierbei aktiviert eine Logiksteuerung, abhängig von den Betriebsbedingungen (statisch, quasistatisch oder hochdynamisch), entweder den Analogverstärkerteil (mit geringer Zwischenkreisspannung) oder den Schaltverstärkerteil (mit hoher Zwischenkreisspannung). Dieses Konzept ermöglicht eine hohe Ausgangssignalqualität für die Grundlast; wenn große Kraftanstiegs-geschwindigkeiten benötigt werden, erfolgt allerdings eine Verschlechterung der Signalqualität durch den automatisch zugeschalteten Schaltverstärker.

Es ergibt sich somit, dass trotz der zahlreichen und in die verschiedensten Richtungen gehenden Vorschläge gemäß Stand der Technik, Aktorsysteme mit geringerer Verlustleistung zu erzielen, weiterhin ein Bedarf an einem energieeffizienten Aktorsystem besteht, wobei überdies auch eine hohe Regeldynamik und im Vorfeld hierzu ein entsprechendes Signalmanagement, auch mit einer entsprechenden Signalqualität, wünschenswert sind.

Es ist nun Aufgabe der Erfindung, ein Aktorsystem wie eingangs angegeben vorzuschlagen, dass sich durch eine hohe Energieeffi-



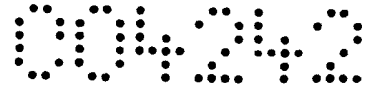
zienz bzw. einem geringen Energieaufwand und geringe Verlustleistungen auszeichnet, wobei auch eine hohe Regeldynamik erzielbar sein soll.

Zur Lösung der gestellten Aufgabe sieht die Erfindung ein Aktorsystem wie in Anspruch 1 angegeben vor. Vorteilhafte Ausführungsformen und Weiterbildungen sind in den abhängigen Ansprüchen definiert.

Beim vorliegenden Aktorsystem ist die Regelkette für zwei oder mehr Betriebsmodi ausgelegt; zumindest einer dieser Betriebsmodi ist deaktivierbar bzw. bei Bedarf aktivierbar. Ein Betriebsmodus ist bevorzugt ein Hocheffizienz-Betriebsmodus, in dem eine Arbeitsweise mit möglichst geringer Verlustleistung, mit hohem Wirkungsgrad, sichergestellt wird. Ein anderer Betriebsmodus ist vorzugsweise ein Hochleistungs-Betriebsmodus, der dann, wenn eine hohe Leistung erforderlich ist, aktiviert wird. Während eines Normalbetriebs, wenn eine solche hohe Leistung oder Maximalleistung nicht erforderlich ist, wird dieser Hochleistungs-Betriebsmodus zweckmäßig deaktiviert.

Um einen adäquaten, für jeden Betriebsmodus optimierten Betrieb zu ermöglichen, ist es auch von Vorteil, wenn für jeden Betriebsmodus ein zugehöriges, eigenes Stellglied vorgesehen ist. Je nach Aktorsystem ist dieses Stellglied auf eine an sich bekannte Weise ausgebildet, z.B. mit einem Druckzylinder, als piezoelektrischer Wandler oder dergl.. Die Erfindung lässt sich jedoch mit besonderem Vorteil in Zusammenhang mit Elektromagneten, insbesondere für ein Magnetlager, vorzugsweise Hybridmagnetlager, anwenden; das Magnetlager kann beispielsweise einem Energiespeicher-Rotor (ein sogenanntes „Flywheel“ oder Schwungrad) zugeordnet sein. Dabei kann der Energiespeicher-Rotor einen Körper aus Karbonfasermaterial aufweisen, der besonders hohe Drehzahlen ermöglicht. Auf diese Weise kann z.B. ein mit 20.000 bis 40.000 Umdrehungen pro Minute (und mehr) umlaufender Rotor erhalten werden, wobei die kinetische Energie vor allem in der Drehgeschwindigkeit des Rotors gespeichert wird.

Von Vorteil ist es weiters, wenn die Regelkette zum Regeln, zum Aufsuchen und Halten des jeweiligen optimalen Arbeitspunktes,



insbesondere hinsichtlich bester Energieeffizienz, eingerichtet ist. Bei dieser Ausführungsform findet die Regelkette, wenn sich beispielsweise ein Arbeitspunkt zufolge von Temperaturänderungen etc. verschiebt, den neuen Arbeitspunkt, um dann den Betrieb mit minimalem Energieaufwand wieder zu stabilisieren. Demgemäß zeichnet sich eine besonders vorteilhafte Ausführungsform hierzu dadurch aus, dass die Regelkette einen Optimierungsregler aufweist, der den Sollwert eines nachgeschalteten Reglers einstellt, wobei der Energieverbrauch des Stellgliedes bzw. dessen Energiestellers minimal wird.

Insbesondere im Fall eines Schwungrad-Rotors, aber auch in anderen Anwendungen ist es weiters aus Sicherheitsgründen zweckmäßig, wenn im Hinblick auf einen etwaigen Ausfall zumindest ein redundantes, zuschaltbares Stellglied, vorzugsweise mit Hochleistungs-Regelung, vorgesehen ist.

Vorzugsweise ist mindestens ein Glied in der Regelkette zum Erzielen der zwei Betriebsmodi doppelt ausgeführt, es kann jedoch mit Vorteil vorgesehen werden, alle Glieder der Regelkette zwei- oder mehrfach vorzusehen, um so eine optimierte Arbeitsweise im jeweiligen Betriebsmodus sicherzustellen. Insbesondere ist es weiters auch vorteilhaft, wenn die Regelkette zur Detektion einer ein Aktivieren des inaktiven Betriebsmodus erfordernden Betriebssituation eingerichtet ist.

Zur Stellglied-Ansteuerung werden bevorzugt Schaltverstärker-Vollbrücken vorgesehen.

Das vorliegende Aktorsystem kann in einer bevorzugten Ausführung auch so gesehen werden, dass es mindestens einen Teilaktor aufweist, der in allen Betriebszuständen des Aktorsystems im jeweils optimalen (insbesondere energieeffizientesten) Betriebsmodus arbeitet, um so einen möglichst hohen Wirkungsgrad bzw. eine möglichst geringe Verlustleistung sicherzustellen. Dabei sind folgende Ausführungen im einzelnen denkbar:

- Ein- oder Mehrfach-Ausführung von Stellgliedern; beispielsweise kann ein Aktor zur Generierung von Kräften zwei Stellgliedklassen aufweisen, nämlich einerseits ein Hocheffi-

zienz-Stellglied mit geringen Kräften und geringsten Verlusten für den standardmäßigen Betrieb, beispielsweise bei aktiven Magnet- oder Hybridlagern, und andererseits ein Hochleistungs-Stellglied für die Generierung großer Kräfte im Bedarfsfall, beispielsweise beim Anlaufen eines Rotors, beim Abfangen externer Störkräfte (z.B. Erdbeben) oder in einem Notlauf.

- Ansteuerung der Stellglieder mit geringstmöglicher Verlustleistung durch eine hocheffiziente Schaltverstärker/Gleichstromsteller-Kombination, insbesondere mit
 - einer an die im jeweiligen Betriebszustand erforderliche Dynamik angepassten (minimalen) Zwischenkreisspannung sowie einer im Bedarfsfall durchzuführenden sofortigen Umschaltung auf eine maximale Zwischenkreisspannung;
 - einer variablen, an den jeweiligen Betriebszustand angepassten (minimal erforderlichen) Schaltfrequenz eines DC/DC-Wandlers für die variable Zwischenkreisspannung;
 - einer Energierückspeisung von (induktiver) Last; und/oder
 - einer variablen, an den jeweiligen Betriebszustand angepassten (minimal erforderlichen) Transistorschaltfrequenz für möglichst geringe Schaltverluste.

Was die mechanische Konstruktion und Materialwahl beispielsweise bei Magnetlagern, insbesondere aktiven Magnetlagern, betrifft, so sind folgende Maßnahmen vorteilhaft:

- zumindest bei Hocheffizienz-Stellgliedern, ist ein Kernmaterial der Elektromagnete mit geringsten Wirbelströmen und Ummagnetisierungsverlusten bevorzugt; weiters wäre eine homopolare Magnetanordnung zur Reduktion der Ummagnetisierungsverluste vorteilhaft.

- Auch werden vorzugsweise Hybrid-Magnetlager mit Permanent-

magneten zur Bereitstellung der statischen Lagerkräfte und mit Elektromagneten zur Bereitstellung dynamischer Kräfte vorgesehen.

Von Vorteil ist ferner das Vorsehen einer an den aktuellen Betriebszustand angepassten (optimalen/minimalen) Arbeitsfrequenz des/der

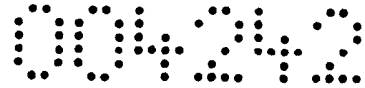
- digitalen Regler(s)
- Analog/Digital-Konverter und der
- Schaltfrequenz und Pulsform der Leistungshalbleiter-Ansteuersignale von
 - Leistungsschaltverstärkern und/oder
 - Gleichspannungswandlern (für die variable(n) Zwischenkreisspannung(en)).
 - Ebenso vorteilhaft ist die Umschaltung zwischen den Hocheffizienz/Hochleistungs-Betriebsarten und/oder der Schaltverstärker-Zwischenkreisspannung auf einen Maximalwert für eine maximale Systemdynamik. Bevorzugt werden alle Teilbereiche dahingehend optimiert, dass eine höchste Energieeffizienz für alle Betriebsfälle gewährleistet ist, und dass die im Betrieb veränderlichen Parameter automatisch für eine Verlustminimierung angepasst werden.

Ein Hauptvorteil der Erfindung liegt im Vergleich zu bisherigen Konzepten im wesentlich geringeren Energieverbrauch des Aktorsystems, der in jedem Betriebszustand des Aktorsystems auf ein Minimum reduziert wird.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand von besonders vorteilhaften Ausführungsbeispielen, auf die sie jedoch nicht beschränkt sein soll, noch weiter erläutert. Im Einzelnen zeigen in der Zeichnung:

Fig. 1 schematisch in einem Blockschaltbild das bereits erläuterte allgemeine mechatronische System mit eingebundenem Aktor;

Fig. 2 das ebenfalls bereits einleitend beschriebene Schaltungs-



beispiel für einen Hybridverstärker;

Fig. 3 in einem Blockschaltbild eine Ausführungsform der Erfindung mit einem kombinierten, hinsichtlich der Zwischenkreisspannung umschaltbaren Hocheffizienz/Hochleistungs-Energiesteller;

Fig. 4 den Regler und kombinierten Energiesteller dieses Systems gemäß Fig. 3 in einer detaillierteren Schaltungsausführung;

Fig. 5 eine gegenüber Fig. 4 durch Vorsehen eines parallelen Systems weiterentwickelte Ausführungsform des kombinierten Energiestellers;

Fig. 6 in einem schematischen Blockschaltbild ähnlich Fig. 3 eine weitere Ausführungsform des erfindungsgemäßen Aktorsystems, mit einer Verdoppelung von Energiesteller und Energiewandler zur Erzielung eines Hocheffizienzsystems bzw. Hochleistungssystems;

Fig. 7 eine der Fig. 6 entsprechende, ähnlich Fig. 4 und 5 detailliertere Schaltungsausführung eines Aktorsystems;

Fig. 8 im Vergleich zu Fig. 7 eine Weiterbildung, bei der im Hochleistungs-Energiesteller eine Abschaltung der Energieversorgung der nicht aktivierten (oder aber defekten) Glieder der Regelkette erfolgt;

Fig. 9 in Weiterbildung der Ausführungsform gemäß Fig. 8 eine Ausführungsform mit einem redundanten zusätzlichen System, um im Fall einer Störung des Systems mit Hocheffizienz-Energiesteller und Hochleistungs-Energiesteller auf das zusätzliche, redundante System umzuschalten;

Fig. 10 in einer Modifikation der Ausführungsform gemäß Fig. 6 eine Weiterbildung in einem Blockschaltbild, wobei nunmehr auch der eigentliche Regler innerhalb der Regelkette doppelt ausgeführt ist;

Fig. 11 ein Schema eines allgemeinen Aktorsystems, ohne redundantes Hochleistungssystem, für ein Hybrid-Magnetlager;

Fig. 12 in einem Schema eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Aktorsystems in Anwendung bei einem Energiespeicher-Schwungrad in Form eines mit Hilfe eines aktiven Hybridmagnetlagers gelagerten Schwungradspeichers;

Fig. 13 in einem Blockschaltbild eine Ausführungsform eines Optimierungs-Regelkreises, die bei der vorliegenden Erfindung mit besonderem Vorteil eingesetzt werden kann;

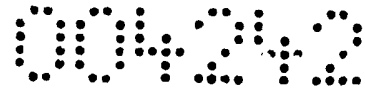
Fig. 14 ein Diagramm, das die erforderliche Haltekraft, beispielsweise eines Hybridmagnet-gelagerten Rotors bei verschiedenen Arbeitspunkten - die mit einem Optimierungs-Regelkreis gemäß Fig. 13 aufgefunden werden können - veranschaulicht; und

Fig. 15 in einem Ablaufdiagramm eine Vorgangsweise bei der Umschaltung eines erfindungsgemäßen Aktorsystems von einem Hocheffizienz-Betriebsmodus in einen Hochleistungs-Betriebsmodus bzw. einen kombinierten Hocheffizienz- und Hochleistungs-Betriebsmodus, beispielsweise im Zusammenhang mit einem Aktorsystem gemäß Fig. 10.

Die Figuren 1 und 2 wurden einleitend bereits erläutert, so dass sich eine neuerliche Beschreibung davon erübrigen kann.

In Fig. 3 ist in einer Darstellung ähnlich Fig. 1 ein Grundsystem 25, hier bereits mit eingebauten Sensoren, dargestellt, von dem über eine Istwert-Verbindung 13 (ähnlich der Istwert-Verbindung 13 in Fig. 1) einem Differenzbildner 26 der jeweilige Istwert zugeführt wird, wobei einem anderen Eingang des Differenzbildners 26 der Sollwert 15 zugeführt wird. Ein Differenzsignal wird sodann einem Regler 27 zugeführt. Dieser Regler 27 und der Differenzbildner 26 bilden somit das Regelsystem 14 gemäß Fig. 1. Dem Regler 27 nachgeschaltet ist ein kombinierter Hocheffizienz-/Hochleistungs-Energiesteller 28, dessen Ausgang an einen Energiewandler 29 gelegt ist; die beiden Komponenten 28, 29 bilden (sieht man von der in Fig. 3 nicht näher veranschaulichten Signalaufbereitung ab) somit den Aktor 2 in der Darstellung gemäß Fig. 1.

In der Ausführungsform gemäß Fig. 3 ist eine hochdynamische Um-



schaltung zwischen einer maximalen Zwischenkreisspannung U_{ZM} und einer optimierten Zwischenkreisspannung U_{ZV} (s. Fig. 4) vorgesehen, um so zwischen den beiden durch die Energiesteller-Komponente 28 gegebenen Betriebsmodi umschalten zu können. Diese Umschaltung bzw. die verschiedenen Zwischenkreisspannungen U_{ZM} und U_{ZV} sind mehr im Detail aus Fig. 4 ersichtlich.

Im Einzelnen sind in Fig. 4 die Komponenten 27 (Regler) und 28 (Energiesteller) verdeutlicht. Dabei ist ersichtlich, dass der Regler 27 einen Eingang 30 für Analogsignale sowie einen Ein-/Ausgang 31 für Digitalsignale aufweist. Die Analogsignale werden im Regler 27 über Analogkanäle 32 und einem A/D-Wandler 33 einem Reglermodul 34 zugeführt. Dieses Reglermodul 34 hat auch einen digitalen Ein-/Ausgang 35, der über Treiberschaltungen bzw. eine Pufferstufe 36 angeschlossen ist, dem die digitalen Signale vom Eingang 31 zugeführt werden. Schematisch sind weiters in Zusammenhang mit dem Regler 27 ein Netzfilter 37, ein AC/DC-Wandler 38, eine Überwachungsschaltung („Watch dog“) 39, eine Taktsignalschaltung 40 sowie ein Kommunikationsmodul 41 dargestellt, über das der Regler 27 mit einem nicht näher gezeigten Leitrechner (siehe Verbindung 42) kommunizieren kann.

Der kombinierte Energiesteller 28 enthält ein Netzfilter 43 sowie eine Gleichrichter- und Softstart-Einheit 44, an deren Ausgang die maximale Zwischenkreisspannung U_{ZM} abgegeben wird; diese maximale Zwischenkreisspannung U_{ZM} wird mit Hilfe eines Transistors T_{ZM} , dem ein Gatetreiber 45 zum Ein- bzw. Ausschalten zugeordnet ist, im Bedarfsfall durchgeschaltet. Über einen Schalttransistor T_{ZV} und eine Diode D_{ZVR} kann andererseits eine reduzierte, variable, optimierte Zwischenkreisspannung U_{ZV} durchgeschaltet werden. Am Knoten 47 liegt somit als Zwischenkreisspannung U_Z entweder - im Fall der Hocheffizienz-Betriebsart des Energiestellers 28 - die optimierte Zwischenkreisspannung U_{ZV} über den Transistor T_{ZV} und die Diode D_{ZVR} an, wobei der Transistor T_{ZM} gesperrt ist; oder es wird - im Fall der Hochleistungs-Betriebsart - der Transistor T_{ZM} durchgeschaltet, wogegen der Transistor T_{ZVR} gesperrt wird, so dass am Knoten 47 die maximale Zwischenkreisspannung U_{ZM} liegt. Im Hocheffizienz-Fall, wenn die optimierte Zwischenkreisspannung U_{ZV} an einer nachfolgenden Vollbrücke 48 bzw. 49 anliegt, kann Energie von der Last (in Fig. 4



nicht dargestellt) mittels der parallel zu den Transistoren T_1 und T_3 bzw. T_2 und T_4 (stromrichtungsabhängig) liegenden Freilaufdioden zurückgeliefert werden, wobei bei durchgeschaltetem Transistor T_{ZVR} mit Gatetreiber 46 ungefähr der gleiche (jedoch negative) Stromanstieg gegeben ist wie bei der Zwischenkreisspannung U_{ZV} und hierbei die Rücklieferung der Energie von der induktiven Last zu einem Kondensator C_{ZV} erfolgt.

Bei nicht aktiviertem Transistor T_{ZVR} erfolgt die Rückspeisung der Energie, wie zuvor beschrieben, über die parallel zu den Transistoren T_1 und T_3 bzw. T_2 und T_4 liegenden Freilaufdioden sowie in diesem Fall über die parallel zum Transistor T_{ZM} liegende Diode in den Kondensator C_{ZM} .

Was die Vollbrückenschaltung betrifft, so liegen gemäß Fig. 4 zwei im Prinzip gleich aufgebaute Vollbrücken 48, 49 vor, denen jeweils ein Ausgangsfilter 50 bzw. 51 nachgeschaltet ist. In jeder Vollbrücke 48, 49 liegen Transistoren T_1 , T_2 , T_3 und T_4 , jeweils mit parallelgeschalteter Freilaufdiode, in einer Brückenschaltung vor, wobei zugehörige Gatetreiber 52 zum Schalten der Transistoren T_1 - T_4 vorgesehen sind. An die Ausgangsfilter 50, 51 sind die jeweiligen Energiewandler (29 in Fig. 3) anzuschalten bzw. angeschaltet.

Die Schaltung gemäß Fig. 4 ist für einen 4-Quadranten-Betrieb ausgelegt; für einen 2-Quadranten-Betrieb ist die Schaltung sinngemäß zu vereinfachen, wobei die Transistoren T_2 und T_3 sowie die zu den Transistoren T_1 und T_4 parallel geschalteten Freilaufdioden wegfallen.

Im Betrieb werden analoge Istwerte bei 30 eingelesen, wobei diese analogen Istwerte beispielsweise die Position, den Strom, die Temperatur oder dergl. Parameter betreffen können. Diese Istwerte kommen von Sensoren (9 in Fig. 1), und sie werden über die Analogkanäle 32 unter analoger Signalaufbereitung, Filterung über den A/D-Wandler 33 dem Regler 34 zugeführt. Digitale Istwerte gelangen bei 31 in den Regler 27, wobei diese digitalen Istwert-Signale beispielsweise von einem optischen Drehwinkelencoder kommen können. Regelalgorithmen im Reglermodul 34 können als Software vorliegen, wobei das Reglermodul 34 nicht nur durch einen digitalen Signalprozessor, sondern auch durch einen Mikro-

controller oder durch eine FPGA-Einheit gebildet sein kann.

In der vorliegenden Regelkette gemäß Fig. 3 und 4 ist sodann das Glied 53, mit dem die Zwischenkreisspannungen U_{ZM} oder U_{ZV} angelegt wird, zweifach ausgeführt, nämlich ein Mal mit dem Zweig T_{ZM} und zum Anderen mit dem Zweig T_{ZV} und D_{ZVR} , wobei die normale Betriebsart die Hocheffizienz-Betriebsart mit der optimierten Zwischenkreisspannung U_{ZV} ist, in der der Schalttransistor T_{ZVR} leitet und T_{ZM} gesperrt ist. Für das dynamische Ein- und Ausschalten der Transistoren sorgen die Gatetreiber 45, 46.

Die an die Ausgangsfilter 50, 51 anzuschaltenden bzw. angeschalteten Energiewandler 29 können beispielsweise Lagermagneten eines Magnetlagers sein. Die optionale Kommunikation über die Verbindung 42 zu einem Leitreechner kann zur Steuerung, Anzeige und/oder Überwachung dienen.

Die Ausführungsform gemäß Fig. 5 entspricht im Wesentlichen jener gemäß Fig. 4, wobei mehrere, z.B. zwei, parallele Energiesteller-Systeme vorgesehen sind; dabei kann einer der beiden kombinierten Energiesteller 28 für die radiale Lagerung und der andere kombinierte Energiesteller 28' für die axiale Lagerung eines Rotors oder aber einer Welle vorgesehen sein. Da die Energiesteller 28, 28' im Prinzip gleich wie der Energiesteller 28 gemäß Fig. 4 aufgebaut ist, kann sich eine neuerliche Beschreibung erübrigen. Ähnliches gilt auch für den Regler 27. Anzumerken ist nur, dass für jeden Energiesteller 28, 28' gegebenenfalls die Zwischenkreisspannung unterschiedlich gewählt werden kann, wobei die optimale Zwischenkreisspannung vom angeschalteten Energiewandler (Lagermagnet) abhängig gewählt wird.

In Fig. 5 ist ebenso wie in Fig. 4 jener Bereich mit doppelter Ausführung eines Elements der Regelkette, nämlich der Umschaltbereich, als Glied 53 zusätzlich veranschaulicht.

Bei der Ausführungsform gemäß Fig. 6 und 7 sind weitere Glieder der Regelkette (8 in Fig. 1) zweifach ausgeführt, um so an einen gemeinsamen Regler 27 gesonderte Systeme, nämlich ein Hocheffizienzsystem 54 sowie ein Hochleistungssystem 54', nachzuschalten. Das Hocheffizienzsystem 54 enthält dabei, ähnlich wie be-

reits vorstehend anhand der Fig. 4 erläutert, einen Energiesteller 28 mit variablem Zwischenkreis 55, mit Vollbrückenschaltungen 48, 49 (mit Transistoren T_1 bis T_4) und mit Ausgangsfiltern 50, 51 wie in Fig. 4 gezeigt. Im Hochleistungssystem 54' ist dem eigentlichen Energiesteller 28' ein eigener, konstanter Zwischenkreis 55' zugeordnet, um in diesem Hochleistungssystem 54' die konstante, maximale Zwischenkreisspannung U_{ZM} zur Verfügung zu stellen. Mit 29 bzw. 29' sind wiederum Energiewandler, z.B. Lagermagnete, bezeichnet, und schließlich ist in Fig. 6 auch das Grundsystem 25 gezeigt. Schematisch ist weiters ausgehend vom Regler 27 eine jeweilige Verbindung 56 bzw. 56' zur Aktivierung bzw. Deaktivierung des jeweiligen Systems, nämlich des Hocheffizienzsystems 54 bzw. des Hochleistungssystems 54', sowie eine Verbindung 57 zur Steuerung des variablen Zwischenkreises 55 vorgesehen.

In Fig. 7 ist eine zur Fig. 6 entsprechende detailliertere Schaltungsdarstellung (ähnlich jener gemäß Fig. 5) gezeigt. Dabei sind im Bereich des Hocheffizienz-Energiestellers 54 variable Zwischenkreise 55, weiters Vollbrücken 48, 49 und Ausgangsfilter 50 bzw. 51 veranschaulicht, wobei zur näheren Erläuterung hier wiederum auf die vorstehende Fig. 4 verwiesen werden kann. Das Hochleistungssystem 54' enthält konstante Zwischenkreise 55' ähnlich wie sich dies aus Fig. 4 (bei Wegdenken der Schalttransistoren T_{ZM} bzw. T_{ZV} , T_{ZVR} ergibt), und weiters sind entsprechende Vollbrückenschaltungen 48', 49' sowie Ausgangsfilter 50', 51' vorgesehen. An diese Ausgangsfilter 50' bzw. 51' sind die Hochleistungs-Energiewandler 29' angeschlossen, wogegen an die Ausgangsfilter 50, 51 des Hocheffizienzsystems 54 Hocheffizienz-Energiewandler 29 angeschlossen sind (s. Fig. 6). Auch hier gilt im Übrigen wieder, dass die Zwischenkreisspannungen U_{ZM} bzw. U_{ZV} jeweils (für jede Vollbrücke z.B.) durchaus verschieden sein können.

Der Regler 27 in der Ausführungsform gemäß Fig. 6 und 7 ist mit entsprechenden Hocheffizienz- und Hochleistungsalgorithmen ausgestattet, um sowohl das Hocheffizienzsystem 54 als auch das Hochleistungssystem 54' zu bedienen. Für das Hocheffizienzsystem 54 kann der Regler 27 eine Optimierungsregelung vorsehen, wie nachfolgend noch näher anhand der Fig. 13 und 14 erläutert wer-

den wird. Dies gilt auch für die bisher erläuterten Ausführungsformen.

Die Ausführungsform gemäß Fig. 8 entspricht im Wesentlichen jener gemäß Fig. 7, mit dem Unterschied, dass in den konstanten Zwischenkreisen 55' Schalttransistoren T_x' vorgesehen sind, um die Energieversorgung von nicht aktivierten und/oder defekten Elementen der Regelkette für das Hochleistungssystem 54' abschalten zu können. In ähnlicher Weise ist auch für das Hocheffizienzsystem 54 eine Abschaltung von nicht aktivierten bzw. defekten Elementen der Regelkette mit Hilfe von Transistoren T_x vorgesehen. Diese Transistoren T_x , T_x' sind im jeweiligen variablen bzw. konstanten Zwischenkreis 55 bzw. 55' ausgangsseitig vorgesehen und werden wiederum über Gatetreiber 46 bzw. 46' angesteuert.

In Fig. 9 ist, ausgehend von der Ausführungsform gemäß Fig. 8, der ein in Fig. 9 im oberen Bereich veranschaulichtes primäres System 60 entspricht, zusätzlich ein redundantes Regelsystem 61, mit eigenem Regler 27a und einem eigenen redundanten Hochleistungs-Energiesteller 54a, gezeigt. Das redundante System 61 kommuniziert über eine Verbindung 62 mit dem primären System 60, wobei im Fall eines Auftretens von einem Fehler, einer Störung, im primären System 60 die Regelung auf das redundante System 61 umgeschaltet werden kann. Die lokale Fehlererkennung der Systeme 60, 61 sowie eine gegenseitige Fehlererkennung erfolgt mit Hilfe einer aus dem Stand der Technik bekannten Technologie. Der Hochleistungs-Energiesteller 54a des redundanten Systems 61 kann identisch zum Hochleistungs-Energiesteller 54' des primären Systems aufgebaut werden.

In der Ausführungsform gemäß Fig. 10 ist im Vergleich zu jener gemäß Fig. 6 zusätzlich auch eine Verdoppelung der eigentlichen Regler vorgesehen, siehe die Regler 27 (im Hocheffizienzsystem 54) sowie 27' (im Hochleistungssystem 54'). Weiters sind Energiesteller 28, 28' und Energiewandler 29, 29' in doppelter Ausführung vorgesehen. Zusätzlich ist im Hochleistungssystem 54' dem Regler 27' eine Erkennungs- und Aktivierungs/Deaktivierungseinheit 63 vorgeschaltet, die im Fall von großen Abweichungen des Istwerts (Verbindung 13) vom Sollwert 25, siehe Differenz-

bildner 26, die Regelkette des Hochleistungssystems 54' - z.B. zusätzlich - aktiviert, wobei das Hocheffizienzsystem 54 weiterhin aktiv bleibt. Diese Erkennungs- bzw. Aktivierungs/Deaktivierungs-Einheit 63 kann beispielsweise durch einen an sich bekannten Fensterkomparator realisiert werden.

In Fig. 11 ist eine beispielhafte Anwendung des vorliegenden Energieeffizienten Aktorsystems anhand eines elektromagnetischen Aktors (Hybridmagnetlager) zur berührungsfreien magnetischen Lagerung eines Rotors dargestellt.

Die Anwendung von aktiven Magnetlagern (AMB - active magnetic bearing) beruht auf dem Prinzip des Elektromagneten. Mittels Spulen wird ein magnetischer Fluss generiert, der eine anziehende Kraft zwischen dem ferromagnetischen Stator und einem durch einen Luftspalt getrennten ferromagnetischen Teil der zu lagern- den Struktur (hier Rotor) ausübt. Die erforderlichen Baugruppen neben den Energiewandlern 29, 29' sind der Regler 27, Sensoren 9 (typisch: Abstand und Strom; vgl. auch die beispielhafte Sensor-Verbindungsleitung 64 in Fig. 11) und Energiesteller (Leistungsverstärker) 28, 28'.

Dem digitalen Regler 27 vorgeordnet sind gemäß Fig. 11 eine Sensorsignal-Aufbereitungseinheit 65 sowie ein A/D-Wandler 66. Weiters sind schematisch mit einem Block 67 noch die Erfassung von Parametern, wie Drehwinkel, Temperatur, sowie mit einem Block 68 eine Fehlererkennung und Deaktivierung angedeutet.

Im Regler 27 sind weiters mit einem Block 69 eine adaptive Vibrationsregelung (Adaptive Vibration Control, AVC), mit einem Block 70 eine Komponente für eine adaptive Reglerabtastrate, mit einem Block 71 die adaptive Zwischenkreisspannungsregelung und mit einem Block 72 eine Kommunikation zu einem Leitreechner angedeutet. Die Energiesteller 28 bzw. 28' enthalten wiederum einen variablen Zwischenkreis 55 bzw. einen konstanten Zwischenkreis 55' sowie weiters ein Modul für adaptive PWM (Pulsweitenmodulation) 73 im Energiesteller 28 und ein PWM-Modul 73' im Hochleistungs-Energiesteller 28'.

Mit dem vorliegenden Aktorsystem wird eine magnetische Lagerung

mit wesentlich höherer Energieeffizienz als bei bisherigen Magnetlagersystemen und mit geringsten Ummagnetisierungsverlusten ermöglicht. Der Aktor besteht hierbei insbesondere (wie nachstehend noch anhand der Fig. 12 erläutert wird) aus einem kaskadierten Hybridmagnetlagersystem, bestehend aus einer Kombination aus Permanentmagnetlagern zur Generierung der statischen Lagerkräfte, Hocheffizienz-AMBs mit minimalem Energieverbrauch für die betriebsmäßige Ausregelung der dynamischen Kräfte, und Hochleistungs-AMBs für den Anlauf, das Abfangen großer Auslenkungen und/oder einen Notlauf. Im normalen Betrieb ist nur das Hocheffizienz-AMB bzw. -System im Einsatz. Sobald die Regelung detektiert, dass die damit generierbaren Lagerkräfte nicht ausreichen, um eine unzulässige Auslenkung des Rotors zu verhindern, erfolgt eine automatische Zuschaltung des im normalen Betrieb deaktivierten Hochleistungs-AMB bzw. -Systems. Gleichzeitig wird, um die maximal mögliche Lagerkraft zu erzielen, auch die Zwischenkreisspannung U_z der Leistungsschaltverstärker des Hocheffizienz-AMB, ausgehend vom aktuellen Betriebszustand, auf den Maximalwert $U_{z\text{M}}$ erhöht. Sobald die erforderliche Lagerkraft des Hocheffizienz-AMB wieder ausreicht, erfolgt eine automatische Abschaltung des Hochleistungs-AMBs in den Stand-by-Zustand.

Die Regelung des kaskadierten Hybridmagnetlagersystems wird mittels des volladaptiven digitalen Reglers 27 realisiert, die folgende Kernpunkte umfasst: Active Vibration Control (Modul 69), adaptive Reglerabtastrate (Modul 70) für möglichst geringen Energieverbrauch des digitalen Reglers 27, adaptive Pulsweitenmodulationsfrequenz (Modul 73) zur Ansteuerung der Leistungsschaltverstärker für möglichst geringe Verluste in den Gatetreibern und Leistungshalbleitern, adaptive Zwischenkreisspannungsregelung (Modul 71) für geringe Verluste der Leistungsschaltverstärker und automatische Zuschaltung des Hochleistungs-AMB 28', 29' abhängig vom aktuellen Betriebszustand des Hocheffizienz-AMB.

Die Regelung des redundanten Hochleistungs-AMB-Systems (61 in Fig. 9 und 12) entspricht im Wesentlichen der Regelung des Hochleistungs-AMBs 54', zusätzlich ist jedoch die Zuschaltung bei Fehlfunktion des kombinierten Hocheffizienz-AMB/Hochleistungs-AMB-Systems implementiert.

Für einen möglichst geringen Stromverbrauch aufgrund minimaler Bauteilanzahl sowie höchster Signalqualität und Robustheit gegenüber externen Störsignaleinstreuungen kann eine direkte digitale Ansteuerung der Leistungstransistoren unter Einsatz einer 3-Pegel-PWM (s. Module 73, 73') vorgesehen werden. Diese 3-Pegel-PWM wird speziell hinsichtlich geringer Schaltverluste mit gleichmäßiger Aufteilung der Schaltverluste auf alle Vollbrückentransistoren T_1 - T_4 sowie geringer hochfrequenter Störsignalanteile im Verstärker Ausgangssignal ausgelegt.

Was die bereits beschriebenen Schaltverstärker-Vollbrücken 48, 49 bzw. 48', 49' betrifft, so werden bei den zur Ansteuerung der Elektromagnete der Hocheffizienz-AMBs bzw. der Hochleistungs-AMBs eingesetzten Leistungsverstärkern unterschiedliche Zielsetzungen verfolgt. Die Leistungsverstärker des Hocheffizienz-AMB weisen durch die Anpassung der Zwischenkreisspannung U_{zv} an die im jeweiligen Betriebszustand erforderlichen Kraftanstiegs- geschwindigkeiten sowie die Anpassung der Pulsweitenfrequenz an die Rotordrehzahl, speziell im Teillastbereich, eine hohe Effizienz auf. Beispielsweise lassen sich dadurch die Schaltverluste bei reduzierter Rotordrehzahl und/oder bei reduzierter Kraftanstiegsgeschwindigkeit wesentlich verringern. Die Leistungshalbleiter werden zweckmäßig im Hinblick auf ein Optimum von Leitverlusten, Schaltverlusten, Gatekapazität und Reverse Recovery-Verlusten ausgewählt. Bei den Leistungsverstärkern der Hochleistungs-AMB 28', 29' liegt der Schwerpunkt auf einer sicheren Abschaltbarkeit trotz einer möglichen Fehlfunktion der Gatetreiber oder Leistungshalbleiter. Eine Abschaltung innerhalb weniger Mikrosekunden ist hier vorteilhaft, um keine Destabilisierung des zu lagernden Rotors zu bewirken. Die Verlustleistung ist hier nebenrangig, da das Hochleistungs-AMB im normalen Betriebsfall nicht zugeschaltet ist.

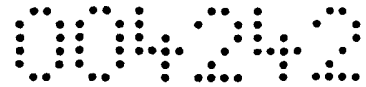
Die Zwischenkreise der Hochleistungs-AMB weisen keine Spannungsregelung auf.

Die anhand der Fig. 4 und 5 erläuterten Beispiele für mögliche Ausführungsformen der energieeffizienten Aktoransteuerung für einen 4-Quadrantenbetrieb weisen eine hochdynamisch unschaltbare

Zwischenkreisspannung U_z der einzelnen Vollbrücken auf, die beispielsweise aus der auf dem Maximalwert U_{zM} befindlichen Spannung für plötzlich erforderliche höchste Dynamik und aus der regelbaren Spannung U_{zV} , optimiert für den jeweiligen Betriebszustand, bestehen kann. Es können aber auch mehrere Schaltverstärkervollbrücken eingesetzt werden, beispielsweise über Koppelinduktivitäten parallel geschaltet oder zur Ansteuerung unterschiedlicher Stellglieder (z.B.: Hocheffizienz/Hochleistungs-Stellglied, siehe Fig. 7 bis 9). Die variable Zwischenkreisspannung U_{zV} wird hierbei durch einen DC/DC-Wandler, gebildet mit der Baugruppe um den Transistor T_{zV} , generiert. Hierbei können die Leistungsschalttransistoren und auch die Gatetreiberschaltkreise an die erforderlichen Leistungsanforderungen der Brücken optimal angepasst werden.

In Fig. 12 ist eine besonders vorteilhafte Anwendung des vorliegenden energieeffizienten Aktorsystems, nämlich zur Lagerung in einem Schwungradspeicher, veranschaulicht. Dabei entspricht in Fig. 12 der Block 60 links oben dem kombinierten Hocheffizienz-/Hochleistungs-AMB (Regelung und Ansteuerung) gemäß Fig. 11 (ohne die Stellglieder 29, 29'). Weiters ist ein redundantes Hochleistungs-AMB 61 (Regelung und Ansteuerung), wie vorstehend bereits anhand der Fig. 9 erläutert, vorgesehen, wobei auch hier ein Modul 65 für die Sensorsignalaufbereitung, ein A/D-Wandlermodul 66, ein Modul 68 für die Fehlererkennung und Deaktivierung sowie - innerhalb des Reglers 27 - ein AVC-Modul 69 sowie ein Modul 72 für die Inter-AMB-Kommunikation veranschaulicht sind. Weiters ist auch ein Hochleistungsverstärker 28' wie erläutert als Energiesteller vorgesehen. Mit den Verbindungen 80, 81, 64, 82 und 83 in Fig. 12 ist - in dieser Reihenfolge - die Ansteuerung der Hocheffizienz-Elektromagnete, die Ansteuerung der Hochleistungs-Elektromagneten, die Übertragung der Abstandssensorsignale sowie weiters die Ansteuerung von redundanten Hochleistungs-Elektromagneten und die Übertragung von redundanten Abstandssensorsignalen angedeutet. (Entsprechende Ansteuerungs-Verbindungen 80, 81 sind auch in Fig. 11 eingetragen).

Im rechten Teil der Fig. 12 ist der bereits erwähnte Schwungrad-Energiespeicher 85 mit einem Rotor 86 veranschaulicht, wobei dieser Rotor 86 magnetisch gelagert ist und über ein mechani-

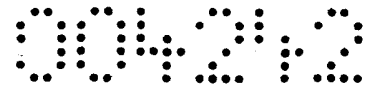


ches Notlager (in Fig. 12 nicht näher veranschaulicht) verfügt. Zur Lagerung des Rotors 86 ist ein Hybridmagnetlager mit permanent-magnetischer Lagerung und aktiver elektromagnetischer Lagerung gemäß dem vorstehenden Prinzipien vorgesehen. Diese Hybridlager (z.B.: radial-stabil, axial-labil, aktiv-stabilisiert) sind in Fig. 12 bei 87, 87' angedeutet. Die permanent-magnetische Lagerung ist dabei so ausgeführt, dass die Lager des Rotors 86 - in einem bestimmten Arbeitspunkt (Position) - in einigen seiner sechs Freiheitsgrade ein stabiles und in den restlichen seiner Freiheitsgrade ein meta-stabiles bzw. labiles Gleichgewicht aufweist.

In Fig. 12 sind weiters noch zwei Axial-Hochleistungslager 88, 88' sowie zwei Radial-Hochleistungslager 89, 89' veranschaulicht, ebenso wie ein Motor/Generator 90 und ein Generator 91 zur Stromversorgung der redundanten Magnetlagerung, ferner ein Leistungsumrichter 92 und ein Notstromumrichter 93.

Der Rotor 86, d.h. das Schwungrad, ist ein ringförmiger Außenläufer von an sich konventioneller Bauform, wobei als Material beispielsweise Karbon/Kevlar/Glasfaser-Materialien verwendet werden können. Bevorzugt besteht der Körper des Rotors 86 aus Karbonfasermaterial, das eine hohe Reißfestigkeit aufweist, was bei den hier gewünschten hohen Drehzahlen (20.000 - 40.000 Upm und mehr) von besonderer Wichtigkeit ist. Die Lagerung ist für hocheffiziente Schwungradspeicher besonders bedeutsam, und für die angestrebten hohen Drehzahlen haben sich die berührungsfreien magnetischen Lager, insbesondere AMBs, als optimale Technologie erwiesen. Hierfür eignet sich das beschriebene energieeffiziente Aktorsystem in besonders vorteilhafter Weise.

Grundsätzlich hängen die mit Schwungradspeichern erzielbaren Energiespeicherzeiten auch von den Luftreibungsverlusten aufgrund der Rotation (luftdruckabhängig und formabhängig) sowie auch von dem Bremsmoment des Motor/Generators 90 ab, abgesehen von den bereits früher erläuterten Lagerverlusten aufgrund von Ummagnetisierungsverlusten. Um die rasche Drehung möglichst luftreibungsfrei durchzuführen, wird mit Vorteil der Rotor 86 in einem geschlossenen Behälter 94 untergebracht, der vorzugsweise evakuiert wird. Dieser Behälter 94 ist auch aus Sicherheitsgrün-

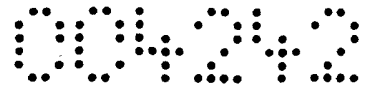


den, im Hinblick auf die hohen Drehzahlen, für den Fall einer Störung von Vorteil.

Insbesondere bei einer derartigen Anwendung des vorliegenden energieeffizienten Aktorsystems für einen Schwungrad-Energiespeicher, aber auch in anderen Fällen, ist ein Optimierungs-Regelkreis 100, wie bereits mehrfach angesprochen, und wie schematisch in Fig. 13 veranschaulicht, von besonderem Vorteil. Mit einem derartigen Regelkreis 100 wird eine Regelkette zum Regeln, zum Aufsuchen und zum Halten des jeweiligen optimalen Arbeitspunktes, insbesondere hinsichtlich der jeweils besten Energieeffizienz, vorgesehen. Demgemäß wird dem Regelkreis 100 gemäß Fig. 13 über einen Eingang 101 ein Optimalwert, beispielsweise hinsichtlich Energieverbrauch, eingegeben, und die zu optimierende Größe, z.B. der Energieverbrauch, wird über die Verbindung 102 von einer Regelstrecke 103 einem Differenzbildner 104 zugeführt, an den ein Optimierungsregler 105 angeschlossen ist, um den jeweils optimalen Sollwert über die Verbindung 15 dem bereits einleitend erwähnten Differenzbildner 26 (siehe Fig. 3) zuzuführen. Der Regler 27 ermittelt wie beschrieben die erforderliche Stellgröße, nun jedoch abhängig von der zu optimierenden Größe (z.B. Energieverbrauch), und leitet sie der Regelstrecke 103 zu, die im Wesentlichen den kombinierten Energiesteller 28, den Energiewandler 29 und das Grundsystem 25 gemäß Fig. 3 enthält. Insgesamt ergibt sich somit eine kaskadierte Reglerschaltung 105-27.

Mit einem derartigen Optimierungs-Regelkreis 100 kann bei einem bestimmten Istwert der zeitliche Mittelwert des Energieverbrauchs des Energiestellers 28 auf ein Minimum gebracht werden, wobei auf diese Weise der zeitliche Mittelwert des Ausgangswerts des Energiestellers 28 einen bestimmten Wert annimmt; der somit anzustrebende Istwert ist von vornherein bzw. während des Betriebs nicht konstant und nicht unmittelbar bekannt, vielmehr kann er abhängig von verschiedenen Einflussgrößen sein, wie z.B. von der Zeit, Temperatur und Alterung.

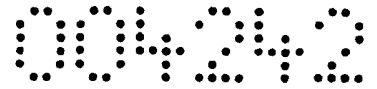
Dies ist beispielsweise aus dem Diagramm gemäß Fig. 14 ersichtlich, in dem die erforderliche Haltekraft F (in kN) über den Istwert Δs (in mm) mit zwei verallgemeinerten Haltekennlinien L1



bzw. L2, mit entsprechenden zwei Arbeitspunkten A1 bzw. A2, veranschaulicht ist. Im statischen Fall hat hier die erforderliche Haltekraft F bei einer Positionsabweichung $\Delta s=0$ einen Nullpunkt. Durch verschiedene Einflüsse kann sich der Arbeitspunkt von A1 zu A2 und damit die Haltekennlinie L1 beispielsweise zur Kennlinie L2 verschieben, etwa zufolge einer von der Temperatur abhängigen Drift. Mit Hilfe des Optimierungs-Regelkreises 100 nach Fig. 13, mittels „optimum tracking“, findet dabei der Regler den neuen Arbeitspunkt A2 (beispielsweise bei $\Delta s=0,5\text{mm}$), um wieder mit minimalem Energieaufwand den Rotor 86 etc. zu stabilisieren.

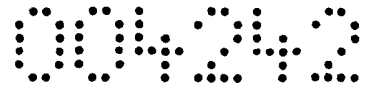
In Fig. 15 ist schließlich als Beispiel für einen Regelungsablauf ein Flussdiagramm veranschaulicht, wobei nach einem Startschritt 110 und einem Initialisierungsschritt 111 das System zunächst in eine Warteschleife 112 eintritt. In Folge eines Timer-Interrupts 113 beginnt gemäß Feld 114 ein Regelzyklus. In der Folge werden gemäß dem Feld 115 Istwerte (siehe Verbindung 13 in Fig. 3) eingelesen und der Regelung gemäß Feld 116 zugeführt, wobei auch der Sollwert (gemäß Verbindung 15 in Fig. 3) eingelesen wird. Nach Differenzbildung wird in einem Feld 117 überprüft, ob die Führungs- oder die Stellgröße innerhalb oder außerhalb eines vorgegebenen Intervalls liegt, das entsprechend den Grenzen des energieeffizienten Aktorsystems bei 118 bestimmt wird. Befindet sich die Stellgröße (oder Führungsgröße) innerhalb des Intervalls, so wird gemäß einem Feld 119 zunächst die Führungsgröße des Hochleistungsaktors 29' auf Null gesetzt (und so der Hochleistungsaktor 29' deaktiviert), und gemäß einem Feld 120 wird dann die Führungsgröße für den energieeffizienten Aktor 29 ermittelt. Danach wird das Ende des Regelzyklus bei 121 erreicht, und es wird gemäß Feld 122 zur Warteschleife 112 zurückgekehrt.

Befindet sich bei der Abfrage gemäß Feld 117 jedoch die Stell- oder Führungsgröße außerhalb des vorgegebenen Intervalls, dann wird gemäß Feld 123 zuerst die Führungsgröße oder Stellungsgröße des Hocheffizienzaktors 29 auf den Maximal- bzw. Minimalwert gemäß dem vorgegebenen Intervall gesetzt, um mit dieser limitierten Stellgröße den energieeffizienten Aktor (Energiewandler 29) anzusteuern. Sodann wird jedoch zusätzlich der Hochleistungs-Energiewandler 29' angesteuert, nachdem gemäß Feld 124 eine



- 25 -

Stellgröße für den Hochleistungs-Energiewandler 29' festgelegt wurde. Danach wird wiederum das Ende 121 des Regelzyklusses erreicht.



Patentansprüche:

1. Aktorsystem (2) mit wenigstens einem Stellglied (29, 29') und einer zugehörigen Regelkette (8), dadurch gekennzeichnet, dass die Regelkette (8) für wenigstens zwei Betriebsmodi ausgelegt ist, von denen wenigstens einer deaktivierbar ist.
2. Aktorsystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass einer der Betriebsmodi ein Hocheffizienz-Betriebsmodus ist.
3. Aktorsystem nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass ein (anderer) Betriebsmodus ein Hochleistungs-Betriebsmodus ist.
4. Aktorsystem nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Hochleistungs-Betriebsmodus deaktivierbar ist.
5. Aktorsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass für jeden Betriebsmodus ein zugehöriges Stellglied vorgesehen ist.
6. Aktorsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass das bzw. jedes Stellglied (29, 29') mit einem Elektromagneten gebildet ist.
7. Aktorsystem nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektromagnete einem Magnetlager, vorzugsweise Hybridmagnetlager, zugehören.
8. Aktorsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Regelkette (8; 100) zum Regeln, zum Aufsuchen und Halten des jeweiligen optimalen Arbeitspunktes, insbesondere hinsichtlich bester Energieeffizienz, eingerichtet ist.
9. Aktorsystem nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Regelkette (8; 100) einen Optimierungsregler (105) aufweist, der den Sollwert eines nachgeschalteten Reglers (27) einstellt, wobei der Energieverbrauch des Stellgliedes (29) bzw. dessen Energiestellers (28) minimal wird.

10. Aktorsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest ein redundantes, zuschaltbares Stellglied (61), vorzugsweise mit Hochleistungs-Regelung, vorgesehen ist.

11. Aktorsystem nach einem der Ansprüche 7 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass das Magnetlager einen Energiespeicher-Rotor (86) lagert.

12. Aktorsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein Glied (53) in der Regelkette zur Erzielung der zwei Betriebsmodi doppelt ausgeführt ist.

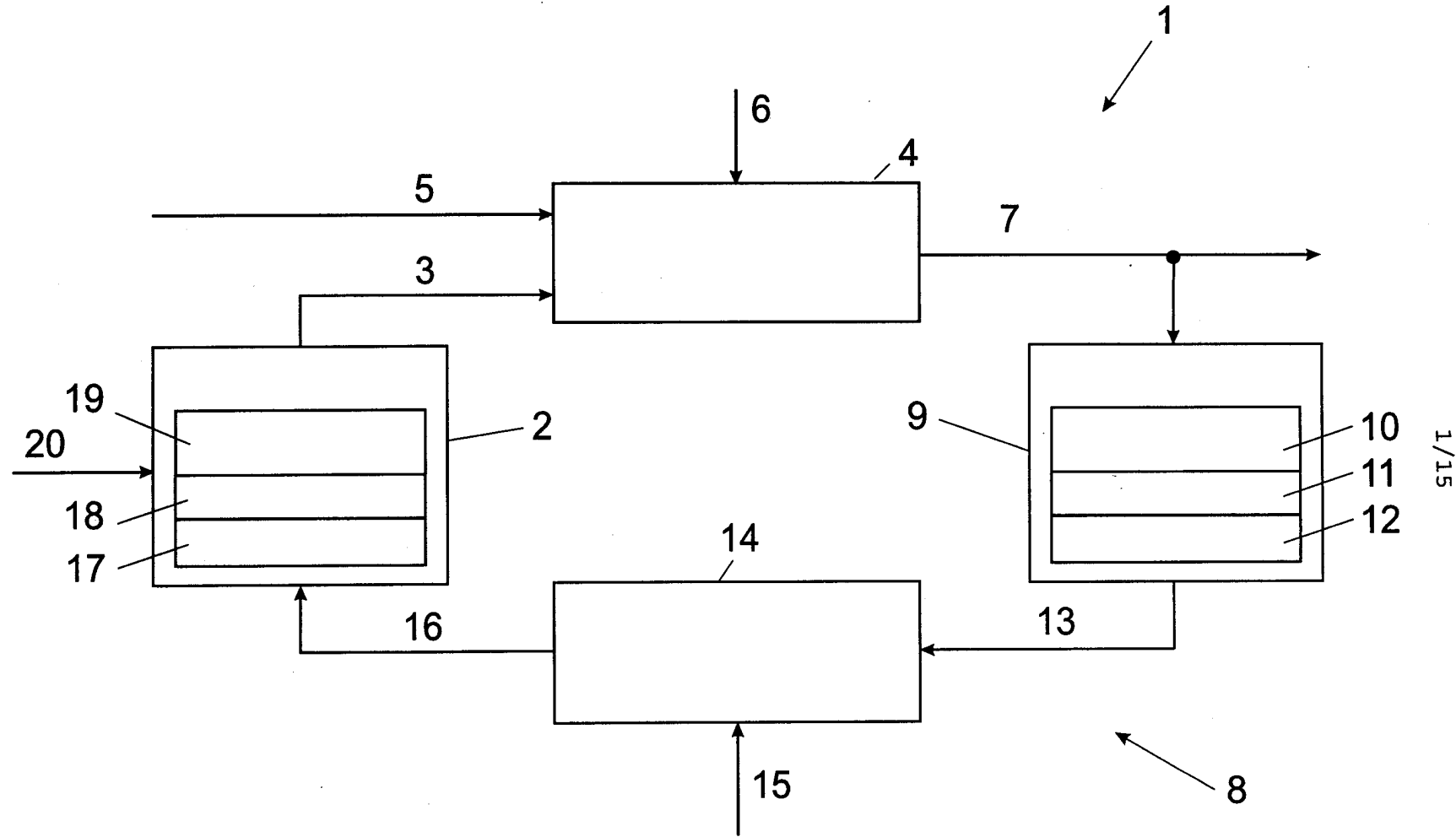
13. Aktorsystem nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass im Wesentlichen alle Glieder (27, 27', 28, 28', 29, 29') der Regelkette zumindest zweifach ausgeführt sind.

14. Aktorsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Regelkette zur Detektion (63) einer ein Aktivieren des inaktiven Betriebsmodus erfordernden Betriebssituation eingerichtet ist.

15. Aktorsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass zur Stellglied-Ansteuerung Schaltverstärker-Vollbrücken (48, 49) vorgesehen sind.

16. Aktorsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass zur Stellglied-Ansteuerung Hybridverstärker oder rein analoge Verstärker (48, 49) vorgesehen sind.

Fig. 1



1/15



Fig. 2

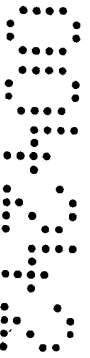
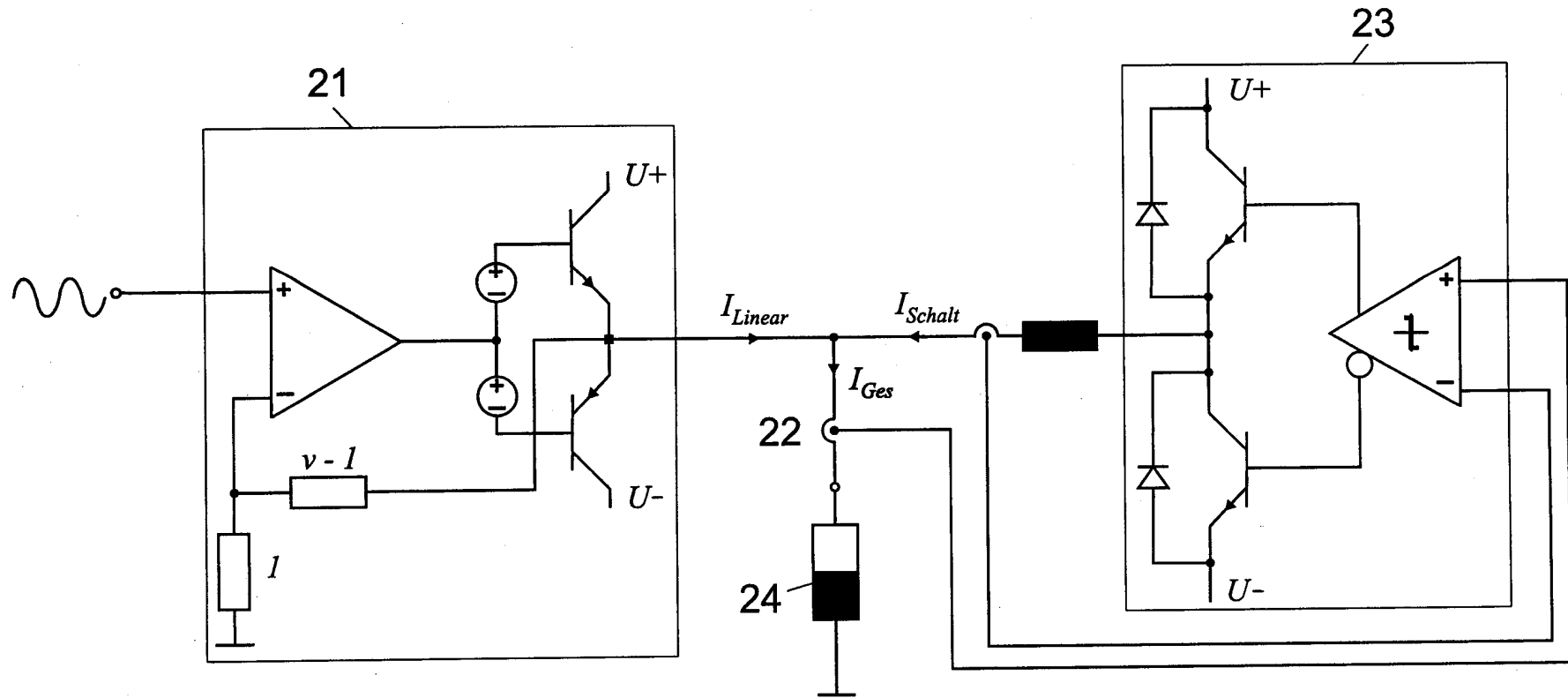


Fig. 3

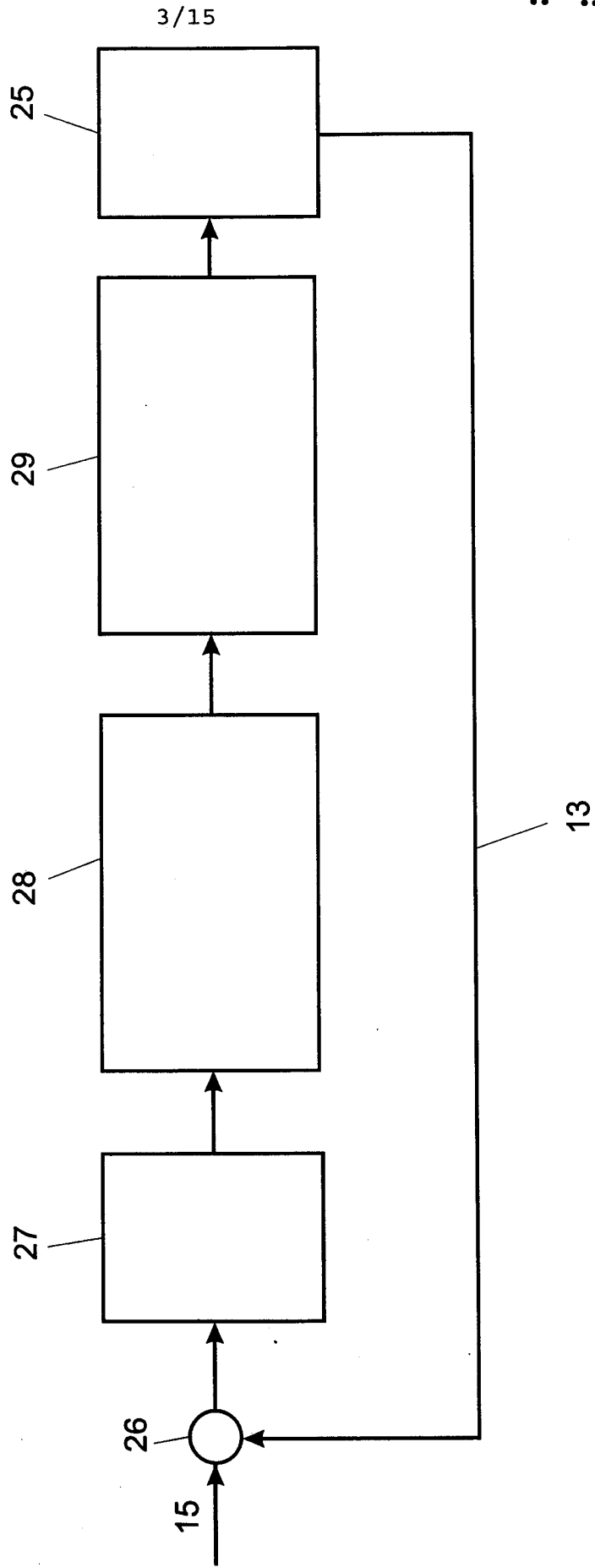


Fig. 5

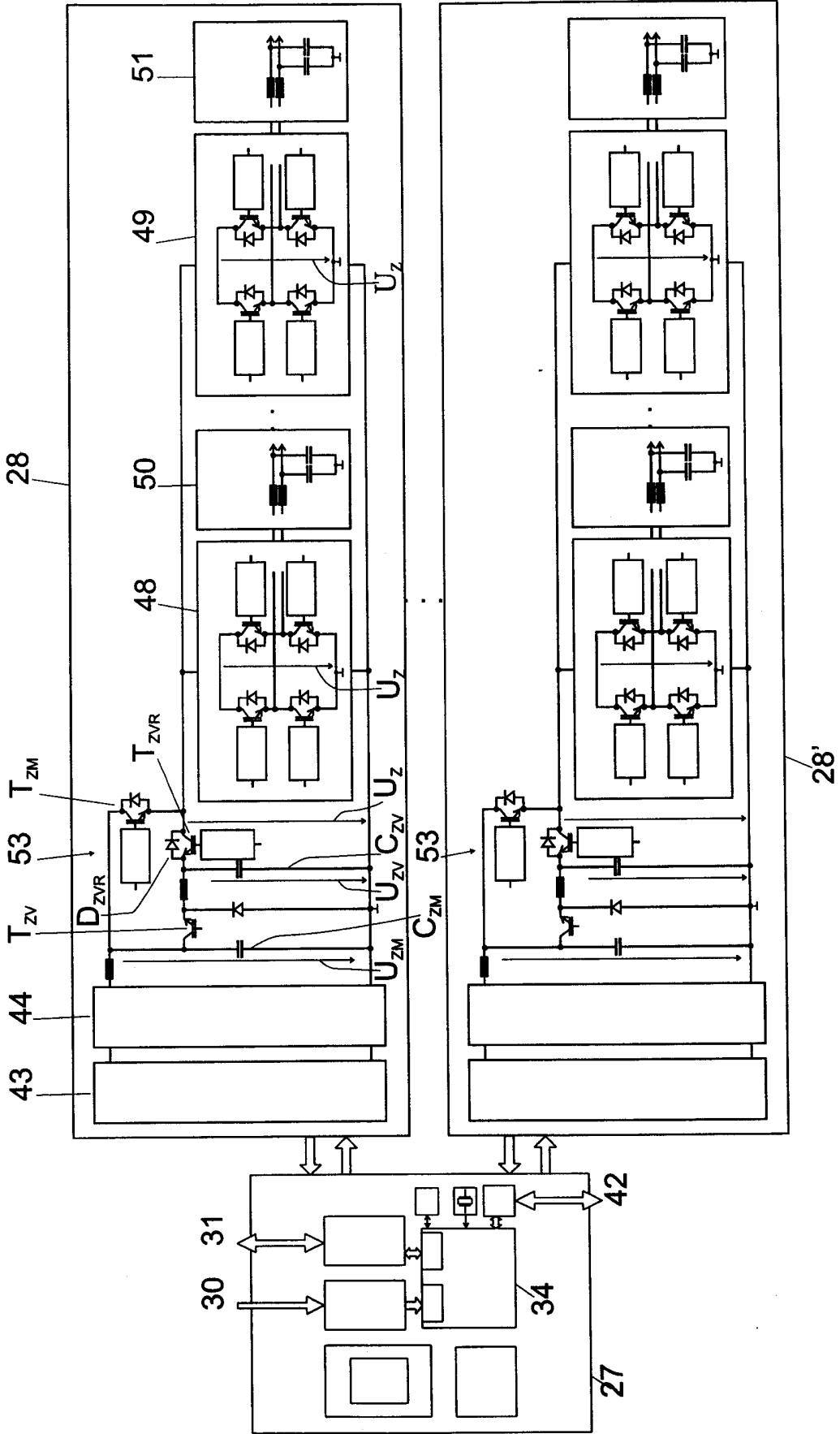


Fig. 6

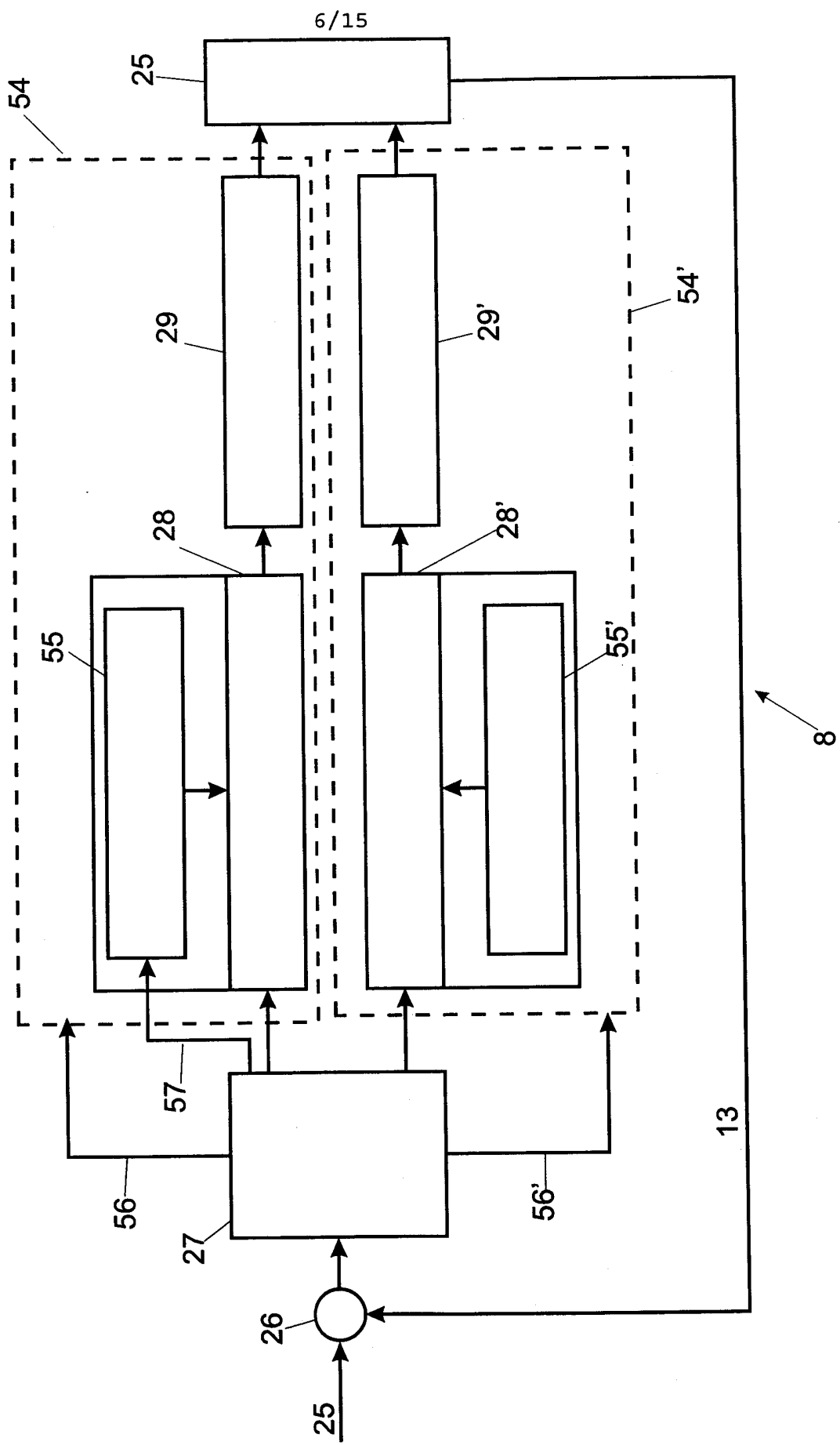


Fig. 7

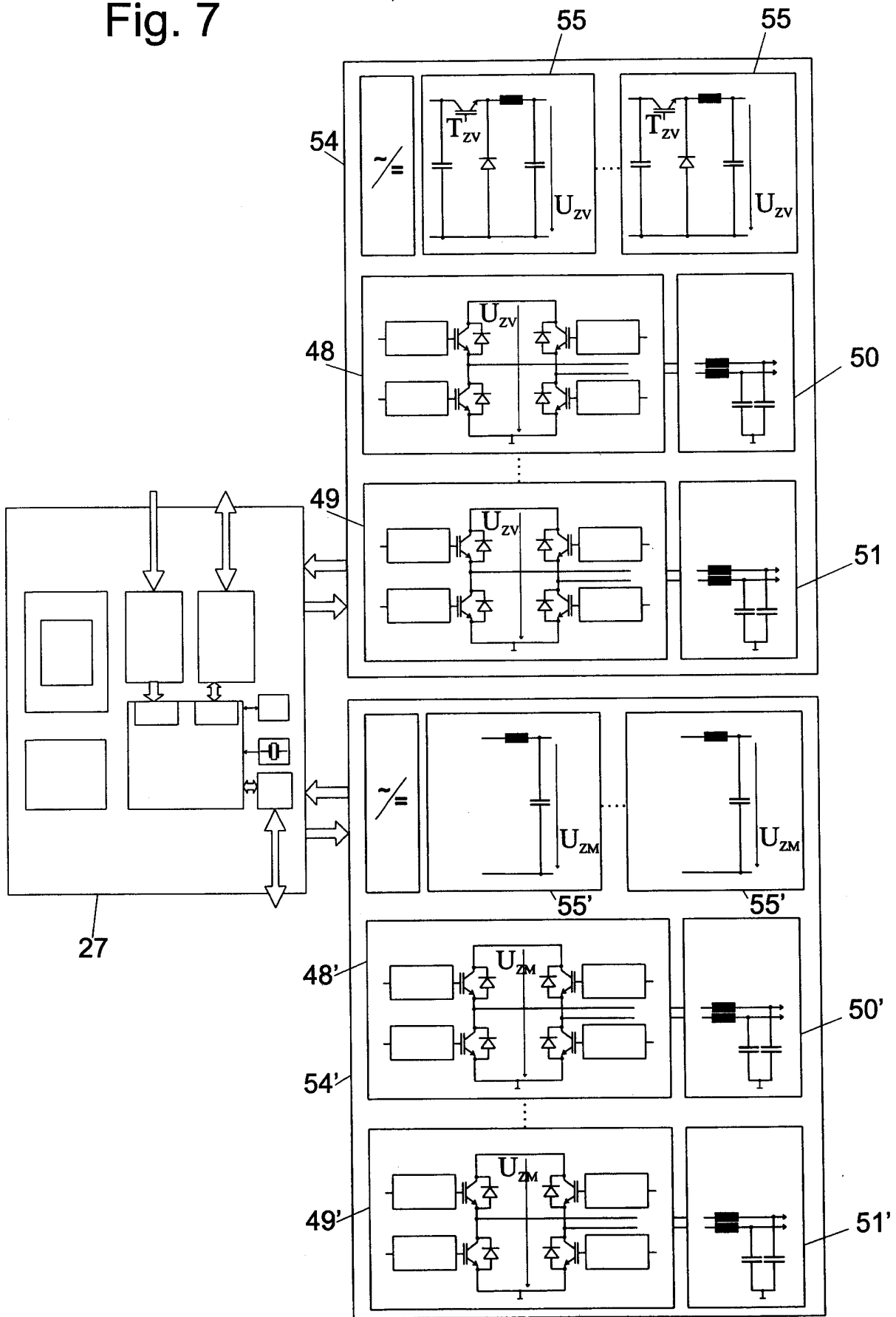


Fig. 8

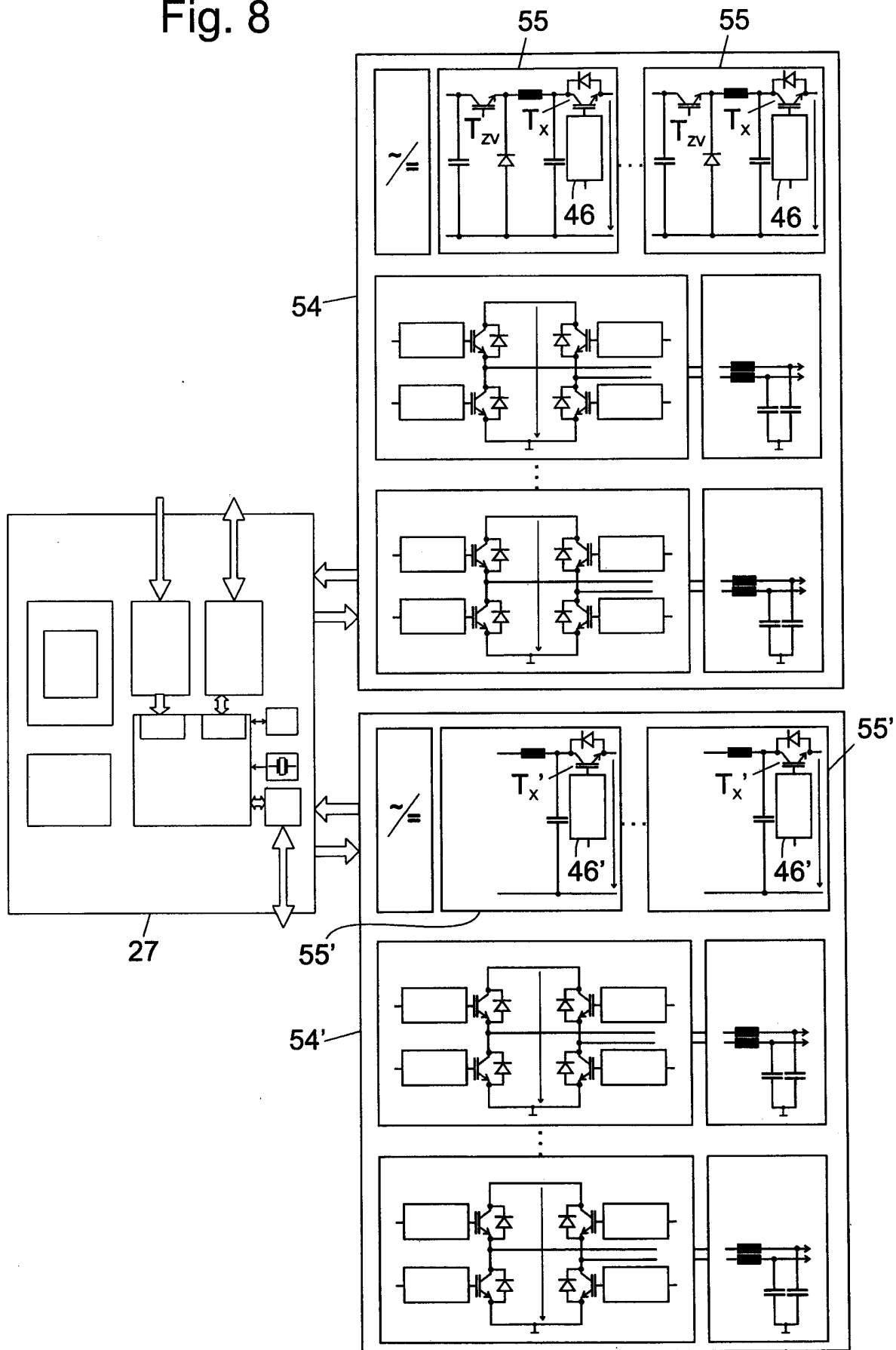


Fig. 9

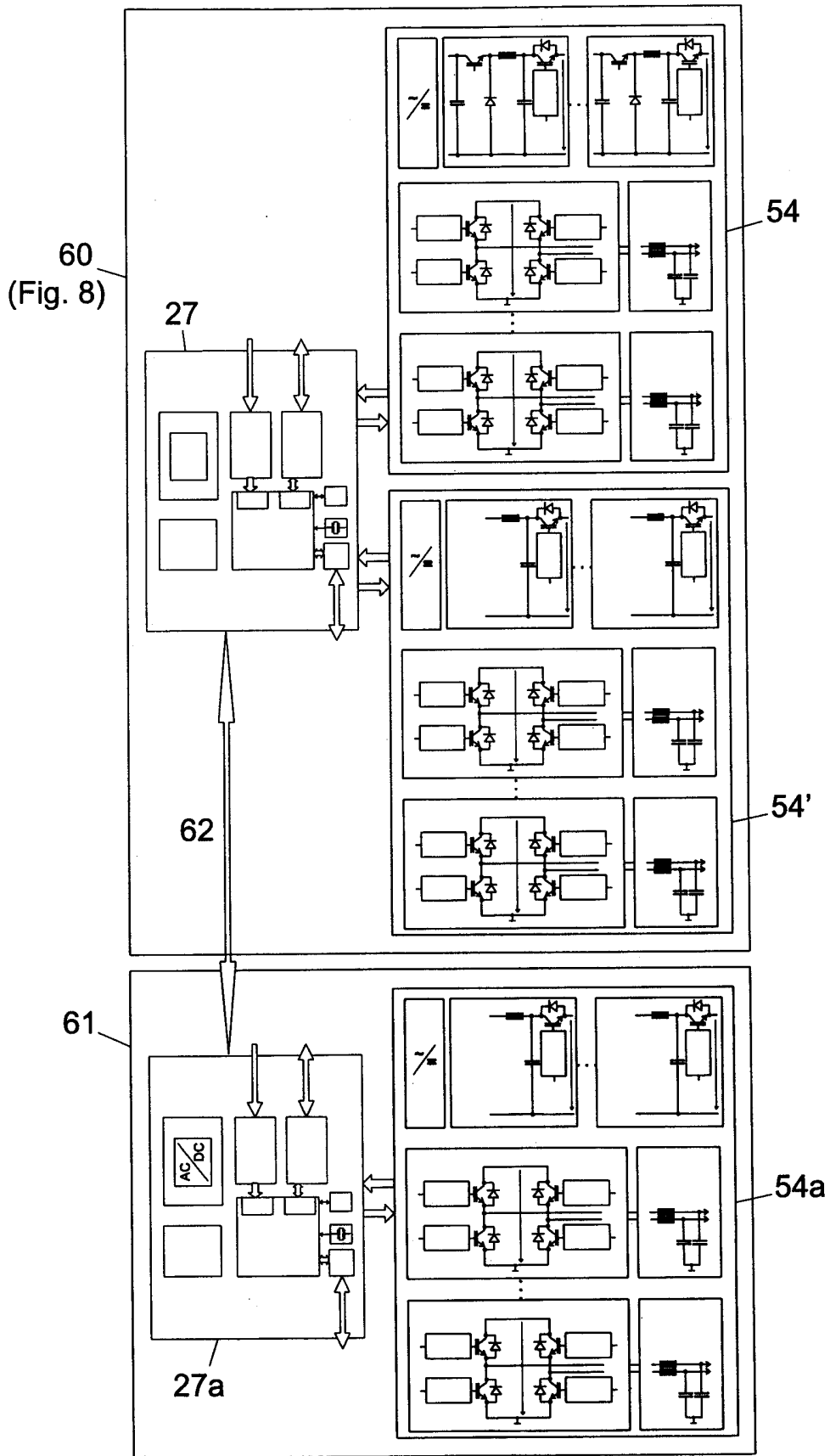


Fig. 10

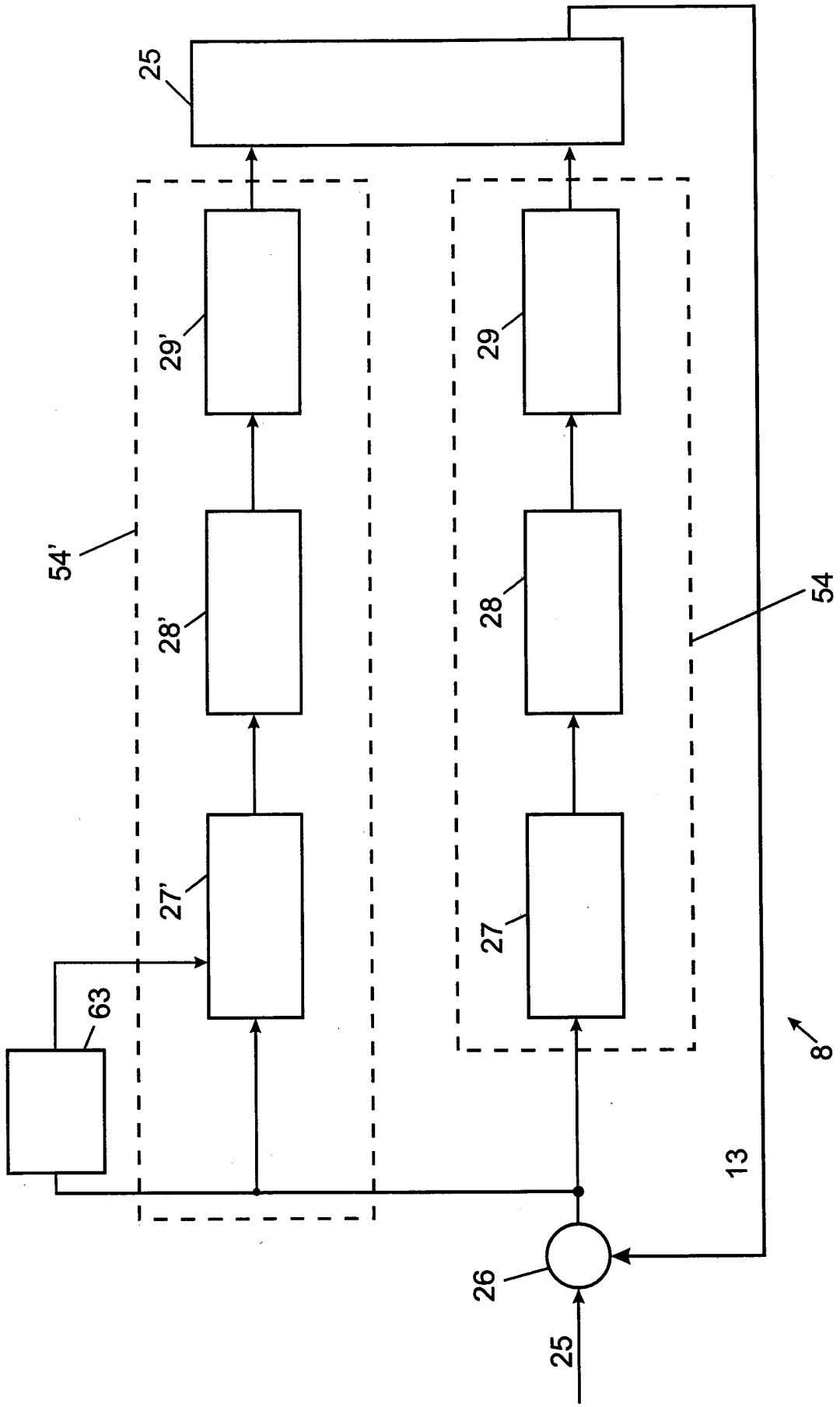
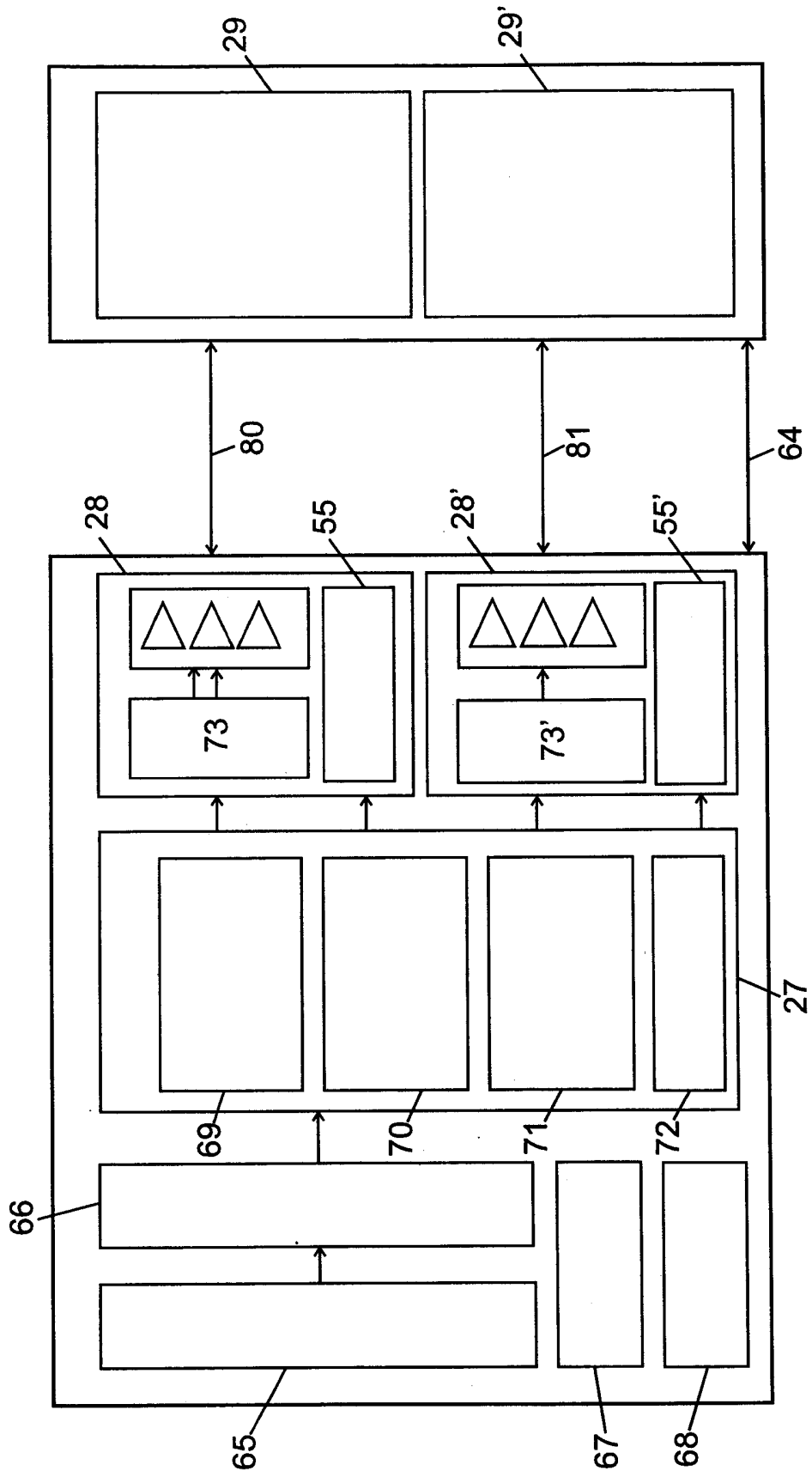


Fig. 11



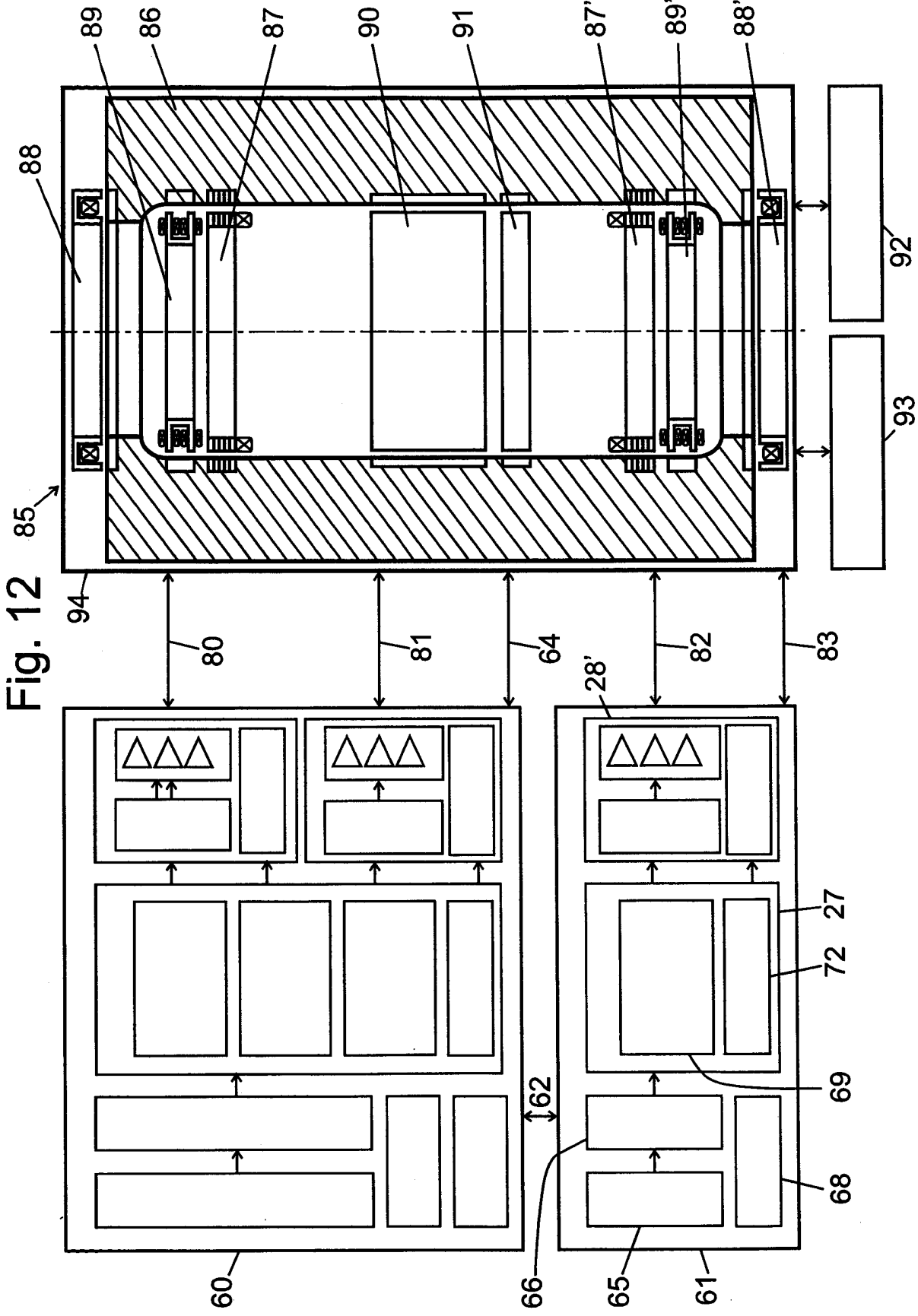


Fig. 12

Fig. 13

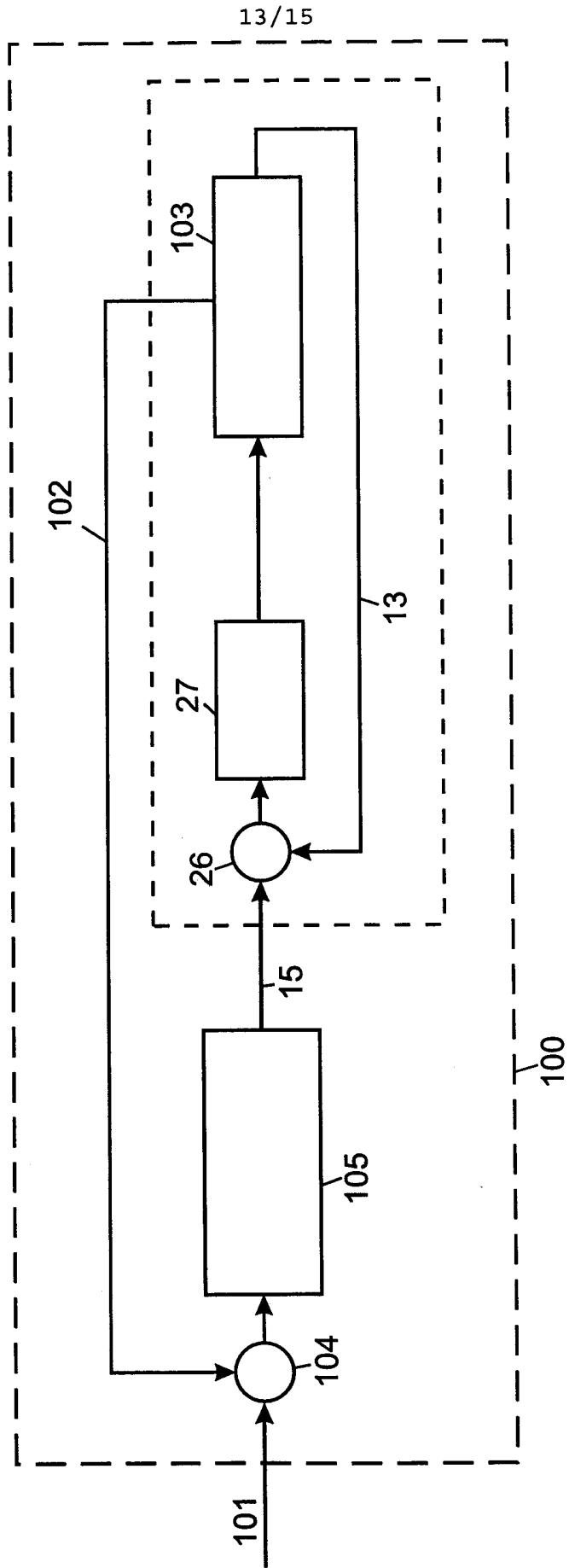


Fig. 14

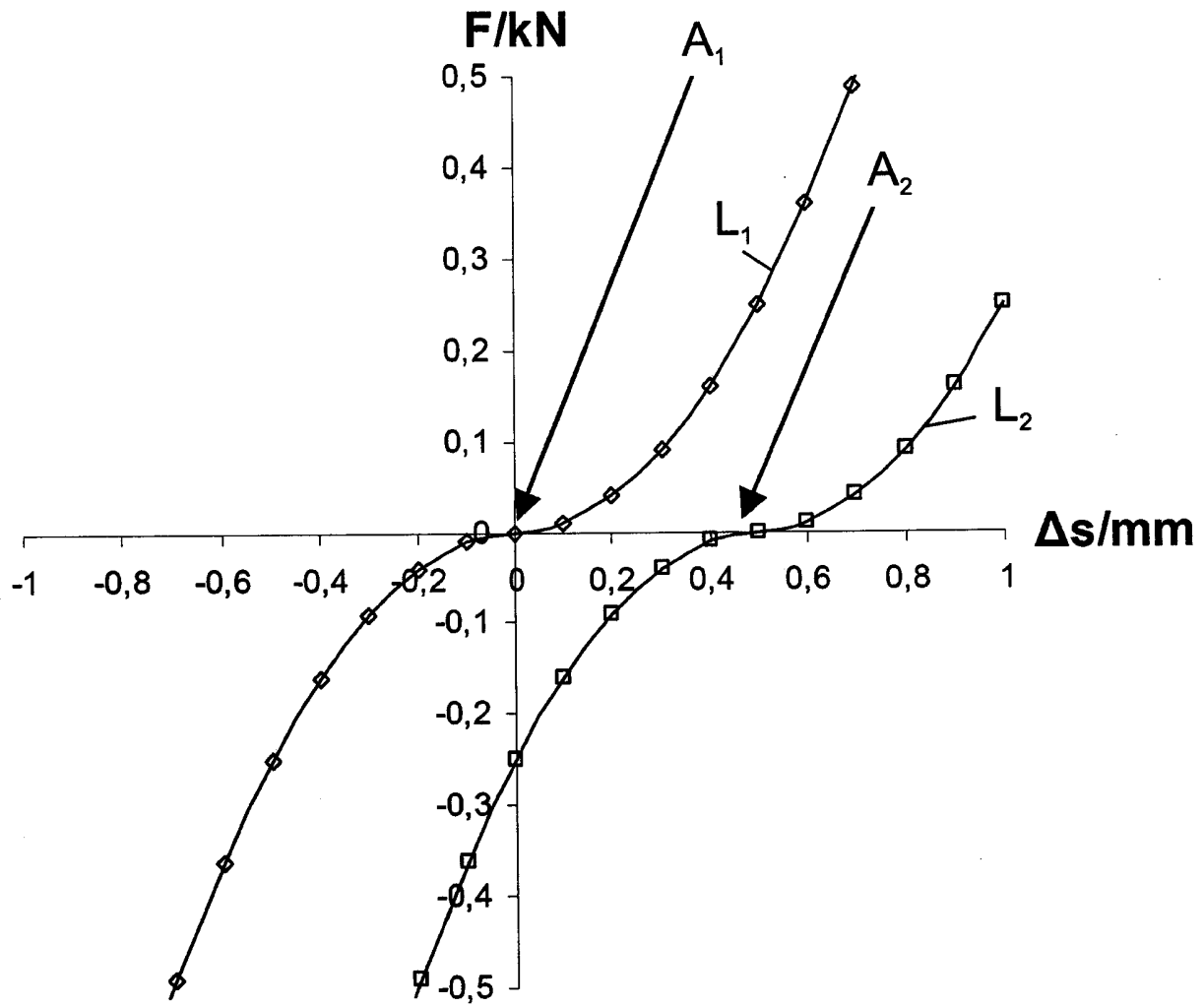
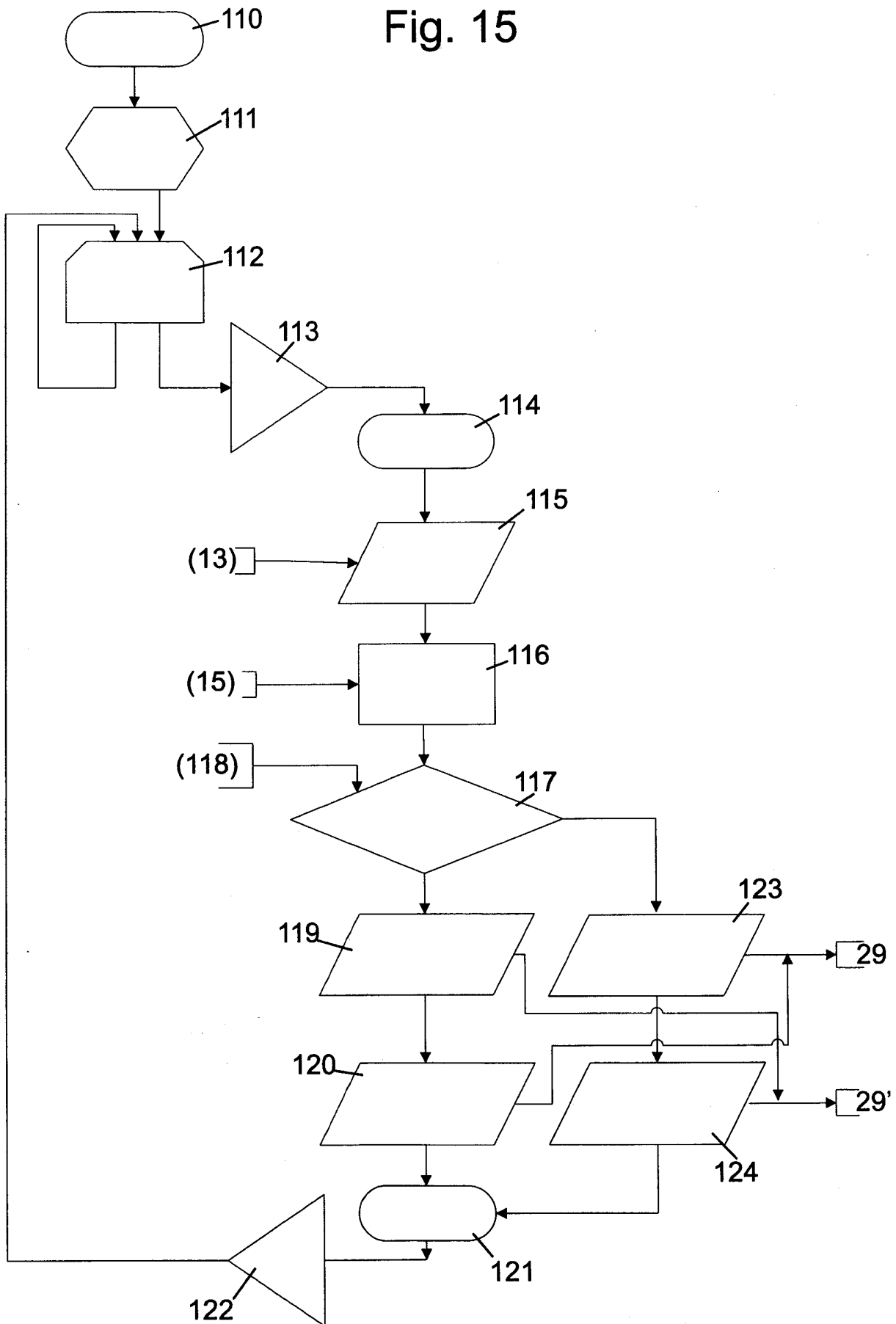
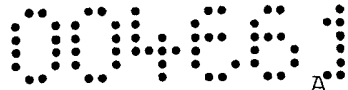


Fig. 15





Patentansprüche:

1. Aktorsystem (2) mit wenigstens einem Stellglied (29, 29') und einer zugehörigen Regelkette (8), die für wenigstens zwei Betriebsmodi ausgelegt ist, von denen wenigstens einer deaktivierbar ist, dadurch gekennzeichnet, dass einer der Betriebsmodi ein Hocheffizienz-Betriebsmodus ist.
2. Aktorsystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der bzw. ein anderer Betriebsmodus ein Hochleistungs-Betriebsmodus ist.
3. Aktorsystem nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Hochleistungs-Betriebsmodus deaktivierbar ist.
4. Aktorsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass für jeden Betriebsmodus ein zugehöriges Stellglied vorgesehen ist.
5. Aktorsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass das bzw. jedes Stellglied (29, 29') mit einem Elektromagneten gebildet ist.
6. Aktorsystem nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektromagnete einem Magnetlager, vorzugsweise Hybridmagnetlager, zugehören.
7. Aktorsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Regelkette (8; 100) zum Regeln, zum Aufsuchen und Halten des jeweiligen optimalen Arbeitspunktes, vorzugsweise hinsichtlich bester Energieeffizienz, eingerichtet ist.
8. Aktorsystem nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Regelkette (8; 100) einen Optimierungsregler (105) aufweist, der den Sollwert eines nachgeschalteten Reglers (27) einstellt, wobei der Energieverbrauch des Stellgliedes (29) bzw. dessen Energiestellers (28) minimal wird.
9. Aktorsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch ge-

NACHGEREICHT

kennzeichnet, dass zumindest ein redundantes, zuschaltbares Stellglied (61), vorzugsweise mit Hochleistungs-Regelung, vorgesehen ist.

10. Aktorsystem nach einem der Ansprüche 6 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass das Magnetlager einen Energiespeicher-Rotor (86) lagert.

11. Aktorsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein Glied (53) in der Regelkette zur Erzielung der zwei Betriebsmodi doppelt ausgeführt ist.

12. Aktorsystem nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass im Wesentlichen alle Glieder (27, 27', 28, 28', 29, 29') der Regelkette zumindest zweifach ausgeführt sind.

13. Aktorsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Regelkette zur Detektion (63) einer ein Aktivieren des inaktiven Betriebsmodus erfordernden Betriebssituation eingerichtet ist.

14. Aktorsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass zur Stellglied-Ansteuerung Schaltverstärker-Vollbrücken (48, 49) vorgesehen sind.

15. Aktorsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass zur Stellglied-Ansteuerung Hybridverstärker oder rein analoge Verstärker (48, 49) vorgesehen sind.



Klassifikation des Anmeldegegenstands gemäß IPC ⁸ : G05B 11/42 (2006.01); G05D 17/02 (2006.01); F16C 32/04 (2006.01)		
Klassifikation des Anmeldegegenstands gemäß ECLA: G05B11/42; G05D17/02; F16C32/04		
Recherchierter Prüfstoﬀ (Klassifikation): G05B, G05D, F16C		
Konsultierte Online-Datenbank: EPODOC, WPI, TXTnn, NPL, Internet		
Dieser Recherchenbericht wurde zu den am 24. April 2009 eingereichten Ansprüchen erstellt.		
Kategorie ⁷⁾	Bezeichnung der Veröffentlichung: Ländercode, Veröffentlichungsnummer, Dokumentart (Anmelder), Veröffentlichungsdatum, Textstelle oder Figur soweit erforderlich	Betreﬀend Anspruch
X	EP 1 460 293 A2 (BOC EDWARDS JAPAN LTD) 22. September 2004 (22.09.2004) <i>Zusammenfassung; Figuren 1 - 3 und zugehörige Beschreibung; Paragraphen [0001], [0043], [0074], [0075], [0107], [0227]; Ansprüche 1, 12.</i>	1 - 3, 6, 7
X	DE 10 2006 029 514 B3 (ATMEL GERMANY GMBH) 31. Mai 2007 (31.05.2007) <i>Zusammenfassung; Figur 2; Anspruch 1.</i>	1
A	HONGYUN, J. et al. 'Research of Digital Control System for Single Freedom Hybrid Magnetic Bearing in the Axial Direction.' In: Electrical machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. Proceedings of the Eight International Conference on Nanjing, China 27-29 September 2005 (27.09.2005) Piscataway, NJ, USA, IEEE ISBN 978-7-5062-7407-4 Seiten 1816 - 1820. XP 010877622 <i>Der ganze Artikel.</i>	1 - 16
Datum der Beendigung der Recherche: 19. Februar 2010		<input type="checkbox"/> Fortsetzung siehe Folgeblatt
		Prüfer(in): Dipl.-Ing. WALTER
⁷⁾ Kategorien der angeführten Dokumente: X Veröffentlichung von besonderer Bedeutung: der Anmeldegegenstand kann allein aufgrund dieser Druckschrift nicht als neu bzw. auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden. Y Veröffentlichung von Bedeutung: der Anmeldegegenstand kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren weiteren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist. A Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert. P Dokument, das von Bedeutung ist (Kategorien X oder Y), jedoch nach dem Prioritätstag der Anmeldung veröffentlicht wurde. E Dokument, das von besonderer Bedeutung ist (Kategorie X), aus dem ein älteres Recht hervorgehen könnte (früheres Anmeldedatum, jedoch nachveröffentlicht, Schutz ist in Österreich möglich, würde Neuheit in Frage stellen). & Veröffentlichung, die Mitglied der selben Patentfamilie ist.		