



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 697 28 118 T2** 2005.02.10

(12)

Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 0 848 174 B1**

(51) Int Cl.⁷: **F16C 39/06**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **697 28 118.3**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **97 310 032.4**

(96) Europäischer Anmeldetag: **12.12.1997**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **17.06.1998**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **17.03.2004**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **10.02.2005**

(30) Unionspriorität:

764186 13.12.1996 US

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, FR, GB, IT

(73) Patentinhaber:

General Electric Co., Schenectady, N.Y., US

(72) Erfinder:

**Lyons, James Patrick, Niskayuna, New York
12309, US; Preston, Mark Alan, Niskayuna, New
York 12309, US; Richter, Eike, Cincinnati, Ohio
45249, US; Storace, Albert Frank, Cincinnati, Ohio
45231, US**

(74) Vertreter:

Voigt, R., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 65239 Hochheim

(54) Bezeichnung: **Lagersystem mit magnetischem Axialkraftkompensator**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Hochleistungs-Turbomaschinen können wesentliche Lastanforderungen für Axialschublager erzeugen. Diese Lastanforderungen sind besonders hoch in fan- bzw. bläserlosen stationären Luft-derivativen Triebwerken und in Gasturbinentriebwerken, die üblicherweise Verdichterabzapfgas verwenden, um gegen einen Schubkolben zu schieben und somit ein mechanisches Rollement von einem Schublager zu entlasten. Die Lösung mit Verdichterabzapfgas unterliegt großen Veränderungen in der Leckage, die nicht aktiv gesteuert werden können und eine wesentliche Senkung im betrieblichen Wirkungsgrad erzeugen. Gasturbinentriebwerke können bidirektionalen Schub mit einer großen maximalen Schubkraft nach hinten, die während des stationären Betriebs erzeugt wird, und einer kleineren transienten Schubkraft nach vorne erzeugen, die während des Abschaltens erzeugt wird. Die maximale Schubkraft nach hinten, die durch ein Gasturbinentriebwerk erzeugt wird, kann das transiente Belastungsvermögen von einem mechanischen Schublager überschreiten.

[0002] US-A-5,386 166 beschreibt ein Lagersystem, das den magnetischen Schubkompensator gemäß Anspruch 1 aufweist. US-A-5,300 842 beschreibt den in Anspruch 13 definierten Steueralgorithmus, wobei Schublager verwendet sind. Diese Lagersysteme enthalten keine mechanischen Lager.

[0003] Es würde wünschenswert sein, eine gesteuerte elektromagnetische Kraft zum Senken der Belastung auf ein mechanisches Schublager zu haben, um die Lagergröße zu minimieren und seine betriebliche Lebensdauer zu verlängern, während eine minimale Leistung verbraucht und somit der betriebliche Wirkungsgrad der Maschine vergrößert wird. Die vorliegende Erfindung ist besonders brauchbar für stationäre Luft-derivative Triebwerke und auch Gasturbinen, Dampfturbinen und beispielsweise Hydrogeneratoren.

[0004] Gemäß einem ersten Aspekt der Erfindung wird ein Lagersystem gemäß Anspruch 1 bereitgestellt. Bevorzugte Ausführungsbeispiele sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

[0005] Gemäß einem zweiten Aspekt der Erfindung wird ein Lagersystem gemäß Anspruch 13 bereitgestellt.

[0006] Gemäß der Erfindung wird ein magnetischer Regler verwendet zum magnetischen Regeln und Begrenzen der axialen Belastung auf ein übliches mechanisches Schublager, indem ein parallel arbeitendes bidirektionales magnetisches Schublager und eine besondere nachgiebige Federbefestigung für das mechanische Lager verwendet wird. Dieses Ausführungsbeispiel ist zweckmäßiger, als das wesentli-

che Triebwerks-Redesign auszuführen, das notwendig sein würde, um einen magnetischen Ersatz für das mechanische Schublager zu erzeugen. Es kann die Induktivitäts-Charakteristik von einem Elektromagneten des bidirektionalen axialen magnetischen Lagers (oder einer anderen Stellungs-Abtasteinrichtung, wie beispielsweise ein Wirbelstromsensor für Spaltlängen) verwendet werden, um mechanische Lagerkraft zu folgern, während ein zweiter Elektromagnet die erforderliche elektromagnetische Kraft erzeugen kann, um eine gewünschte Schubbelastung auf das mechanische Lager beizubehalten. Die physikalische Struktur des magnetischen Lagers enthält ein integrales Hilfs- oder mechanisches Stützlager, um die Maschine im Falle einer Überbelastung oder eines Versagens einer Komponente sicher zu stoppen. Der magnetische Schubkompensator kann fehlertolerant gemacht werden sein, so daß er bei einem oder mehreren Komponentenfehlern weiterhin funktioniert.

[0007] In jedem der Steuerungs- oder Regelungs-Ausführungsbeispielen kann ein Vorspannmagnet entweder einen unidirektionalen Permanentmagneten oder einen unidirektionalen elektromagnetischen Vorspannmagneten aufweisen. Ein unidirektionaler Permanentmagnet kann eine ausreichende unidirektionale Kraft liefern, um sicherzustellen, daß die transiente bzw. flüchtige Belastungsrate auf das mechanische Lager im Falle eines Steuerfehlers nicht überschritten wird. Der Schubkompensator hält somit eine moderate konstante unidirektionale Axialkraft auf das mechanische Schublager aufrecht, um ein Schieben zu verhindern, während keine übermäßigen stationären Lagerkräfte erzeugt werden. Auf Wunsch kann der Permanentmagnet mit einer Magnetisierungswicklung hergestellt sein, die den Permanentmagneten entweder magnetisieren oder entmagnetisieren kann. Ein unidirektionaler elektromagnetischer Vorspannmagnet kann etwas weniger betriebssicher sein als der Permanentmagnet, aber der elektromagnetische Vorspannmagnet ist billiger und gestattet eine signifikante Vereinfachung in der Konstruktion und Wartung des magnetischen Lagersystems.

[0008] Die Erfindung wird nun mit weiteren Einzelheiten anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnungen beschrieben, in denen

[0009] Fig. 1 eine Seitenansicht von einem Ausführungsbeispiel von einem magnetischen Schubkompensatorsystem ist, das durch die Ansprüche nicht gedeckt ist, aber das Prinzip der involvierten Steuerung darstellt;

[0010] Fig. 2 eine Seitenansicht von einem Ausführungsbeispiel von einem magnetischen Schubkompensatorsystem gemäß der vorliegenden Erfindung

ist;

[0011] Fig. 3 eine Seitenansicht von einem Ausführungsbeispiel von einem magnetischen Schubkompensatorsystem ähnlich demjenigen von Fig. 2 ist mit dem Zusatz von einem Permanentmagneten;

[0012] Fig. 4a–4e Seitenansichten von einem magnetischen Schubkompensatorsystem unter verschiedenen Lastbedingungen sind;

[0013] Fig. 5 eine Seitenansicht von einem Ausführungsbeispiel von einem magnetischen Schubkompensatorsystem ähnlich demjenigen in Fig. 3 ist mit dem Zusatz von einer Erregerwicklung um den Permanentmagneten herum;

[0014] Fig. 6 eine Seitenansicht von einem magnetischen Schubkompensatorsystem unter einem maximalen Vorwärts-Schublastzustand ist;

[0015] Fig. 7 eine Seitenansicht von einem Ausführungsbeispiel von einem magnetischen Schubkompensatorsystem ähnlich demjenigen von Fig. 2 ist mit dem Zusatz von einem elektromagnetischen Vorspannmagneten.

[0016] Fig. 1 ist eine Seitenansicht von einem Ausführungsbeispiel von einem magnetischen Schubkompensatorsystem, das auf einer Maschinenwelle **12** (in großer Nähe zu einem mechanischen Schublager **10** – gezeigt in Fig. 2) angebracht ist und axiale magnetische Lagerrotorscheiben **1**, **2** und **3**, axiale magnetische Lagerstatorverlängerungen **4**, **5** und **6** von einem Statorrahmen **24** und dale ringförmige elektromagnetische Wicklungen **7**, **8** und **9** von einem magnetischen Axiallager aufweist.

[0017] Die Rotorscheiben können aus einem nicht-geblechten Magnetmaterial hoher Festigkeit (wie beispielsweise American Iron and Steel Institute (AISI) 4340) hergestellt sein und auf eine nicht-magnetische Hülse (nicht gezeigt) geschweißt sein, die auf die Triebwerkswelle **12** aufgepaßt ist. Jede der dualen ringförmigen elektromagnetischen Wicklungen kann in einer ringförmigen E-Kern-Elektromagnetstruktur des Stators eingebettet sein, die ein Material wie beispielsweise Silizium-Eisen aufweist.

[0018] Da jedes der drei magnetischen Axiallager seine eigene magnetische Statorverlängerung und Rotorscheibe hat, werden Fehler der einen die übrigen zwei magnetischen Axiallager nicht beeinflussen. Deshalb ist das Schublager in der Lage, die Axialkraftsteuerung mit zwei der drei verfügbaren einzelnen Lager beizubehalten, die funktionieren.

[0019] Eine zusätzliche Statorverlängerung **11** kann so konfiguriert sein, daß sie eine der Rotorscheiben in einer entgegengesetzten Richtung von den ande-

ren zwei Rotorscheiben anzieht. Die Statorverlängerung **11** kann beispielsweise mit drei kleineren eingebetteten Elektromagnet-Wicklungen **13** hergestellt sein, wobei jede dieser Wicklungen durch eine nicht-magnetische Flußsperre **11a** getrennt sind, die INCONEL™ (auf eine Marke von Inco Alloys International für eine Metallegierung, die 75% Nickel, 15% Chrom und 9% Eisen enthält) aufweisen kann und dazu dient, die magnetische Kopplung zwischen benachbarten Wicklungen zu minimieren und somit gestattet, daß fehlerfreie krafterzeugende Statormagnete in der Nähe von fehlerhaften Elektromagneten weiterhin funktionieren.

[0020] Die einzelnen Lager sind in drei Steuerachsen gruppiert, wobei jede Achse durch eine Computer-basierte Steuerung **19**, **17** bzw. **15** gesteuert wird, die elektronische Leistungsschaltvorrichtungen und einen entsprechenden digitalen Signalprozessor **25**, **23** bzw. **21** verwendet, um den Strom in den Wicklungen zu steuern, um die gewünschte Kraft zu erzeugen.

[0021] Wenn eine Rückführungsschleife (Regelung) gewünscht ist, kann jede der Steuerungen mit einer Annäherungssonde (nicht gezeigt) ausgerüstet werden, so daß jede Steuerung die relative Verschiebung von einer Rotorscheibe gegenüber der entsprechenden Statorverlängerung (d. h. eine Luftspaltlänge) messen kann. Aufgrund der sich gegenseitig ausschließenden Erregung von den zwei Wicklungen pro Steuerung zur Krafterzeugung kann alternativ jede der Steuerungen hochfrequente Prüfpulse an die unbenutzte Wicklung zu dem Zweck anlegen, die Luftspaltlänge zu abtasten.

[0022] In einer anderen Steuerungsanordnung sind die Steuerungen in Betätigungs- und Überwachungsabschnitte (nicht gezeigt) unterteilt. Die digitalen Signalprozessoren der Überwachung sind in einer dualen redundanten Konfiguration angeordnet, so daß jede Steuerung in der Lage ist, eine elektronische Leistungsumschaltung zu befehlen.

[0023] Fig. 2 ist eine Seitenansicht von einem magnetischen Kompensatorsystem gemäß der Erfindung für ein mechanisches Schublager **10**. Das mechanische Schublager ist auf der Maschinenwelle **12** in großer Nähe zu einem magnetischen Axiallager **14** angeordnet, das eine Rotorscheibe **16** des magnetischen Axiallagers, eine Statorverlängerung **18** des magnetischen Axiallagers und Ringwicklungen **20** des magnetischen Axiallagers aufweist. Magnetische Axiallager **214** und **314** (einschließlich axialer magnetischer Lagerrotorscheiben **216** und **316**, axialer magnetischer Lagerstatorverlängerungen **218** und **318** und axialer magnetischer Lager-Ringwicklungen **220** und **320**) sind optionale Lager für fehlertolerante Anwendungen, wie es nachfolgend erläutert wird.

[0024] In einem Regelungs-Ausführungsbeispiel kann der äußere Laufring **22** des mechanischen Schublagers **10** an einem Statorrahmen **24** durch eine bidirektionale Feder **26** befestigt sein, die einen gesteuerten Federungswiderstand hat. Somit ist eine direkte Relation zwischen der axialen Kraftbelastung auf das mechanische Schublager und der relativen axialen Stellung zwischen der magnetischen Lagerstatorverlängerung und der Rotorscheibe vorhanden.

[0025] Die Rotorscheibe **16** des magnetischen Axiallagers weist eine passive Rotorscheibe auf, die durch eine der zwei axialen magnetischen Lager-Ringwicklungen **20** (nachfolgend als Stator-Elektromagnete **20** bezeichnet) magnetisch angezogen wird. Einer der zwei Stator-Elektromagnete wird durch eine Leistungs-Elektronik **27** gespeist, die durch eine Steuer-Elektronik **28** in einem Schubkompensator-Steuersystem **30** gesteuert wird, um die Rotorscheibe gemäß dem Vorzeichen der gewünschten Axialkraft anzuziehen, wobei die Größe des Statorstroms gesteuert wird, um die Amplitude der Anziehungskraft auszubilden. Der nicht-gespeiste Stator-Elektromagnet steht zur Hochfrequenzprüfung zur Verfügung. Es können Prüfpulse an den nicht-gespeisten Elektromagneten angelegt werden, um die Induktivität des Stator-Elektromagneten zu messen, die eine Funktion von der Länge eines Luftspaltes **31** zwischen der Rotorscheibe und der Statorverlängerung ist. Energie kann einem Leistungswandler **30a** von einer Leistungsversorgung **33** zugeführt werden, die eine Batterie **35** und einen Batterielader **37** aufweist. Wenn gewünscht, können übliche Luftspalt-Schätztechniken, wie beispielsweise die Verwendung von Wirbelstromsensoren, anstelle der Prüfpulse verwendet werden.

[0026] Wie oben erläutert ist, werden in einem Steuerungs-Ausführungsbeispiel Modelle der Luftströmung verwendet, um den erforderlichen Fluß vorherzusagen. Das mechanische Schublager kann in einer derartigen Art und Weise angebracht sein, daß jede signifikante axiale Bewegung der Rotorscheibe verhindert wird. In diesem Ausführungsbeispiel würde der Schubkompensator nicht in der Lage sein, die Kraft auf das mechanische Lager tatsächlich zu regeln oder zu steuern. Der Schubkompensator würde seine Befehle durch die Triebwerks-Steuereinheit erhalten, um eine spezielle Kraft mit einem Wert zu erzeugen, der durch die Triebwerks-Steuereinheit auf der Basis von einem Algorithmus von einem Triebwerks-Schubmodell berechnet ist. Der magnetische Schubkompensator würde den größten Teil der erforderlichen Axialkraft erzeugen und dadurch die Kraft des mechanischen Schublagers auf sichere Werte begrenzen. Das Steuerungs-Schubkompensationsystem würde durch die Genauigkeit von dem Vorwärts-Triebwerksschub und magnetischer Kraftmodelle begrenzt, so daß eine konstante unidirektionale mechanische Lagerkraft nicht garantiert werden

könnte.

[0027] Die Oberfläche von der Magnetlager-Rotorscheibe **16** und der Statorverlängerung **18** in **Fig. 2** können auch als ein mechanisches Dämpferlager funktionieren, um eine Überbelastung des mechanischen Lagers im Falle eines Versagens des magnetischen Kompensators zu verhindern, indem die nominale Luftspaltlänge **31** kleiner als die maximale Federauslenkung gehalten wird. Um den transienten physikalischen Kontakt zu erleichtern, kann die Lagerstator-Verlängerungs/Rotorscheibenfläche selbstschmierend sein durch eine richtige Auswahl von Verschleißflächen oder durch Tränkung mit einem Schmiermittel. Alternativ können die Stator-Verlängerungs- und Rotorscheibenflächen geschmiert werden durch eine mehr übliche Technik, wie beispielsweise ein Ölnebelsystem.

[0028] Ein fehlertoleranter magnetischer Schubkompensator kann dadurch ausgebildet werden, daß drei identische parallel wirkende elektromagnetische Strukturen vorgesehen werden, die redundante Elektromagnete **20**, **220** und **320**, Kompensator-Steuersysteme **30**, **230**, **330**, Leistungs-Elektroniken **27**, **227** und **327**, Steuer-Elektroniken **28**, **228** und **328** und Leistungswandler **30a**, **230a** und **330a** enthalten, wie es in **Fig. 2** gezeigt ist. In einem Ausführungsbeispiel kann jede der drei Elektromagnetstrukturen fünfzig Prozent der erforderlichen axialen Kraft erzeugen, so daß das System nur zwei von drei verfügbaren elektromagnetischen Strukturen benötigt, um effektiv zu arbeiten.

[0029] **Fig. 3** ist eine Seitenansicht von einem Ausführungsbeispiel von einem magnetischen Schubkompensatorsystem ähnlich demjenigen von **Fig. 2** mit dem Zusatz von einem Vorspannmagneten, der als ein ringförmiger Permanentmagnet **60** gezeigt ist. Der Permanentmagnet von dem magnetischen Axiallager erzeugt eine feste Vorwärts-Vorspannkraft, während die steuerbaren Elektromagneten **78**, **79**, **80** und **82** von den magnetischen Axiallagern eine resultierende Kraft in entweder Vorwärts- oder Rückwärts-Richtungen erzeugen können. Eine elektronische Energiequelle **90** liefert Energie für die Steuer-Elektronik **88** und die Leistungs-Elektronik **86** von dem Kompensator-Steuersystem **30**.

[0030] Die axiale Scheibenauslenkung ist durch mechanische Anschläge **56** eingeschränkt. Die axiale Federkonstante von der Nachgiebigkeitsfeder **26** ist so gewählt, daß die gewünschte Belastung für das mechanische Lager auf dem halben Weg zwischen den mechanischen Anschlägen erreicht wird.

[0031] Die Rotorscheibe **66** auf der Welle **84** wird durch den Kreisring aus Permanentmagnetmaterial **60** (wie beispielsweise Samarium-Kobalt) angezogen, das für den erforderlichen Betriebstemperatur-

bereich der Maschine geeignet ist. Das Permanentmagnetmaterial ist in einer magnetischen ringförmigen Statorverlängerung **58** angeordnet und mit einer abgeschrägten Magnetkappe **64** überdeckt, die den Magnetfluß an dem Luftspalt konzentriert, um die Anziehungskraft zu maximieren. Die ringförmige Statorverlängerung weist ein nicht-geblechtes Magnetmaterial auf, wie beispielsweise Silizium-Eisen oder Kobalt-Eisen.

[0032] Das Permanentmagnetmaterial ist durch nicht-magnetische keilförmige Ringe **61** eingeschlossen, so daß das spröde Permanentmagnetmaterial nach der Magnetmontage gestützt ist. Der Permanentmagnet ist in der Größe so bemessen, daß er eine Vorwärtskraft auf die Welle erzeugt, die ausreicht, um sicherzustellen, daß die maximale flüchtige Belastungsrate von dem mechanischen Schublager in dem Fall nicht überschritten wird, daß die parallel arbeitenden Elektromagnete **78**, **79**, **80** und **82**, die so arbeiten, wie es oben in Verbindung mit **Fig. 2** erläutert wurde, nicht funktionieren.

[0033] Obwohl zwei Rotorscheiben **68** und **70** mit den Elektromagneten gezeigt sind, wird die Anzahl der Scheiben von den maximalen Kräften und dem gewünschten Grad der Fehlertoleranz abhängen. Vorzugsweise werden wenigstens zwei Rotorscheiben **68** und **70** verwendet, obwohl bei gewissen Anwendungen eine Rotorscheibe ausreichend sein kann. Wenn zwei derartige Rotorscheiben verwendet werden, ist eine Gesamtzahl von wenigstens vier Statorverlängerungen **58**, **72**, **74** und **82** vorhanden. Wie durch das Statorsegment **74** gezeigt ist, kann, auf Wunsch, ein einzelnes Statorsegment Elektromagnete für zwei Rotorscheiben tragen, die auf gegenüberliegenden Seiten von diesem Statorsegment angeordnet sind.

[0034] In dem in **Fig. 3** gezeigten Ausführungsbeispiel ist zu Darstellungszwecken jeder der Elektromagnete **78**, **79**, **80** und **82** eine Doppelringwicklung. Eine einzelne Ringwicklung, wie sie in **Fig. 2** gezeigt ist, kann ebenfalls verwendet werden. In ähnlicher Weise können die Doppelringwicklungen gemäß den **Fig. 1** und **3** auch in dem Ausführungsbeispiel gemäß **Fig. 2** verwendet werden.

[0035] **Fig. 4a–4e** sind Seitenansichten von einem magnetischen Schubkompensatorsystem unter verschiedenen Lastbedingungen. Die Beschreibungen der **Fig. 4a–4e** sind allgemein anwendbar auf die Operationen von jeweils den **Fig. 3**, **5** und **7**. Deshalb ist eine Vorspannmagnetverlängerung **59** verwendet, ohne daß der Permanentmagnet explizit in der Weise gezeigt ist, in der der Permanentmagnet in **Fig. 3** gezeigt ist.

[0036] **Fig. 4a** stellt das Kompensatorsystem bei einer ersten Leistungszufuhr in der Ausgangs- oder

Parkstellung dar. Die Stärke des Permanentmagneten drückt die mechanische Scheibenfeder gegen den vorderen Anschlag **56** mit der vollen Magnetkraft in der B Richtung, die entgegengesetzt zu der Kraft in der A Richtung in dem mechanischen Lager ist. Da der Permanentmagnet das System in eine bekannte feste Stellung drückt, kann die Steuer-Elektronik die Richtigkeit der Luftspalt-Berechnungen von allen vier verfügbaren Elektromagneten **78**, **79**, **80** und **82** verifizieren.

[0037] **Fig. 4b** stellt das Kompensatorsystem in der Triebwerksstartstellung unter Bedingungen dar, wo die zwei elektromagnetischen Axiallager Kräfte in einer Richtung erzeugen, die durch Pfeile E, F dargestellt sind, und die entgegengesetzt zu derjenigen der Kräfte C und D auf das mechanische Lager und die Rotorscheibe **66** neben dem Permanentmagneten ist. Das mechanische Schublager lenkt deshalb in der Rückwärts-Richtung aus.

[0038] Die Steuer-Elektronik (gezeigt als Steuer-Elektronik **88** in **Fig. 3**) kann die Steifigkeit der nachgiebigen Scheibenstruktur und die Stärke des Permanentmagneten messen und verifizieren, wobei ein elektromagnetisches Modell von einem steuerbaren Axiallager verwendet wird, das sowohl Kraft als auch Luftspaltlänge zwischen einer Statorverlängerung und einer Rotorscheibe aus den Magnetanschlußgrößen von Spannung und Strom berechnet. Wenn die magnetische Schubkompensation aktiv ist, wird sie versuchen, das mechanische Schublager an dieser Position unabhängig von den Triebwerkschub-Bedingungen zu halten und dadurch die gewünschte moderate Lagerbelastung zu erzielen.

[0039] **Fig. 4c** stellt den Betrieb des Kompensatorsystems bei maximalem Rückwärts-Triebwerkschub in der durch den Pfeil K gezeigten Richtung dar. Um die gewünschte axiale Stellung des Schublagers beizubehalten, erzeugt die Steuerung eine Vorwärtskraft in jedem der zwei elektromagnetischen Axiallager in einer Richtung, die durch Pfeile I und J dargestellt ist, in der gleichen Richtung, wie die Kräfte G und H auf das mechanische Lager und die Rotorscheibe **66**. Während des stationären Betriebs prüft die Steuerung kontinuierlich die Wahrheit von seiner gefolgerten axialen Stellungs-Rückführung und des fortgesetzten Betriebs der nachgiebigen Scheibenstruktur, indem die gewünschte axiale Stellung von dem mechanischen Schublager gestört wird. Die zyklische Störung gestattet der Steuerung, eine effektive Steifigkeit für die Federbefestigung zu berechnen, und somit kontinuierlich den Betrieb von dem Kompensatorsystem selbst zu prüfen.

[0040] **Fig. 4d** stellt den Betrieb des Kompensatorsystems mit einem maximalen Vorwärtsschub des Triebwerkes in der M Richtung dar, der erfordert, daß jedes der steuerbaren Axiallager transient eine Rück-

wärtskraft erzeugt, die durch Pfeile O und P dargestellt ist, in einer entgegengesetzten Richtung zu den Vorwärtsskräften auf das mechanische Schublager und die Rotorscheibe **66**, die durch Pfeile L bzw. N dargestellt sind.

[0041] Fig. 4e stellt das Kompensatorsystem in dem Fall eines totalen Ausfalles der steuerbaren Elektromagnete dar, wobei das Triebwerk einen maximalen Rückwärtsschub erzeugt, der durch den Pfeil S dargestellt ist, in einer entgegengesetzten Richtung zu der Kraft des mechanischen Schublagers (dargestellt durch den Pfeil Q). Die axiale Auslenkung von dem mechanischen Schublager ist durch den hinteren Anschlag **56** bei der maximalen eine Auslenkung erzeugenden Kraft in der nachgiebigen Scheibenstruktur begrenzt, wie es durch den Pfeil R dargestellt ist.

[0042] Fig. 5 ist eine Seitenansicht von einem Ausführungsbeispiel von einem magnetischen Schubkompensatorsystem ähnlich demjenigen von Fig. 3, wobei ein Permanentmagnet **112** eine Wicklung **114** hat, die den Permanentmagneten magnetisieren und entmagnetisieren kann.

[0043] Das Permanentmagnetmaterial **112** weist ein Material auf, das für den Betriebstemperaturbereich geeignet ist. In einem Ausführungsbeispiel ist Aluminium-Nickel-Kobalt-Permanentmagnetmaterial für einen Temperaturbereich von bis zu und einschließlich 200°C verwendet. Das Permanentmagnetmaterial wird in einer magnetischen Statorverlängerung angeordnet und mit einer abgeschrägten magnetischen Kappe **116** überdeckt, die den Magnetfluß an dem Luftspalt konzentriert, um die Anziehungskraft zu maximieren. Die Statorverlängerung **58** weist ein nicht-geblechtes Magnetmaterial auf, wie beispielsweise Silizium-Eisen oder Kobalt-Eisen.

[0044] Die Struktur von dem Permanentmagneten gemäß Fig. 5 unterscheidet sich von derjenigen gemäß Fig. 3 dahingehend, daß der Kreisring aus Permanentmagnetmaterial von einer Erregerwicklung **114** umschlossen ist, die in der Lage ist, ausreichende Ampere-Windungen zu erzeugen, um das Permanentmagnetmaterial entweder zu magnetisieren oder zu entmagnetisieren. Um das Material vollständig zu entmagnetisieren, muß ein gesteuerter Wechselstrom mit abnehmender Amplitude in der Erregerwicklung erzeugt werden, der eine B-H Magnetisierungskurvenbahn erzeugt, die zum Entmagnetisieren des Materials erforderlichen ist.

[0045] Das Kompensator-Steuersystem **30** gemäß Fig. 5 kann ähnlich demjenigen sein, das bezüglich der Fig. 2 und 3 erläutert wurde, mit einer Leistungselektronik **86**, einer Steuerelektronik **88**, einem digitalen Signalprozessor (DSP) **96** und einem DC/DC Leistungswandler **98** und mit dem Zusatz von einem

Magnetisierungs/Entmagnetisierungs-Steuerblock **110**, der Befehle an die Leistungselektronik **87** für den Permanentmagneten **112** und die Erregerwicklung **114** liefert.

[0046] Die Ansichten und die Erläuterung der Fig. 4a–4e sind ähnlich für den Permanentmagneten mit einer Erregerwicklung. Fig. 6 stellt den Kompensator gemäß Fig. 5 für den Fall eines totalen Versagens der steuerbaren Elektromagnete dar, wobei das Triebwerk einen maximalen Vorwärtsschub erzeugt, der durch den Pfeil U dargestellt ist. Vorwärtsschub wird durch das Triebwerk erzeugt, wenn der Brennstoff schnell ausgeschaltet wird, wie beispielsweise bei einer Notabschaltung. Um eine transiente Überbelastung des mechanischen Schublagers unter derartigen Bedingungen zu verhindern, wird die Steuereinheit des Triebwerkes den Befehl zum Abschalten des Permanentmagneten geben, wodurch bewirkt wird, daß der Strom (und die Kräfte in den Richtungen der Pfeile T und V) abklingt. Die Triebwerks-Steuereinheit kann eine teilweise Entmagnetisierung von dem Permanentmagneten bewirken, indem ein Spannungspuls fester Breite ausgelöst wird, der entlang der B-H Magnetisierungskurvenbahn wirksam ist, um für einen irreversiblen Magnetisierungsverlust und eine Verringerung des Kraftvermögens des Permanentmagneten zu sorgen.

[0047] Fig. 7 ist eine Seitenansicht von einem Ausführungsbeispiel von einem magnetischen Schubkompensatorsystem ähnlich demjenigen von Fig. 2 mit dem Zusatz von einer ringförmigen Vorspann-Elektromagnetwicklung **92** (nachfolgend als ein elektromagnetischer Vorspannmagnet bezeichnet). Der Schubkompensator hat somit sowohl einen elektromagnetischen Vorspannmagneten, der eine feste Vorwärts-Vorspannkraft erzeugt, während die steuerbaren Elektromagneten **78**, **79**, **80** und **82** der magnetischen Axiallager eine resultierende Kraft in entweder Vorwärts- oder Rückwärts-Richtungen erzeugen können. Wie oben in Bezug auf den Permanentmagneten erläutert ist, kann, obwohl vorzugsweise wenigstens zwei Rotoren **68** und **70** auf beiden Seiten durch steuerbare Elektromagnete **78**, **79**, **80** und **82** gesteuert werden, ein einzelner derartiger Rotor in gewissen Anwendungsfällen ausreichend sein.

[0048] Der elektromagnetische Vorspannmagnet ist in der Größe bemessen, um eine feste sichere Vorwärtskraft auf die Welle **84** zu erzeugen, die ausreichend ist, um sicherzustellen, daß die maximale transiente Belastungsrate des mechanischen Schublagers **10** nicht überschritten wird, falls die parallel arbeitenden steuerbaren Elektromagnete nicht funktionieren. Der elektromagnetische Vorspannmagnet kann einen einfachen, ungesteuerten Elektromagneten aufweisen, der entweder aus einer konstanten, sicheren Spannungsquelle, wie beispielsweise einem unabhängigen Batteriesystem (nicht gezeigt) oder

aus einem Batteriesystem (gezeigt als eine Energieversorgung **90**) gespeist wird, das auch Energie für die steuerbaren Ringwicklungen des Elektromagneten liefert. Da ungesteuerte, elektromagnetische Vorspannmagnete recht betriebssicher sind, unterliegend sie nicht den üblichen Fehlerarten von gesteuerten Elektromagneten, wie beispielsweise kurzgeschlossenen elektronischen Leistungsschaltern und Fehlern von Steuercomputern. Die DSP Steuerung **96** des magnetischen Schubkompensators kann den Stromfluß in den elektromagnetischen Vorspannmagneten hinein überwachen und somit auf einfache Weise die unterschiedlichen möglichen Wicklungsfehler detektieren (d. h. Erdfehler, kurzgeschlossene Windungen, offene Verbindungsglieder, usw.) und sie leitet eine gesteuerte Abschaltung im Falle eines Versagens des elektromagnetischen Vorspannmagneten ein.

[0049] Der elektromagnetische Vorspannmagnet wird über zwei parallel arbeitende Festkörper-Relais **100** und **102** gespeist, wobei einer Befehle von dem Steuersystem **30** des magnetischen Schubkompensators und der zweite Befehle von der Triebwerkssteuerung (nicht gezeigt) erhält. Um den elektromagnetischen Vorspannmagneten zu entriegeln, nachdem das Triebwerk abgeschaltet ist, müssen beide Steuerungen zusammenarbeiten.

[0050] Wenn das Kompensator-Steuersystem **30** aus einer Energiequelle **90** gespeist wird, die ein Batteriesystem aufweist, kann der gesamte vorgespannte magnetische Schubkompensator bei transienten Ausfällen der Wechselspannung weiterhin arbeiten, ohne die Steuerung der axialen Kraft zu verlieren. Wenn Wechselspannungsausfälle unwahrscheinlich sind, kann die Batterieunterstützung auf den elektromagnetischen Vorspannmagneten beschränkt sein und trotzdem für eine sichere Abschaltung in dem unwahrscheinlichen Fall eines Wechselspannungsausfalles sorgen. Wenn ein duales Batteriesystem verwendet wird, ist die kosteneffektivste Batterietechnologie die gekapselten wartungsfreien Blei-Säure-Batterien, die für Computer- und Telefon-Unterstützungs-Spannungssysteme in breitem Umfang verwendet werden. Weil derartige Batterien sowohl plötzliche Ausfallmechanismen als auch natürliche Verschleißmechanismen haben, wird die Betriebssicherheit vergrößert, wenn ein duales Batterieladesystem verwendet wird. Nickel-Kadmium-Batterien sind von Natur aus betriebssicherer, haben nicht die Verschleißmechanismen von Blei-Säure-Batterien und können verwendet werden, wo eine übliche Batterie **106** und ein Lader **108** sowohl den elektromagnetischen Vorspannmagneten als auch die steuerbaren Elektromagnete speisen, wie es in **Fig. 7** gezeigt ist. Nickel-Kadmium-Batterien sind teurer als Blei-Säure-Batterien und benötigen eine periodische Elektrolyt-Wartung. Es sind verschiedene Abwandlungen von redundanten Batterien und Ladern mög-

lich, und das bevorzugte Design wird von den Sicherheitsanforderungen des gesamten Systems abhängen.

[0051] Wie in Bezug auf **Fig. 3** beschrieben ist, ist die axiale Scheibenauslenkung durch mechanische Anschläge **56** begrenzt. Die axiale Federkonstante der Nachgiebigkeitsfeder **26** ist so gewählt, daß die große Belastung für das mechanische Lager auf dem halben Wege zwischen den mechanischen Anschlägen erreicht wird.

[0052] Die Rotorscheibe **66** kann durch eine ringförmige „E“-Kern-Statorverlängerung **58** aus Magnetmaterial, wie beispielsweise Silizium-Eisen oder Kobalt-Eisen, angezogen werden, das für den erforderlichen Betriebstemperaturbereich der Maschine geeignet ist. Der elektromagnetische Vorspannmagnet ist in der Größe für einen spezifischen verteilten Widerstand bemessen, so daß, wenn er durch eine Konstantspannungsquelle erregt wird, ein gewünschter nominaler Wicklungsstrom erreicht wird. Dieser Erregungspegel des Wicklungsstroms unterliegt somit der Veränderbarkeit aufgrund von temperaturabhängigen Wicklungswiderstandsänderungen und Spannungsquellenänderungen, die Änderungen in der axialen Kraft erzeugen, die von dem elektromagnetischen Vorspannmagneten erzeugt wird. Die Anziehungskraft, die durch den elektromagnetischen Vorspannmagneten erzeugt wird, wird auch durch Luftspaltänderungen bei einer axialen Rotorscheibenbewegung beeinflusst, die aus Streuflußanstiegen bei größeren Luftspalten und der daraus resultierenden Verringerung der Rotorflußdichte resultieren. Diese Kraftänderungen können minimiert werden durch „Übererregung“ des elektromagnetischen Vorspannmagneten mit ausreichenden Ampere-Windungen, um den Magnetflußpfad tief in Sättigung zu treiben. Wenn beispielsweise ein Silizium-Eisen-Statormaterial letztendlich auf eine 2,0 T Flußdichte begrenzt ist, würden die steuerbaren Elektromagnete üblicherweise ausgelegt sein, um eine Nennkraft bei einer 1,8 T Flußdichte zu erzeugen, während der elektromagnetische Vorspannmagnet bis 1,95 T getrieben wird. Die erhöhte Flußdichte hat 17,3% mehr Kraft zur Folge, die durch den elektromagnetischen Vorspannmagneten erzeugt wird, im Vergleich zu äquivalent bemessenen steuerbaren Elektromagneten mit einer gewissen Senkung im Wirkungsgrad aufgrund relativ höherer i^2R Verluste, aber weniger Wirbelstromverlusten.

[0053] Die Ansichten und die Erläuterungen von **Fig. 4a–4e** und **Fig. 6** sind ähnlich für den elektromagnetischen Vorspannmagneten. Bezüglich **Fig. 6** bewirkt eine Abschaltung, daß der Vorspannstrom exponentiell abfällt mit seiner natürlichen L/R Zeitkonstanten. Da Kraft grob proportional zu i^2 ist, wird die Kraft mit einer größeren Geschwindigkeit abklingen.

[0054] Es sind hier zwar nur gewisse bevorzugte Merkmale der Erfindung dargestellt und beschrieben worden, aber für den Fachmann ergeben sich innerhalb des Schutzzumfangs der beigefügten Ansprüche viele Abwandlungen und Änderungen.

Patentansprüche

1. Lagersystem enthaltend:

(a) ein mechanisches Schublager enthaltend eine Rotorwelle (**12**),
ein mechanisches Lager, das die Rotorwelle (**12**) trägt, wobei das mechanische Lager einen äusseren Laufring (**22**) aufweist, der mechanisch mit einem Rahmen (**24**) von einem Stator durch eine nachgiebige Federbefestigung verbunden ist, die mit dem äusseren Laufring (**22**) verbunden ist und erste und zweite Federn (**26**) aufweist, die auf entsprechende Weise zwischen dem äusseren Laufring und ersten und zweiten mechanischen Anschlüssen (**56**) angeordnet sind, die an dem Rahmen (**24**) des Stators befestigt und auf gegenüber liegenden Seiten des äusseren Laufringes angeordnet sind, wobei jede der ersten und zweiten Federn (**26**) eine axiale Federkonstante hat, die so gewählt ist, daß eine gewünschte Last für das mechanische Schublager etwa in der Mitte zwischen den zwei mechanischen Anschlüssen (**56**) aufgebracht wird,
(b) einen magnetischen Schubkompensator für das mechanische Schublager, wobei der magnetische Schubkompensator enthält:
wenigstens zwei parallele Statorverlängerungen (**18**),
eine Rotorscheibe (**16**), die auf der Rotorwelle (**12**) zwischen den wenigstens zwei Statorverlängerungen angeordnet ist, wobei ein maximaler Abstand zwischen der Rotorscheibe (**16**) und einer der wenigstens zwei Statorverlängerungen kleiner ist als eine maximale Auslenkungsstrecke von der Feder, erste und zweite Elektromagnete (**20**), wobei jeder Elektromagnet auf einer entsprechenden der wenigstens zwei Statorverlängerungen angeordnet und auf die Rotorscheibe (**16**) gerichtet ist, und
eine Steuereinrichtung (**30**) zum selektiven Erregen der ersten und zweiten Elektromagnete (**20**) zum Erzeugen einer gewünschten Kraft, um eine unerwünschte axiale Belastung auf das mechanische Schublager zu verringern.

2. Schublager nach Anspruch 1, wobei der Stator wenigstens vier Statorverlängerungen (**218**, **318**) aufweist und ferner enthält:
zwei zusätzliche Rotorscheiben (**216**, **316**), wobei jede zusätzliche Rotorscheibe zwi angeordnet ist, und
zwei zusätzliche Paare (**220**, **230**) von ersten und zweiten Elektromagneten, wobei jeder Elektromagnet von einem entsprechenden zusätzlichen Paar auf einer entsprechenden der wenigstens vier Statorverlängerungen (**218**, **318**) angeordnet und auf eine ent-

sprechende der zwei zusätzlichen Rotorscheiben (**216**, **316**) gerichtet ist, wobei die Steuereinrichtung (**30**, **230**, **330**) eingerichtet ist zum Steuern des Stroms in den zwei zusätzlichen Paaren (**220**, **320**) der ersten und zweiten Elektromagnete.

3. Schublager nach Anspruch 1 oder 2, wobei jeder Elektromagnet eine doppelte Ringwicklung aufweist.

4. Schublager nach Anspruch 1, 2 oder 3, wobei die Steuereinrichtung ferner eingerichtet ist zum Abschätzen der Strecke von einem Luftspalt zwischen der Rotorscheibe und einer der wenigstens zwei Statorverlängerungen.

5. Schublager nach einem der vorstehenden Ansprüche, ferner enthaltend:
eine zusätzliche Statorverlängerung (**58**), wobei die zusätzliche Statorverlängerung parallel zu den wenigstens zwei Statorverlängerungen angeordnet ist, eine zusätzliche Rotorwelle (**66**) und einen Vorspannmagneten (**60**), der auf der zusätzlichen Statorverlängerung (**58**) angeordnet und auf die zusätzliche Rotorscheibe (**66**) gerichtet ist zum Empfangen eines Stroms, der durch die Steuereinrichtung (**30**, **230**, **330**) selektiv gesteuert wird, wobei die Steuereinrichtung zum selektiven Zuführen von Strom zum Vorspannmagneten (**60**) eingerichtet ist.

6. Schublager nach Anspruch 5, ferner enthaltend:
eine zweite zusätzliche Statorverlängerung (**76**), eine zweite zusätzliche Rotorscheibe (**70**), wobei die zweite zusätzliche Rotorscheibe (**70**) zwischen einer der wenigstens zwei Statorverlängerungen und der zweiten zusätzlichen Statorverlängerung (**76**) angeordnet ist, und
erste und zweite zusätzliche Elektromagnete (**80**, **82**), wobei jeder zusätzliche Elektromagnet auf die zweite zusätzliche Rotorscheibe (**70**) gerichtet ist, wobei die Steuereinrichtung (**30**, **230**, **330**) zur Steuerung des Stroms in den ersten und zweiten zusätzlichen Elektromagneten (**80**, **82**) eingerichtet ist.

7. Schublager nach Anspruch 5, wobei der Vorspannmagnet einen Permanentmagneten (**112**) aufweist.

8. Schublager nach Anspruch 7, wobei ferner eine abgeschrägte magnetische Kappe, die den Permanentmagneten überdeckt, und nichtmagnetische keilförmige Ringe vorgesehen sind zum Halten des Permanentmagneten in der zusätzlichen Statorverlängerung.

9. Schublager nach Anspruch 7 oder 8, wobei die Steuereinrichtung (**30**) ferner eingerichtet ist zum Feststellen der Stärke des Permanentmagneten des

mechanischen Schublagers durch Schätzen der Magnetkraft unter Verwendung von Spannungs- und Strommessungen der ersten und zweiten Elektromagneten (20).

10. Schublager nach Anspruch 7, 8 oder 9, wobei ferner um den Permanentmagneten herum eine Erregerwicklung (114) vorgesehen ist, die den Permanentmagneten magnetisieren und entmagnetisieren kann.

11. Schublager nach Anspruch 5, wobei der Vorspannmagnet (66) einen elektromagnetischen Vorspannmagneten aufweist.

12. Schublager nach Anspruch 1, wobei der Vorspannmagnet (12) eine doppelte Ringwicklung aufweist.

13. Lagersystem enthaltend:

(a) ein mechanisches Schublager enthaltend eine Rotorwelle (12), ein mechanisches Lager, das die Rotorwelle (12) trägt, wobei das mechanische Lager einen äusseren Laufring (22) aufweist, der mechanisch mit einem Rahmen (24) von einem Stator durch eine nachgiebige Federbefestigung verbunden ist, die mit dem äusseren Laufring (22) verbunden ist und erste und zweite Federn (26) aufweist, die auf entsprechende Weise zwischen dem äusseren Laufring und ersten und zweiten mechanischen Anschlägen (56) angeordnet sind, die an dem Rahmen (24) des Stators befestigt und auf gegenüber liegenden Seiten des äusseren Laufringes angeordnet sind, wobei jede der ersten und zweiten Federn (26) eine axiale Federkonstante hat, die so gewählt ist, daß eine gewünschte Last für das mechanische Schublager etwa in der Mitte zwischen den zwei mechanischen Anschlägen (56) aufgebracht wird,

(b) einen magnetischen Schubkompensator für das mechanische Schublager (10) enthaltend:

ein parallel arbeitendes axiales magnetisches Lager enthaltend wenigstens drei parallele Statorverlängerungen (58, 72, 74) auf dem Stator (24), wenigstens zwei Rotorscheiben (66, 68), die jeweils auf der Welle zwischen zwei entsprechenden der wenigstens drei Statorverlängerungen angeordnet sind, wobei ein maximaler Abstand zwischen jeder Rotorscheibe und jeweils zwei entsprechenden der wenigstens drei Statorverlängerungen kleiner ist als eine maximale Auslenkungsstrecke von einer Feder der nachgiebigen Federhalterung, erste und zweite Elektromagnete (20), wobei jeder Elektromagnet auf einer entsprechenden von zwei benachbarten der wenigstens drei Statorverlängerungen angeordnet und auf eine erste der wenigstens zwei Rotorscheiben (66, 68) gerichtet ist, und einen Vorspannmagneten (60), der auf einer anderen der wenigstens drei Statorverlängerungen angeordnet und auf eine zweite der wenigstens zwei Rotorschei-

ben gerichtet ist, wobei der Vorspannmagnet einen Strom empfangen kann, und eine Steuereinrichtung (30) zum selektiven Zuführen von Strom zu dem Vorspannmagneten und selektiven Erregen von einem ersten der ersten und zweiten Elektromagnete (20) zum Erzeugen einer gewünschten Kraft, um eine Belastung auf das mechanische Schublager zu verringern und einen Strom von einem zweiten der ersten und zweiten Elektromagnete (20) zu verwenden, um die elektromagnetische Reluktanz von einem Luftspalt zwischen einem ersten der wenigstens zwei Rotorscheiben (66, 68) und einer der wenigstens zwei benachbarten der wenigstens drei Statorverlängerungen zu schätzen.

Es folgen 8 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

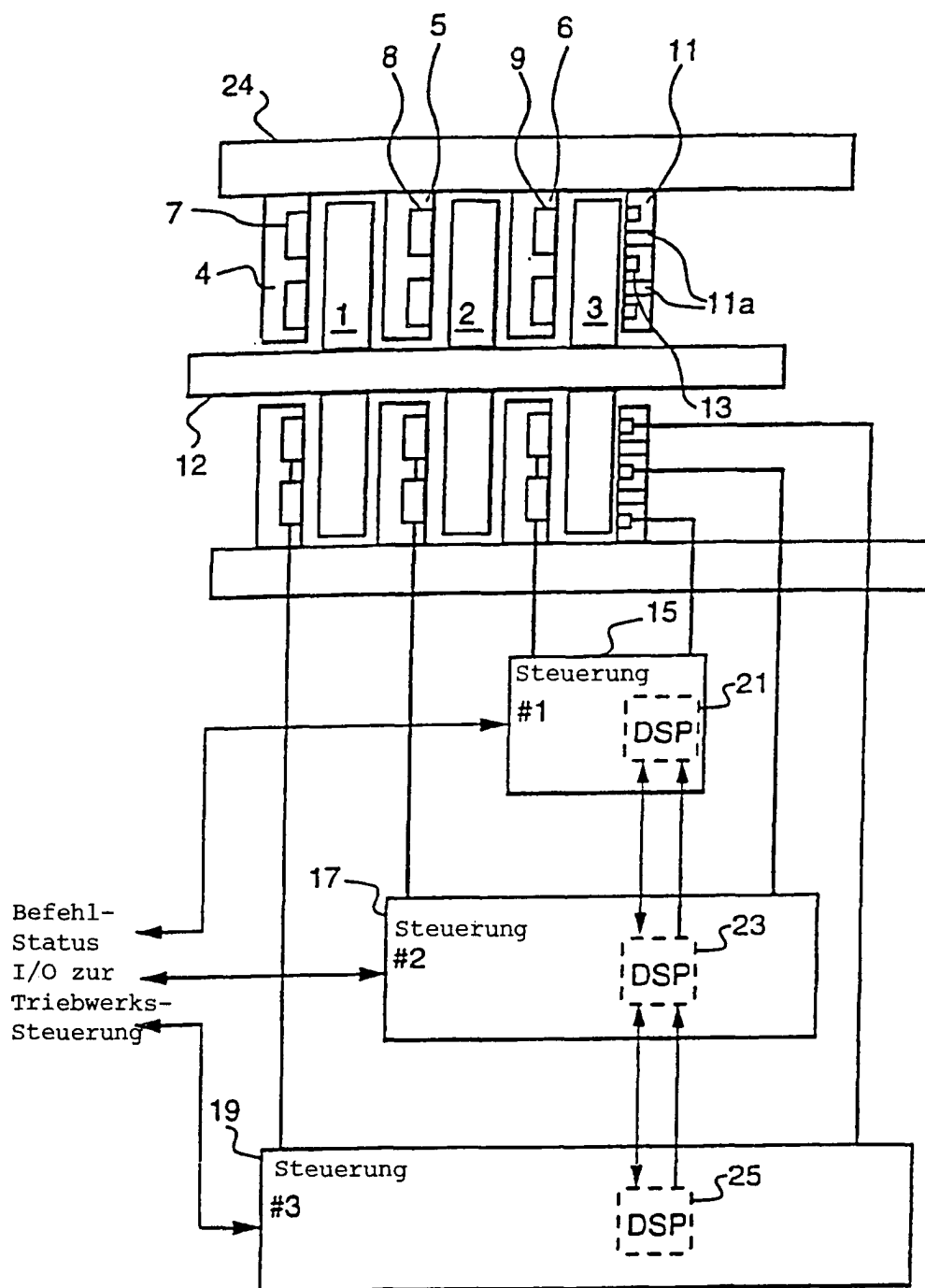


FIG. 1

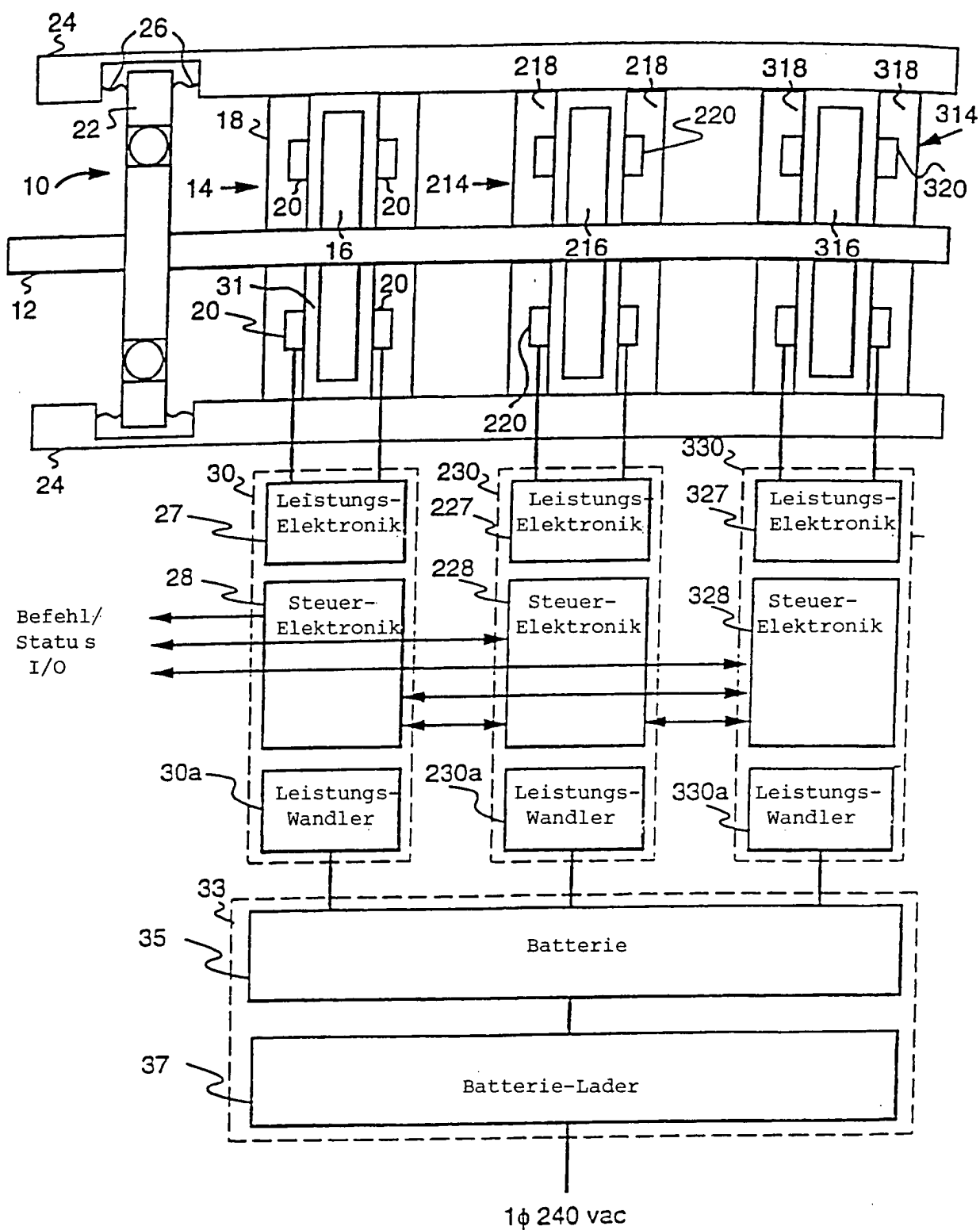


FIG. 2

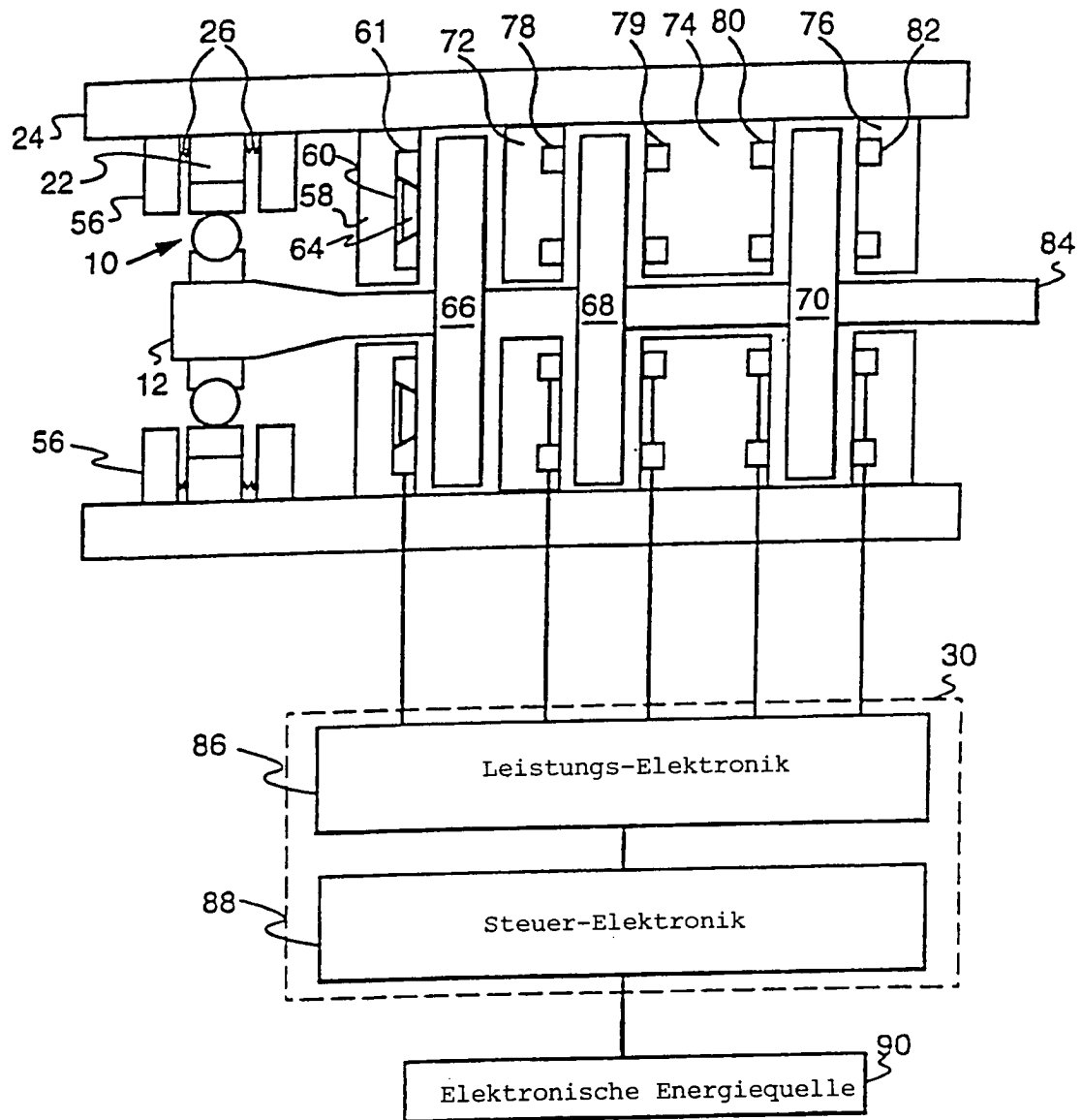


FIG. 3

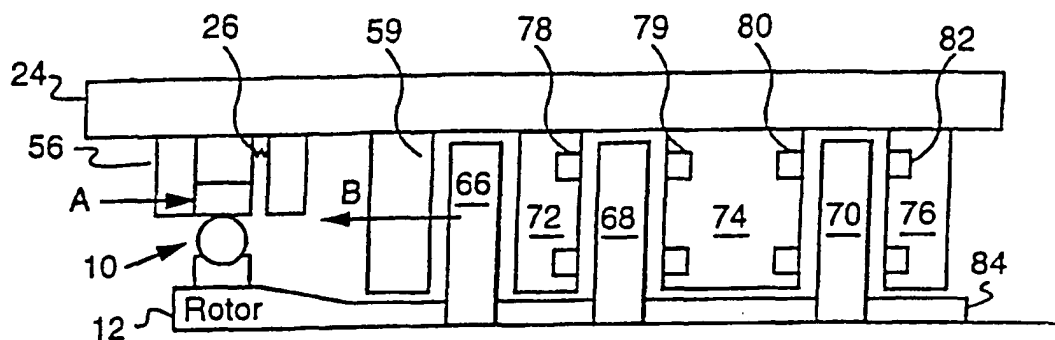


FIG. 4a

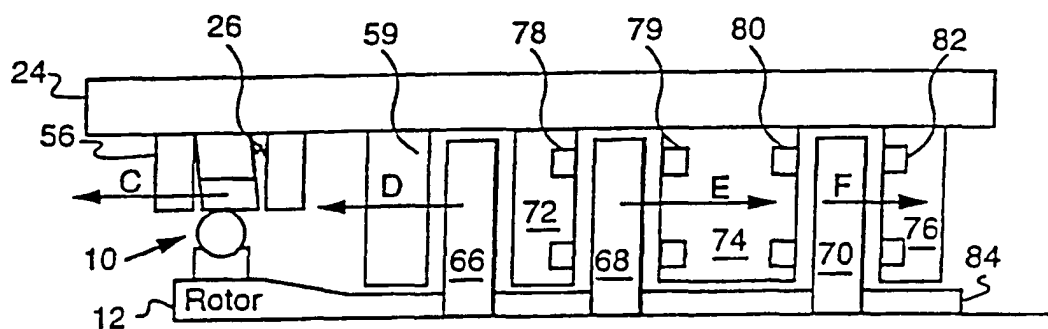


FIG. 4b

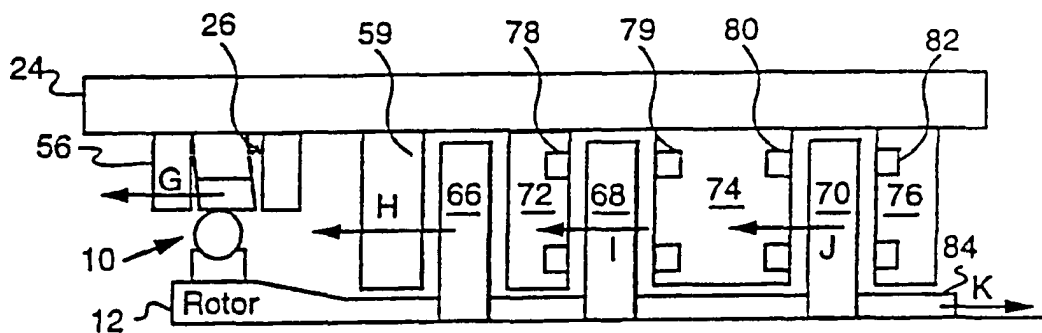


FIG. 4c

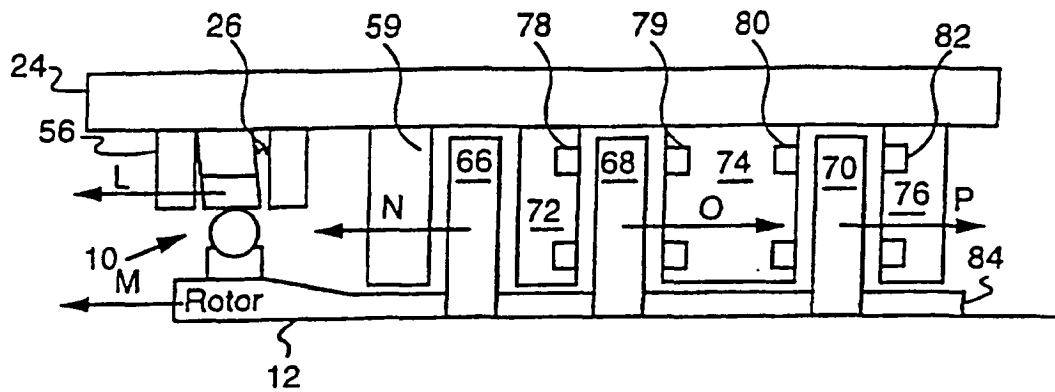


FIG. 4d

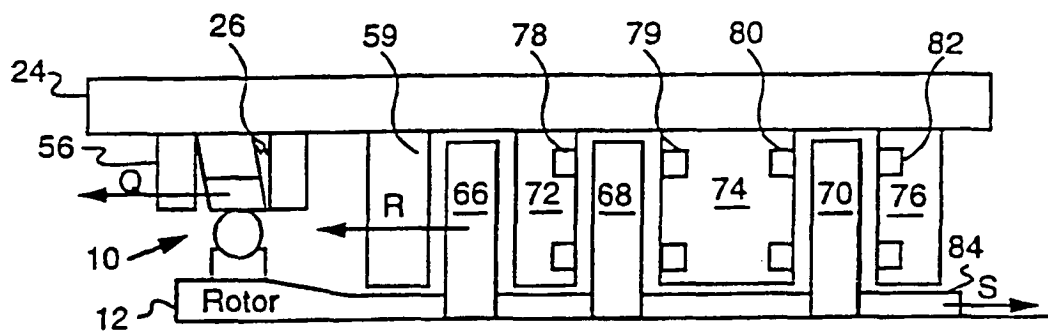
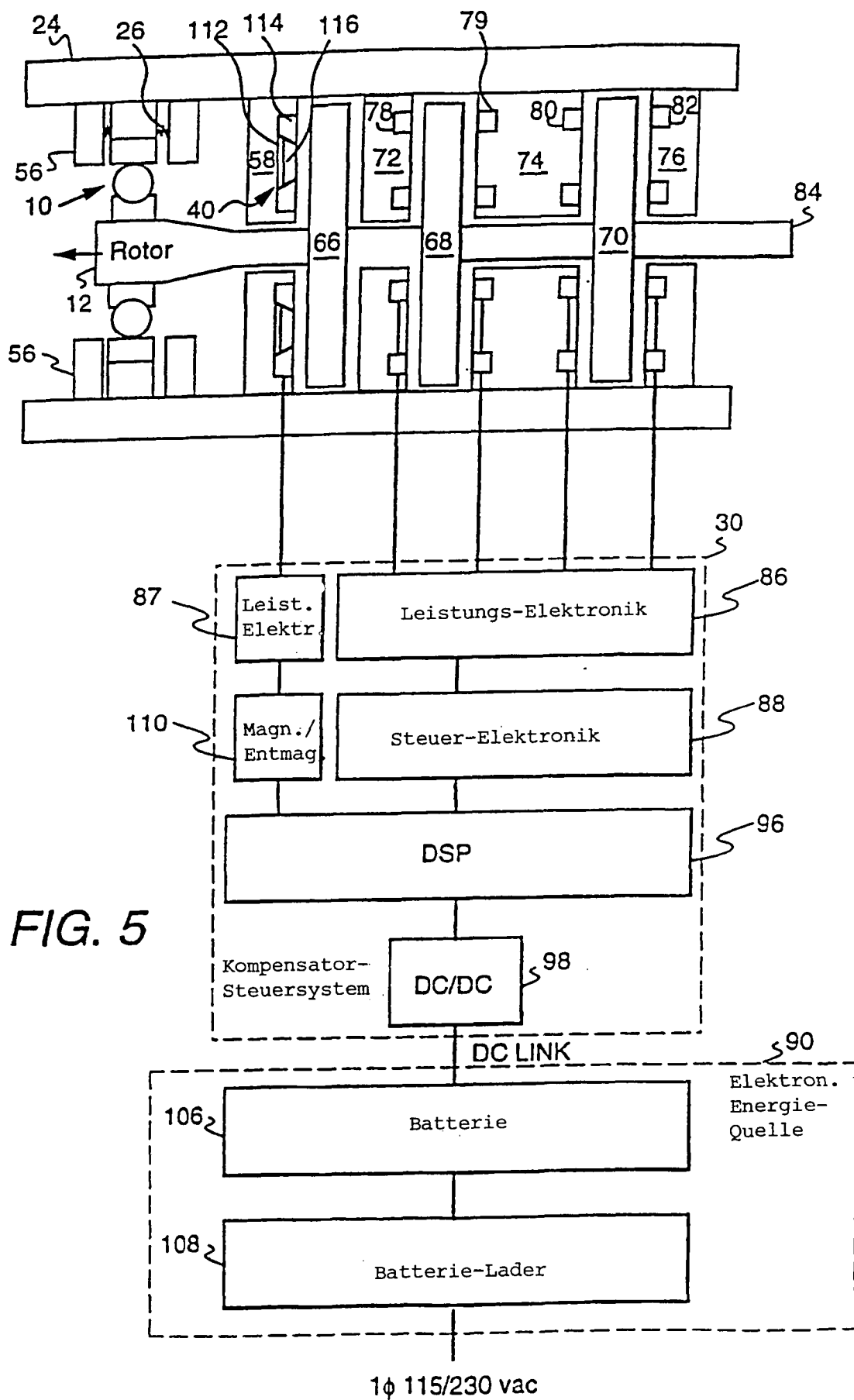


FIG. 4e



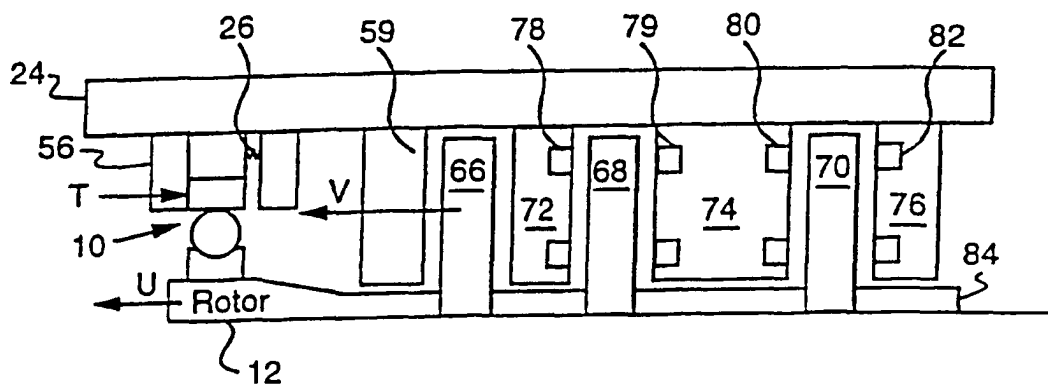


FIG. 6

