



(10) **DE 10 2010 021 477 A1** 2011.12.01

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2010 021 477.9**

(22) Anmeldetag: **25.05.2010**

(43) Offenlegungstag: **01.12.2011**

(51) Int Cl.: **H02K 21/02 (2006.01)**  
**H02K 41/03 (2006.01)**

(71) Anmelder:

**Weh, Herbert, 87534, Oberstaufen, DE**

(72) Erfinder:

**Weh, Herbert, Prof. Dr. Ing. Dr.H.c., 87534,  
Oberstaufen, DE; May, Hardo, 38124,  
Braunschweig, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

**DE 10 2008 022143 B3**

**DE 10 2009 025342 A1**

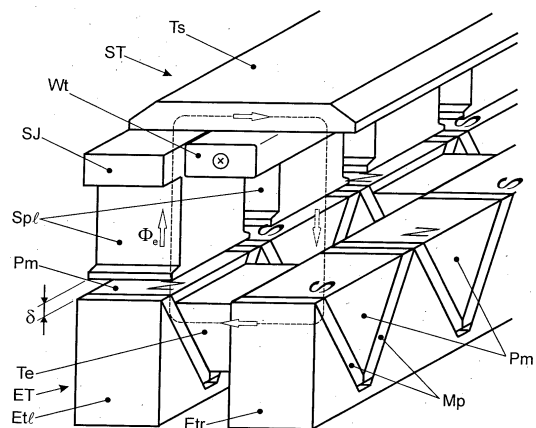
**DE 10 2009 025337 A1**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

(54) Bezeichnung: **Permanentmagneterregte Synchronmaschine mit stellbarer Spannung und/oder stellbaren Normalkräften**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine für lineare und rotatorische Anwendung geeignete Magnetkreiscombination aus zwei permanentmagneterregten Maschinenteilen in Sammleranordnung und einem Maschinenteil mit Gleich- und Wechselstrom führenden Spulen, wobei Feldübergänge in Querrichtung die Erzeugung magnetischer Zusatzfelder durch die Gleichstromwicklung ermöglichen, ohne dass hierfür magnetische Widerstände der Permanentmagnete wirksam sind.



**Beschreibung**

## Stand der Technik

**[0001]** Die Anwendung permanentmagneterregter Synchronmaschinen ist vorteilhaft im Hinblick auf geringe Verluste und hohe Kraftdichte. Insbesondere Magnetanordnungen in Sammlerform, z. B. mit V-förmigen Magnetpaaren zeichnen sich durch deutlich höhere Kraftdichte als bei Flachmagnetanordnungen aus. Ihre aktive Masse bei gegebener Umfangskraft ist deutlich niedriger. Zu den oft angeführten Nachteilen permanentmagneterregter Maschinen gehört ihr verhältnismäßig hoher Aufwand zur Stellbarkeit der Spannung oder gar der Beeinflussung der Normalkräfte. Die dabei meist eingesetzte Wirkung einer elektrischen Zusatzwicklung im Erregerteil ist deshalb mit hohem Aufwand verbunden, weil große Stelldurchflutungen benötigt werden, und das magnetische Zusatzfeld über den magnetischen Widerstand der Permanentmagnete hinweg erzeugt werden muss. Darüber hinaus ist es auch deshalb für die elektronischen Stellglieder aufwendig, weil die zu stellenden Ströme in zwei Richtungen bei großer Stelleistung zu beherrschen sind. Auch in der Transporttechnik konnte sich so bislang der Tragmagnet mit Erregung durch Permanentmagnete und Zusatzwicklung nicht durchsetzen. Da es misslich ist, auf die Vorteile der Permanentmagnete zu verzichten, gibt es Lösungsansätze, die auf der Anwendung von Flusssperren mit Hilfe von Sättigungsstrecken innerhalb des Erregerkreises beruhen. Damit lässt sich mit kleinerem Magnetisierungs- und Strombedarf eine Feldbeeinflussung vornehmen. Es muss dabei jedoch darauf verzichtet werden, die Stellwirkung auch zur Flussvergrößerung ausüben zu können. Prinzipbedingt eignet sich das Verfahren somit zur Flussschwächung, wie zum Beispiel auch für die Anwendungsfälle der Patentanmeldung DE 10 2009 025 337.8 gezeigt wird. Eine in der Stellwirkung zweiseitig agierende Technikvariante wird in DE 10 2009 025 342.4 verfolgt, in der drehbare Zusatzmagnete die Rolle der den Zusatzfluss erzeugenden Quelle darstellen. Es wird dabei allerdings die Frage aufgeworfen, wie man bei vielpoligen magnetischen Kreisen die Vielzahl der beweglichen Stellelemente in zuverlässiger Weise winkeln genau zu den gewünschten Positionsänderungen zwingt. Im Falle geringer Polzahlen sind Lösungen dieses Problems eher denkbar. Es erscheint für viele Anwendungen wünschenswert, die beweglichen Magnetkreisteile im Hinblick auf mechanische Komplexität und mit der Bewegung verbundenem Verschleiß ganz zu vermeiden. Die Stellbarkeit der Spannung mit Hilfe des magnetischen Kreises der Maschine vermittelt den Vorzug, dass die am Wicklungsausgang notwendigen elektronischen Stellglieder nur für moderate Leistungszuwächse zu bemessen sind. Würde versucht werden, die Spannungsregelung nur über die Leistungsstellglieder (Wech-

selrichter oder Gleichrichter) vorzunehmen, wäre deren Auslegungsbasis deutlich ungünstiger. Ein wichtiger Punkt für die hier angestrebte Lösung ist auch die Nebenbedingung, dass die Maschine mit Hilfe der Sammleranordnung der Magnete für hohe Kraftdichte ausgelegt werden kann. Für Anwendungen bei hochpoligen Synchronmaschinen mit Erregung durch Permanentmagnete in der Transport- oder Stromerzeugungstechnik besteht besonderer Bedarf, wenn es gelingt, den magnetischen Kreis trotz hoher Geschwindigkeit mit kleinem Spalt auszulegen. Hierzu bieten sich Verfahren, wie Spaltnachführeinrichtungen, an. Letztere lassen sich als eine Kombination von Erregerteil des Generators mit einem eigenstabilen Magnetlager konzipieren. Mit Hilfe eines zweiten magnetischen Kreises der z. B. ebenfalls durch Permanentmagnete erregt wird, lässt sich so eine stabile Rückstellwirkung mit ausreichender Steilheit der Kennlinie erreichen. Dies wurde z. B. in der Patentanmeldung DE 10 2009 041 530.0 beschrieben. Bei einem Axialfeldgenerator lässt sich das Verfahren auf segmentierte Rotorteile anwenden. Im Falle einer linearen Transportanwendung sind die Rotorteile im Fahrgestell integriert. Durch die Anwendung von zwei eigenständig erregten Magnetfeldern zur Erzeugung von Tangential- und Normalkräften entstehen allerdings höhere Massenanteile als bei ausschließlicher Erzeugung der Tangentialkraft in einem klassischen Magnetkreis. Darüber hinaus sind die aus mechanischer Sicht erforderlichen Zusatzmassen verhältnismäßig hoch zu veranschlagen.

**[0002]** Umgekehrt kann gefolgert werden, dass es sehr zweckmäßig sein wird, den magnetischen Kreis der Maschine so abzuwandeln, dass mit einem Magnetfeld beiden Funktionen, der Erzeugung von Tangential- und Normalkraft stellbarer Größe entsprochen werden kann. Bereits die Möglichkeit einer Stellbarkeit der Spannung mit Hilfe einer aufwandsarmen elektrischen Stelltechnik, über eine gleichstromführende Zusatzwicklung, müsste ein großer Fortschritt sein. Die Weiterentwicklung zur aufwandsarmen Beeinflussung der Normalkraft würde ermöglichen, dass eine schnellwirkende Spaltnachführung mit Hilfe magnetischer Kräfte verwirklicht ist. Auch der Einsatz von Rotorelementen als Tragkrafterzeuger ist damit verwirklicht.

**[0003]** Es besteht demnach die erfindungsgemäße Aufgabe darin, eine Magnetkreismodifikation in der Weise zu beschreiben, dass von einem hauptsächlich durch Permanentmagnete erzeugten Feld ausgehend und durch die Überlagerung eines zweiten, mit Hilfe von Gleichströmen erzeugten Zusatzfeldes mit der Tangentialkraft auch eine stellbare induzierte Spannung in den Spulen der Wechselstromwicklung wirksam ist, und eine stellbare Normalkraft im Luftspalt erzeugt werden kann. Zur Aufwandsbeschränkung der Stelltechnik erscheint wichtig, dass das magnetische Zusatzfeld als magnetischer Wi-

derstand hauptsächlich nur durch den Luftspalt begrenzt wird und nicht zusätzlich durch den Widerstand der Permanentmagnete. Weiter soll zur Aufwandsbegrenzung davon Gebrauch gemacht werden, dass durch eine Doppelanordnung zwei entgegengesetzte stellbare Normalkraftkomponenten zum Einsatz kommen. Die Aufgabe wird durch einen ausführlichen Text mit einer Anzahl in den Text einbezogener Bilder beschrieben.

#### Beschreibung

**[0004]** Für die mit obiger Zielsetzung verbundene Aufgabe bietet sich eine Modifikation des Magnetkreises gegenüber der bisher bekannten Sammler-Erregungsform der Permanentmagnete in Synchronmaschinen an. Es erscheint im Hinblick auf hohe zu erzielende Kraftdichte erforderlich, zwar an der Sammleranordnung mit V-förmig stehenden Magneten festzuhalten, jedoch für eine durch Gleichstrom vollzogene elektrische Zusatzerregung besondere Voraussetzungen zur Flussführung zu schaffen. Sie bestehen darin, dass die Zusatzwicklung in Längsrichtung zwischen zwei Magnetkreisteilen eingesetzt wird. Die magnetische Leitfähigkeit für den Fluss in der Querebene entsteht dann durch die Hinzunahme von entsprechenden Brückenteilen. Hierbei ist darauf zu achten, dass der Zusatzfluss nicht über die Permanentmagnete hinweg geführt wird.

**[0005]** **Fig. 1** zeigt die wesentlichen Teile der Magnetkrisenanordnung, die aus dem Statorteil ST und dem Erregerteil ET besteht. Die Verbindung Te im Erregerteil ET hat somit direkt vom Polmittelteil Pm auszugehen und zum Nachbarpol zu führen. Beide Teile sind jeweils zweiteilig und symmetrisch zur vertikalen Mittelebene. Die beiden Erregerteile Etl und Etr stehen sich in einem Abstand gegenüber, der etwa der Breite der im Stator in Längsrichtung verlaufenden Wicklung Wt entspricht. In Querrichtung stehen die durch die Permanentmagneten Mp gebildeten Pole sich mit ungleicher Polarität gegenüber. Die Magnetkreisteile des Stators bestehen aus gleichartig gestalteten Polreihen, links Spl und rechts (nicht gezeichnet) Spr. Die Polreihen weisen das Joch SJ zur Flussführung in Längsrichtung auf, das seinerseits mit der Querverbindung Ts zur Führung des Zusatzflusses verbunden ist. Mit den Querverbindungen Te im Erregerteil und Ts im Stator entsteht eine magnetisch gut leitfähige Brückenverbindung zur transversalen Flussführung. Auf diese Weise entsteht eine Magnetkrisenanordnung hybrider Art für longitudinale (LF)- und transversale (TF)-Flussführung. Da die Verbindung Te nur zwischen jedem zweiten Pol wirksam ist, kann die Wirkung der Gleichströme sich nur auf eine Polreihe beziehen. Sie ist jedoch insofern sehr wirksam als mit geringer Wicklungsdurchflutung in Wt eine große Amplitudenbeeinflussung des magnetischen Flusses erfolgt.

**[0006]** **Fig. 2** zeigt im Querschnitt die vollständige Magnetkrisenanordnung mit beiden Spulengruppen und beiden Polreihen Spl und Spr sowie den Spulenumwicklungen Sw. Es soll angenommen werden, dass von den Permanentmagneten im Luftspalt der magnetische Fluss  $\Phi_0$  erzeugt wird. Er schließt sich wie bei konventionellen LF-Magnetkreisen jeweils in Längsrichtung (longitudinal) zwischen den Polen. Die in Längsrichtung ausgebreitete Verteilung der magnetischen Felddichte  $B_0$  ist, wie in **Fig. 3** gezeichnet, annähernd trapezförmig. Wird nun der Gleichstrom in der Wicklung Wt zugeschaltet, erfahren die betroffenen Pole den zusätzlichen Fluss  $\Phi_e$ , der in der Querebene verläuft und das Luftspaltfeld verstärkt. Dies ist in **Fig. 3** gezeichnet. Die Überlagerung von  $\Phi_e$  und  $\Phi_0$  führt auf den vergrößerten Polfluss  $\Phi_r$ . Da nur jede zweite Halbwelle verstärkt ist, wirkt sich dies auf die Amplitude des Wechselfeldes  $\Phi_w$  nur etwa halb so stark aus wie auf den Polfluss  $\Phi_r$ .

**[0007]** Die **Fig. 4** und **Fig. 5** zeigen die Flussüberlagerung im Sinne einer Feldschwächung. Hierzu ist erforderlich, in der Wicklung Wt die Stromrichtung zu ändern. Die Flusschwächung erfolgt ähnlich wie die Verstärkung in jedem zweiten Pol. Ihre Anwendung wird im Gegensatz zur Verstärkung nicht durch den Sättigungseffekt behindert. Feldänderungen bis auf den Wert Null sind bezüglich der Grundwelle durchführbar.

**[0008]** Es soll erwähnt werden, dass die in den **Fig. 1**, **Fig. 2** und **Fig. 4** angegebene Position von Wt im wicklungstragenden Teil gegen eine Position im Erregerteil zwischen Etl und Etr in Luftspaltnähe vertauscht werden darf. Die jeweilig zu bevorzugende Lösung ergibt sich aus den Einsatzfällen. Für lineare Fahrzeuganwendung kann z. B. die Erregerteilbasierte Zusatzwicklung Wt günstiger sein, während bei rotatorischer Bauweise die Anordnung von Wt im Bauteil St Vorzüge aufweist.

**[0009]** Die beschriebene Amplitudenbeeinflussung des Wechselfeldes erscheint für zahlreiche Anwendungsfälle ein wichtiger Schritt für eine bessere Prozessanpassung.

**[0010]** Ebenso wichtig erscheint die Möglichkeit, die beschriebene Feldänderung zur Beeinflussung der Normalkräfte heranziehen zu können.

**[0011]** Betrachtet man z. B. die in **Fig. 3** und **Fig. 5** dargestellten Feldänderungsmöglichkeiten als Grundlage zur Normalkraftstellung, so ist hierfür die im Spalt wirkende resultierende Felddichte im Quadrat, also  $B_r^2$  von Bedeutung. In der Magnetanordnung nach **Fig. 1** lässt sich z. B. das Erregerteil ET durch die anziehende Normalkraft mit Hilfe einer schnellen Regelung des Stromes in der Wicklung Wt im Schwebezustand halten. Da die Normalkraft  $F_n$  verhältnismäßig groß ist, kann darüber hinaus auch

zugestanden werden, dass das Erregerteil ET mit einer zusätzlichen Last verbunden ist. Eine entsprechende Anwendung in der Transporttechnik oder als magnetisches Lagers bei Maschinen großen Durchmessers können Einsatzziele sein.

**[0012]** Betrachtet man [Fig. 3](#) und [Fig. 5](#) als Darstellung der Felddichte  $B_r$ , die den Aussteuerungsanteil  $\Delta B_r$  enthält, so findet man für einseitige Anwendung entsprechend [Fig. 1](#) für die im Spalt erzeugte Zusatzkraft  $\Delta F_n/F_{no}$ , die in [Fig. 9](#) in Abhängigkeit von  $\Delta B_r/B_s$  dargestellte Kennlinie. In der Tabelle von [Fig. 9a](#) ist gezeigt, dass eine Halbwelle des Felddichteverlaufs ihren Wert  $B_o$  behält, während die andere Halbwelle um den Betrag  $\Delta B_r$  ausgesteuert wird. Die Normalkraft ändert sich damit vom Betrag  $F_{no}$  auf den Wert  $F_{no} + \Delta F_n$ . Für kleine Aussteuerungen zeigt sich, dass die Kraft proportional zu  $\epsilon = \Delta B_r/B_s$  verläuft.

**[0013]** Die Bilder nach [Fig. 6](#), [Fig. 7](#) und [Fig. 8](#) sind der Beschreibung einer zweiseitig wirkenden Magnetkreisanordnung gewidmet. Mit ihr ist es möglich, das in [Fig. 6](#) gezeichnete Erregerteil ET durch zwei entgegengesetzt gerichtete Normalkraftkomponenten gegenüber vertikal wirkenden äußeren Kräften in stabiler Lage, bei annähernd konstantem Spalt zu halten. Gleiches gilt auch bei feststehendem Erregerteil und beweglichem Wicklungsteil ST1 und ST2. Die beiden Spalten  $\delta_1$  und  $\delta_2$  der zweiseitig symmetrischen Anordnung nach [Fig. 6](#) lassen sich durch die in [Fig. 7](#) dargestellte Gesamtanordnung mit zwei Steuerwicklungen Sw1 und Sw2, die eine getrennte Stromversorgung über die Stromsteller St1 und St2 sowie eine zugehörige spaltbezogene Regelung durch R1 und R2 besitzen, konstant halten. Hierbei sind nicht notwendigerweise beide Spalten auf gleiche Größe zu regeln. Wie der in [Fig. 8](#) gezeichnete Verlauf der Feldlinien  $B_{r1}$  und  $B_{r2}$  zeigt, wird dabei in  $\delta_1$  eine Feldverstärkung und in  $\delta_2$  eine Feldschwächung durch die jeweils gewählte Stromrichtung in der zugehörigen Wicklung Sw erzielt.

**[0014]** [Fig. 8](#) zeigt für beide Spalten die Überlagerung der Felddichte. Mit Hilfe der Regler R1 und R2 lässt sich die Aussteuerungsgröße  $\Delta B_r$  variabel einstellen, so dass gegen die Störung die Rückstellkraft  $\Delta F_n$  entwickelt wird.

**[0015]** Die mit Hilfe der Feldlinien gegebenen Hinweise auf eine Feldverdichtung, bzw. Feldschwächung in den Spalten  $\delta_1$  und  $\delta_2$  ist auch in [Fig. 6](#) dargestellt. Dort wird auch ersichtlich, dass die den Verbindungen Te1 und Te2 entsprechenden Feldlinien innerhalb der angedeuteten dreieckigen Querschnitte, d. h. in der Querebene verlaufen. Es liegt nahe, die Querverbindung mit den Bauteilen Te dadurch zu realisieren, dass die magnetisch leitfähigen Teile Etl und Etr mit Te zusammen eine Einheit bilden.

**[0016]** Analog zu der Beschreibung der einseitig wirkenden Normalkraft durch die [Fig. 9](#) und [Fig. 9a](#) zeigen die [Fig. 10](#) und [Fig. 10a](#) die bei symmetrischen Spalten erzielbare bezogene Normalkraftzunahme  $\Delta F_n/F_{no}$  in Abhängigkeit von der Aussteuerung  $\Delta B_r/B_s$ . Die Steilheit der Kennlinie ist gegenüber [Fig. 9](#) deshalb größer, weil hierbei zwei Feldaussteuerungen unterschiedlicher Richtung zur Wirkung kommen.

**[0017]** Wie sich zeigt und wie zu erwarten ist, kann bei gleichzeitiger Anwendung einer zweiseitigen Feldverstärkung  $B_e$  die Steilheit verstärkt und umgekehrt bei gleichzeitiger zweiseitiger Schwächung auch reduziert werden.

**[0018]** Es bleibt zu betonen, dass die Aussteuerung von  $B_r$  durch eine von der Wechselstromwicklung unabhängige, Gleichstrom führende Wicklung vorgenommen wird, und somit der Wechselstromkreis der Maschine zur Regelung nicht herangezogen werden muss. Die Aussteuerung erfolgt auch wegen der vom Erregerkreis der Permanentmagnete entkoppelten Querfelderregung dynamisch günstig und kann mit sehr begrenztem Aufwand an Leistungselektronik realisiert werden. Der magnetische Kreis der Anordnung erscheint gegenüber einer konventionell mit Permanentmagneten erregten Synchronmaschine zwar mehr gegliedert, zeigt aber den Vorteil begrenzter Zusatzmasse. Dies ergibt sich besonders im Vergleich mit der Anwendung einer Kombination aus Synchronmaschine und Magnetlager.

**[0019]** Es soll weiter erwähnt werden, dass die in [Fig. 1](#) vorgesehene Wicklungsanordnung zur Aufnahme der Wechselströme einer abschnittsweise einsträngigen Wicklung entspricht. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei vielpoligen Maschinen mehrere symmetrisch angeordnete und versetzte einsträngige Abschnitte sich zu einer mehrsträngigen Wicklungsanordnung ergänzen. Neben dieser besonders zweckmäßigen Wicklungsvariante sind auch andere Wicklungsformen anwendbar.

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**Zitierte Patentliteratur**

- DE 102009025337 [\[0001\]](#)
- DE 102009025342 [\[0001\]](#)
- DE 102009041530 [\[0001\]](#)

**Patentansprüche**

1. Permanenterrregte elektrische Maschine für lineare und rotatorische Anwendung, deren Permanentmagnete im Erregerteil in Sammlerform, z. B. V-förmig innerhalb des sie bis zum Luftspalt hin umgebenden magnetisch leitfähigen Materials vorliegen, und deren die Wicklung tragendes Teil aus einer Folge von einzelnen Zähnen oder Polgruppen besteht, die von einem sich wiederholenden Raster von Wechselstrom führenden Spulen umgeben sind, und deren Ströme im stationären Betrieb in ihrer Wechselselfrequenz mit derjenigen des durch die Bewegung im Wicklungsteil verursachten Feldwechsels übereinstimmen, wobei der Magnetkreis in zwei Hälften mit gegensätzlicher Polarität geteilt ist, im Erregerteil ET jeder zweite Pol eine magnetisch leitfähige Verbindung Te zum quer gegenüberliegenden Nachbarpol besitzt und auch im wicklungstragenden Teil ST zwischen den Jochen SJ eine magnetische Querverbindung Ts besteht und in Längsrichtung Gleichstrom führende Spulenteile liegen, deren Strom mit Hilfe von Stellgliedern einstellbar den Betriebsbedingungen angepasst wird.

2. Durch Permanentmagnete erregte elektrische Maschine, deren Magnetkreis in zwei nebeneinander liegende Hälften gegliedert und im Mittelbereich mit einer Gleichstrom führenden Wicklung eine Zusatzerrregung erfährt nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass im Erregerteil ET die magnetisch leitfähige Verbindung direkt zwischen den seitlich benachbarten Polmittenteilen Pm hergestellt wird.

3. Durch Permanentmagnete erregte elektrische Maschine, deren Magnetkreis in zwei nebeneinander liegende Hälften gegliedert und im Mittelbereich mit einer Gleichstrom führenden Wicklung eine Zusatzerrregung erfährt nach einem der obigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Feldbeeinflussung zur Spannungseinstellung bei minimaler Auslegungsleistung der elektronischen Stellglieder (im Leistungsteil) herangezogen wird.

4. Durch Permanentmagnete erregte elektrische Maschine, deren Magnetkreis in zwei nebeneinander liegende Hälften gegliedert und im Mittelbereich mit einer Gleichstrom führenden Wicklung eine Zusatzerrregung erfährt, nach einem der obigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Magnetkreisordnung zur waagerechten Mittelebene des Erregerteils ET symmetrisch ausgeführt ist, das magnetische Feld an zwei Luftspalten zur Wechselwirkung mit den stromführenden Spulen kommt, dort zwei entgegengesetzt gerichtete Normalkräfte wirken, die über zwei im Wicklungsteil liegende in Längsrichtung Gleichströme führende Spulen eine stellbare Größe erfahren.

5. Durch Permanentmagnete erregte elektrische Maschine, deren Magnetkreis in zwei nebeneinander liegende Hälften gegliedert und im Mittelbereich mit einer Gleichstrom führenden Wicklung eine Zusatzerrregung erfährt, nach einem der obigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die auf das Erreger- oder Wicklungsteil wirkenden stellbaren Normalkräfte zur Spaltstabilisierung dienen, und dabei das bewegliche Teil in Verbindung mit anderen beweglichen Teilen steht, zwischen denen zusätzliche Kräfte übertragen werden.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

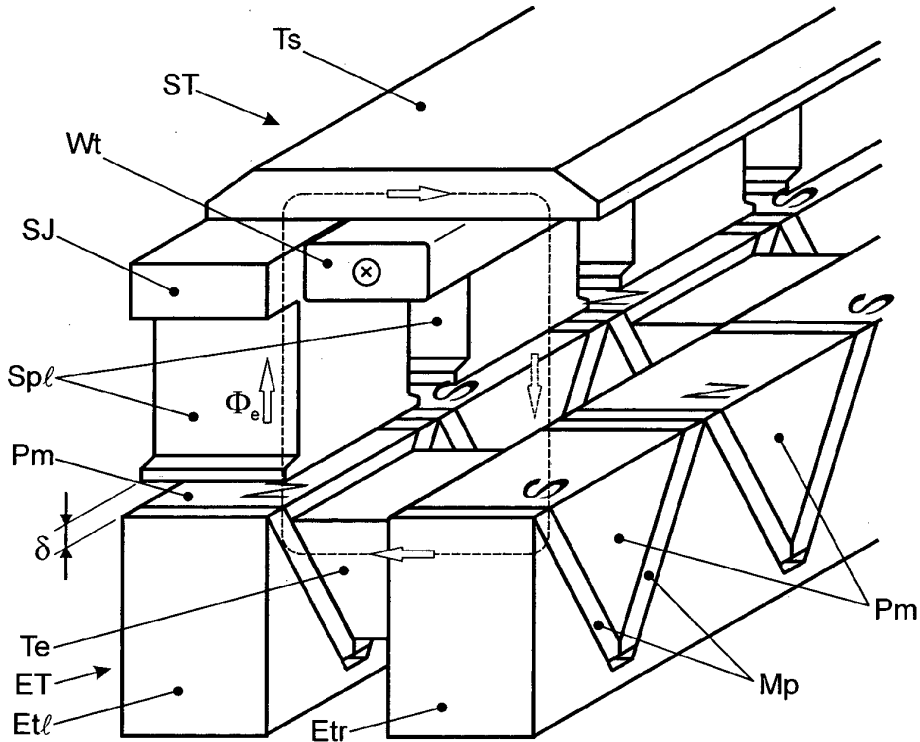


Fig. 1  
(ohne Spr)

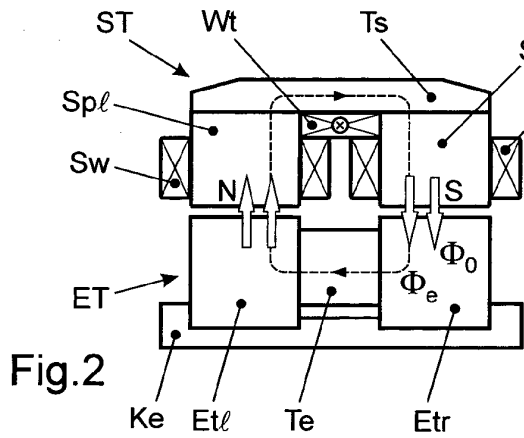


Fig. 2

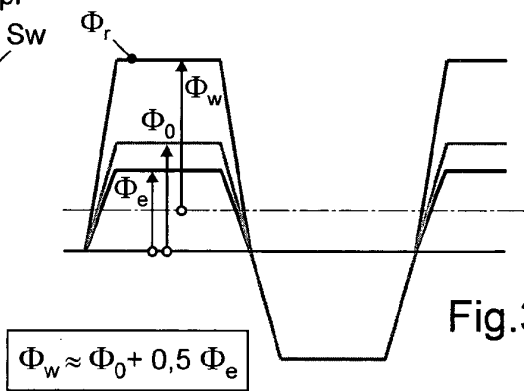


Fig. 3

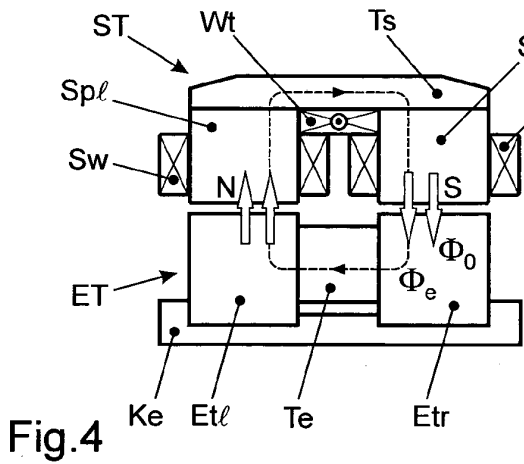


Fig. 4

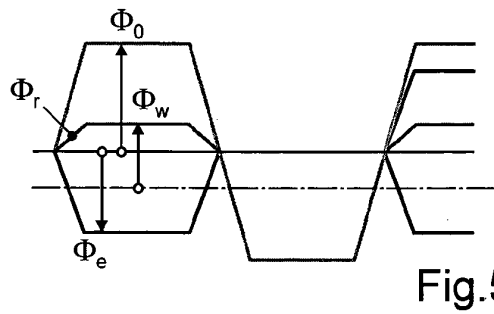


Fig. 5

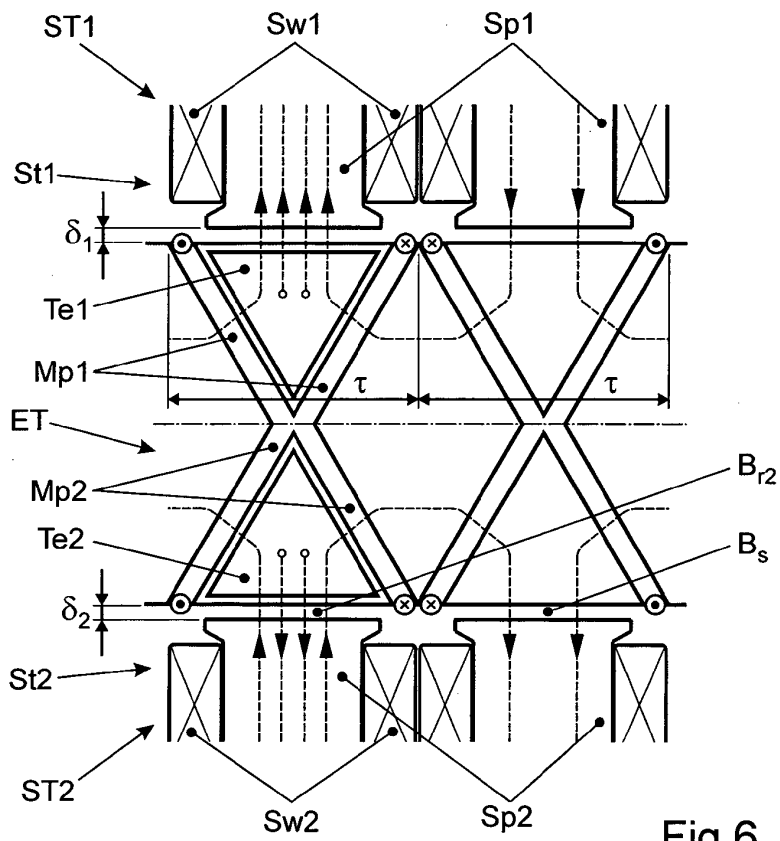


Fig. 6

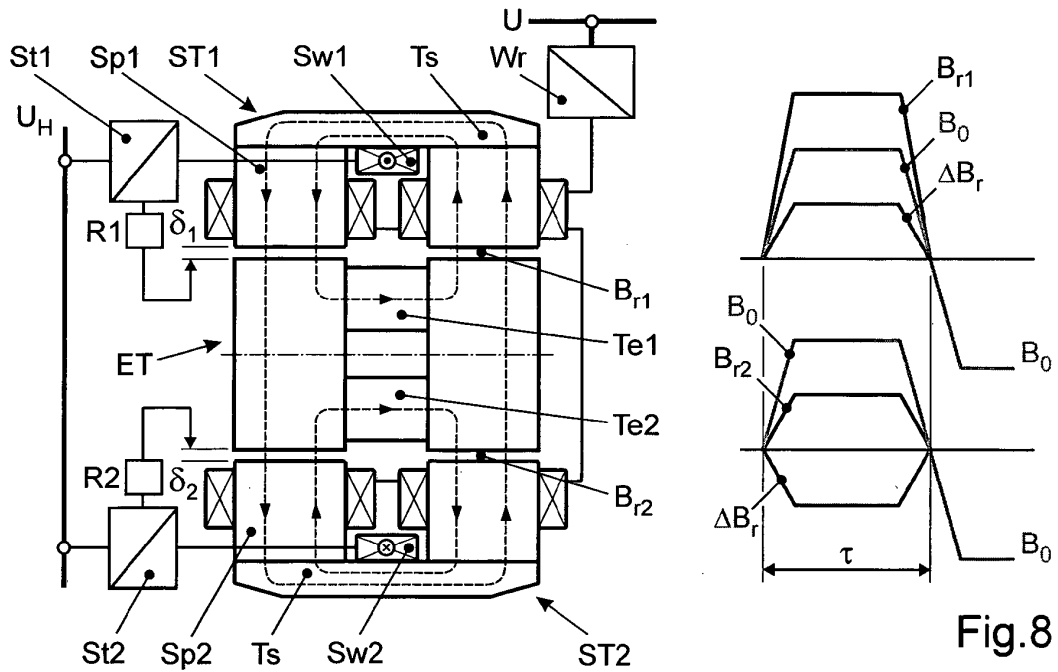


Fig. 7

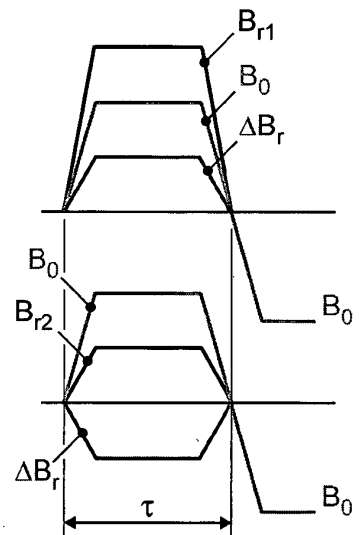


Fig. 8



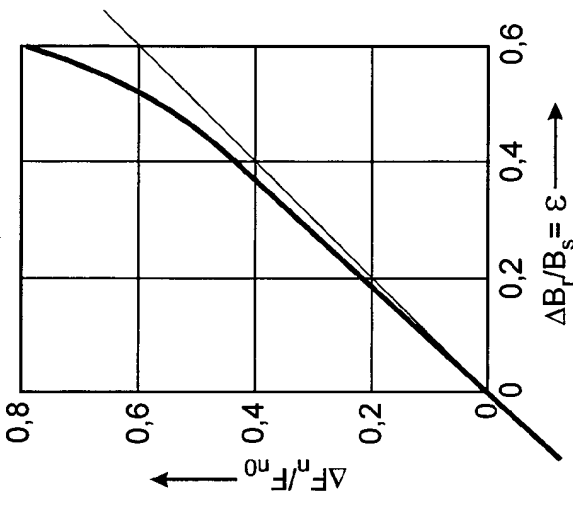


Fig.9

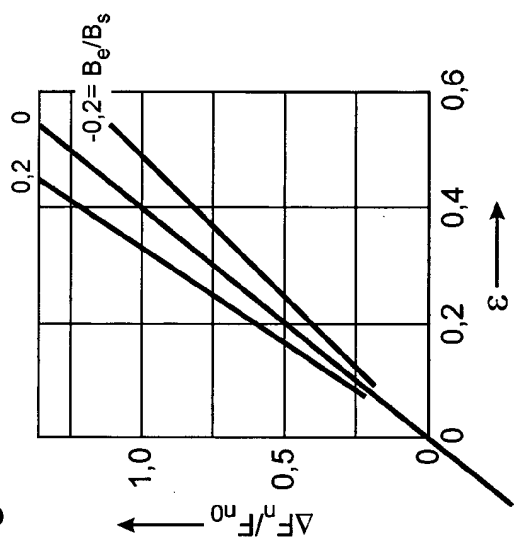


Fig.10

**Einseitige Wirkung**

Felddichte B

1.Halbwellen  $B_s + \Delta B_r$       2.Halbwellen  $B_s$

Normalkraft  $F_n$

$F_n \sim B_s^2(1+\epsilon)^2$        $B_s^2$        $\epsilon = \Delta B_r / B_s$

$\epsilon = 0$ :       $F_{n0} \sim 2B_s^2$        $F_n - F_{n0} = \Delta F_n$

$\Delta F_n / F_{n0} = \epsilon + 0,5 \epsilon^2$

Fig.9a

**Zweiseitige Wirkung**

Felddichte B (in Halbwellen mit Aussteuerung)

Spalt 1:  $B_{r1} = B_s + B_e + \Delta B_r$       Spalt 2:  $B_{r2} = B_s + B_e - \Delta B_r$        $\epsilon = \Delta B_r / B_s$

Normalkraft  $F_n$

Differenzkraft:  $F_n - F_{n0} = \Delta F_n$        $\epsilon = 0$        $F_n = F_{n0}$

$\Delta F_n / F_{n0} = 2(1+B_e/B_s) \cdot \epsilon$

Fig.10a