



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11) **EP 1 050 891 A2**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
08.11.2000 Patentblatt 2000/45

(51) Int. Cl.⁷: **H01F 7/18, F01L 9/04**

(21) Anmeldenummer: **00107446.7**

(22) Anmeldetag: **06.04.2000**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU
MC NL PT SE**
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL LT LV MK RO SI

(30) Priorität: **03.05.1999 DE 19920181**

(71) Anmelder:
**FEV Motorentechnik GmbH
52078 Aachen (DE)**

(72) Erfinder:
• **Bartsch, Leonhard
52499 Aachen (DE)**

- **Kather, Lutz
52146 Würselen (DE)**
- **Kemper, Hans
52070 Aachen (DE)**
- **van der Staay, Frank
52070 Aachen (DE)**

(74) Vertreter:
**Langmaack, Jürgen, Dipl.-Ing. et al
Patentanwälte
Maxton & Langmaack
Postfach 51 08 06
50944 Köln (DE)**

(54) **Verfahren zur Regelung der Ankerauftreffgeschwindigkeit an einem elektromagnetischen Aktuator durch eine kennfeldgestützte Regelung der Bestromung**

(57) Verfahren zur Einregelung einer geringen Auftreffgeschwindigkeit eines Ankers auf die Polfläche eines Elektromagneten an einem elektromagnetischen Aktuator beim jeweiligen Schaltvorgang durch Erfassen des Ankerwegs und des Verlaufs der Ankergeschwindigkeit als Ist-Werte, Vergleichen der erfaßten Ist-Werte von Ankerweg und Ankergeschwindigkeit über ein in der Steuereinrichtung abgelegtes Kennfeld und Vorgabe eines Soll-Wertes für die Bestromung des Elektromagneten und Vergleich von Ist-Wert und Soll-Wert für die Bestromung und nach Ausregelung einer sich hieraus ergebenden Differenz Bestromung der Elektromagneten.

EP 1 050 891 A2

Beschreibung

[0001] Elektromagnetische Aktuatoren, die im wesentlichen aus wenigstens einem Elektromagneten und einem mit dem zu betätigenden Stellglied verbundenen Anker bestehen, der bei einer Bestromung des Elektromagneten gegen die Kraft einer Rückstellfeder bewegbar ist, weisen sich durch eine hohe Schaltgeschwindigkeit aus. Ein Problem ist jedoch dadurch gegeben, daß bei der Annäherung des Ankers mit abnehmendem Abstand zur Polfläche des Elektromagneten, d. h. mit kleiner werdendem Luftspalt zwischen Polfläche und Anker, die auf den Anker einwirkenden Magnetkraft progressiv ansteigt, während die Gegenkraft der Rückstellfeder in der Regel nur linear anwächst, so daß der Anker mit anwachsender Geschwindigkeit auf die Polfläche auftrifft. Neben der Geräuschentwicklung kann es hierbei zu Prellvorgängen kommen, d. h. der Anker trifft zunächst auf der Polfläche auf, hebt dann aber zumindest kurzfristig ab, bis er endlich vollständig zur Anlage kommt. Hierdurch kann es zu Beeinträchtigungen der Funktion des Stellgliedes kommen, was insbesondere bei Aktuatoren mit hoher Schaltfrequenz zu erheblichen Störungen führen kann.

[0002] Es ist daher wünschenswert, wenn die Auftreffgeschwindigkeiten in der Größenordnung unter 0,05 m/s liegen. Wichtig ist es hierbei, daß derart kleine Auftreffgeschwindigkeiten auch unter realen Betriebsbedingungen mit allen damit verbundenen stochastischen Schwankungen sicherzustellen sind. Störeinflüsse von außen, beispielsweise Erschütterungen oder dergleichen, können in der letzten Annäherungsphase oder aber noch nach dem Anlegen an der Polfläche zu einem plötzlichen Abfallen führen.

[0003] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Regelungsverfahren zu schaffen, das es bei einem elektromagnetischen Aktuator der vorstehend bezeichneten Art ermöglicht, über eine Regelung der Bestromung des Elektromagneten die Bewegung des Ankers so zu führen, daß er mit geringer Auftreffgeschwindigkeit an seinem Sitz an der Polfläche zur Anlage kommt. Eine ausreichende Haltekraft nach dem Auftreffen des Ankers auf der Polfläche muß durch einen entsprechend eingeregelter Haltestrom über die Steuerung vorgegeben werden.

[0004] Gemäß der Erfindung wird diese Aufgabe gelöst mit einem Verfahren zur Regelung eines elektromagnetischen Aktuators mit wenigstens einem Elektromagneten und einem auf ein Stellglied einwirkenden Anker, der gegen die Kraft wenigstens einer Rückstellfeder durch gesteuerte Bestromung des mit einer Polfläche versehenen Elektromagneten über eine Steuereinrichtung aus einer ersten Schaltstellung in eine zweite, durch die Anlage des Ankers an der Polfläche definierten zweiten Schaltstellung bewegbar ist, das dadurch gekennzeichnet ist, daß beim jeweiligen Schaltvorgang der Ankerweg s und der Verlauf der

Ankergeschwindigkeit v als Ist-Werte erfaßt werden, die erfaßten Ist-Werte von Ankerweg und Ankergeschwindigkeit mit einem in der Steuereinrichtung abgelegten Kennfeld für eine vorgegebene Abhängigkeit der Geschwindigkeit über den Flugweg des Ankers verglichen und hiernach ein Soll-Wert für die Bestromung des Elektromagneten vorgegeben wird, und daß der Ist-Wert für die Bestromung mit dem Soll-Wert für die Bestromung verglichen und nach Aufregelung einer sich hieraus ergebenden Differenz der Elektromagnet für die Ankerbewegung bestromt wird. Mit diesem Verfahren wird die Möglichkeit ausgenutzt, daß moderne elektronische Rechenbausteine über eine hohe Rechengeschwindigkeit verfügen, so daß es möglich ist, nicht nur während des Schaltvorgangs die jeweilige Position und/oder Bewegungsgeschwindigkeit zu erfassen, sondern auch eine Mehrzahl von Aktuatoren hinsichtlich ihres Bewegungsablaufes zu erfassen, die erforderlichen Bewegungswerte zu verarbeiten und bei sich ergebenden Abweichungen über einen entsprechenden Regeleingriff für jeden einzelnen Aktuator einen optimalen Ablauf jedes einzelnen Schaltzyklus für jeden Aktuator zu gewährleisten. Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird hierbei mit Vorteil ausgenutzt, daß über ein in der Steuereinrichtung abgelegtes Kennfeld, in dem zur Erzeugung des Soll-Wertes für die Bestromung die geforderte Abhängigkeit der Ankergeschwindigkeit über den Ankerweg vorgegeben ist, und durch Erfassung der Ist-Werte der Ankerbewegung hinsichtlich Ankerweg und Geschwindigkeit Störfaktoren durch eine kennfeldabhängigen Änderung der Sollwertvorgabe für den Stromregler und damit der Ist-Wert für die Bestromung des "fangenden" Elektromagneten und damit die magnetische Energieeinspeisung so geführt werden kann, daß der Anker mit einer Auftreffgeschwindigkeit an der Polfläche zur Anlage kommt, die nur geringfügig über der idealen Auftreffgeschwindigkeit "Null" liegt. Der Begriff "Kennfeld" im Sinne der Erfindung umfaßt sowohl ein einzelnes Kennfeld als auch ein System von Kennfeldern, die für eine Vielzahl von Betriebszuständen gelten.

[0005] Das erfindungsgemäße Verfahren wird anhand schematischer Darstellungen näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 ein Schaltschema für einen elektromagnetischen Aktuator zur Betätigung eines Gaswechselventils an einer Kolbenbrennkraftmaschine,

Fig. 2 eine schematische Darstellung der Kennfeldbelegung,

Fig. 3 ein Flußdiagramm für eine Kennfeldbelegung.

[0006] Im Schaltschema gem. Fig. 1 ist ein Gaswechselventil GWV für eine Kolbenbrennkraftmaschine

schematisch dargestellt, das mit einem elektromagnetischen Aktuator EMA als Ventiltrieb versehen ist. Der Aktuator EMA besteht im wesentlichen aus einem Schließmagneten 2.1 und einem Öffnermagneten 2.2, zwischen denen ein Anker 1 gegen die Kraft von hier nur schematisch angedeuteten Rückstellfedern RF1 und RF2 entsprechend der Bestromung der Elektromagneten 2 hin und her bewegbar geführt ist. Die beiden möglichen Schaltstellungen des das Stellglied bildenden Gaswechselventils GWV werden hier jeweils durch die Anlage des Ankers an einem der beiden Elektromagneten 2 definiert.

[0007] Nachstehend wird das Regelverfahren für die Bestromung des Schließmagneten 2.1 beschrieben, im folgenden nur noch durch das Bezugszeichen 2 gekennzeichnet, da die Bestromung des Öffnermagneten 2.2 analog erfolgt.

[0008] Im Schaltschema ist der Anker 1 in einer Zwischenstellung gezeigt, nachdem er durch Stromlossetzen des Öffnermagneten 2.2 durch die Kraft der zugeordneten Feder RF 2 in Richtung auf den Schließmagneten 2.1, d. h. in Pfeilrichtung bewegt wird. Der Bewegungsvorgang des Ankers 1 wird jeweils durch die Bestromung der Magneten 2 gesteuert. Bei dem dargestellten Bewegungsvorgang in Pfeilrichtung erfolgt dies über eine Steuerung der Bestromung des fangenden Schließmagneten 2.1, so daß auf den Anker 1 eine Magnetkraft einwirkt, die gegen die Rückstellkraft der Rückstellfeder RF1 am Schließmagneten wirkt, nachdem der Anker 1 bei seiner Bewegung durch die Mittelstellung hindurchgegangen ist. Bei starkem Gegendruck kann es jedoch zweckmäßig sein, den fangenden Magneten unmittelbar nach dem Lösen des Ankers vom haltenden Magneten zu bestromen. Der Anstieg der Federkraft ist hierbei in der Regel linear, während der Anstieg der Magnetkraft bei unregelmäßiger Bestromung mit zunehmender Annäherung des Ankers 1 an die Polfläche des Magneten 2 progressiv ansteigt und so mit zunehmender Annäherung ein ansteigender Kraftüberschuß der Magnetkraft entsteht, der den Anker 1 zunehmend beschleunigt, so daß der Anker mit hoher Geschwindigkeit auf die Polfläche unter Geräuscentwicklung auftrifft und durch Prellvorgänge je nach der Höhe der Geschwindigkeit trotz der Magnetfeldes sich wieder zurückbewegen kann. Diese Prellvorgänge sind sowohl für das Schließen des Ventils als auch für das Öffnen des Ventils nachteilig, so daß hier durch eine Regelung der Bestromung die Energieeinspeisung in den Anker über das Magnetfeld nach Möglichkeit so geregelt werden muß, daß die Auftreffgeschwindigkeit des Ankers auf die Polfläche nahezu "Null" ist, so daß anschließend die Bestromung auf die Höhe des Haltestroms eingeregelt werden kann.

[0009] Der Strom wird vom Stromregler 3 zur Verfügung gestellt, der seinerseits seine Befehle zur Bestromung von einer Motorsteuereinrichtung 4 erhält. Mindestens die Ausschaltsignale 5 für den Strom werden dabei an den Stromregler 3 geleitet.

[0010] Um nun den Strom so regeln zu können, daß die tatsächlichen, sich während des Betriebes und auch im Verlaufe einer längeren Lebensdauer sich ändernden Verhältnisse berücksichtigt werden können, ist dem Aktuator eine hier nur schematisch dargestellte Erfassungs- und/oder Meßeinrichtung 7 zugeordnet. In der Meßeinrichtung 7 wird als Signal der Ankerweg erfaßt, wobei diese Wegerfassung nicht zwingend durch eine unmittelbar Wegmessung erfolgen muß, sondern auch über eine Ableitung des Ankerweges aus anderen Kenndaten erfolgen kann, wie dies nachstehend noch näher beschrieben werden wird. Das über die Meßeinrichtung 7 gewonnene Wegsignal 8 und ein hieraus über eine Differenzierung 9 abgeleitetes Geschwindigkeitssignal 10 wird der Motorsteuereinrichtung 4 zugeführt.

[0011] Zur Verarbeitung des Wegsignals 8 und des Geschwindigkeitssignals 10 ist die Motorsteuereinrichtung 4 mit einem Kennfeld oder einem Kennfeldsystem 11 mit Kennfeldern für mehrere Aktuatoren versehen, in dem der Verlauf der Geschwindigkeit über den Ankerweg aufgrund empirischer Erkenntnisse oder aufgrund von Berechnungen aus den Kenndaten des Aktuators vorgegeben ist. Der Geschwindigkeitsverlauf über den Weg ist hierbei so ausgelegt, daß er die wünschenswerten geringe Auftreffgeschwindigkeit von unter 0,05 m/s aufweist. Diesem durch das Kennfeld vorgegebenen Geschwindigkeitsverlauf ist ein Verlauf für einen Strom-Soll-Wert zugeordnet.

[0012] Liegt das über die Meßeinrichtung 7 erfaßte Wegsignal 8 und das hieraus abgeleitete Geschwindigkeitssignal 10 in seinem tatsächlichen Verlauf in der Vorgabe des Kennfeldes, entspricht der Strom-Soll-Wert der Vorgabe durch das Kennfeld. Ergeben sich jedoch im Vergleich zum abgelegten Kennfeld Abweichungen in der Abhängigkeit zwischen Geschwindigkeitssignal und Wegsignal, dann wird der Strom-Soll-Wert entsprechend korrigiert.

[0013] Der so gewonnene, ggf. korrigierte Strom-Soll-Wert 12 wird dann dem Stromregler 3 aufgeschaltet, in dem auch der Strom-Ist-Wert 13 erfaßt wird, so daß in bezug auf den ggf. korrigierten Strom-Soll-Wert 12 der Strom-Ist-Wert 13 zur Bestromung des Elektromagneten 2 entsprechend geregelt werden kann.

[0014] Da statt einer starren Strom-Soll-Wertvorgabe der Strom-Soll-Wert 12 unter Berücksichtigung der erfaßten tatsächlichen Bewegungsverhältnisse am Aktuator über das vorgegebene Kennfeld 11 bzw. ein Kennfeldsystem der Motorsteuereinrichtung selbst korrigiert wird, ist es möglich, auf das Bewegungsverhalten des Aktuators einwirkende Störungen auszuregulieren.

[0015] Zur Erfassung von Weg und/oder Geschwindigkeit können die verschiedensten Verfahren eingesetzt werden. So ist es beispielsweise möglich, durch eine Erfassung der wegabhängigen Veränderung der Rückstellkraft der Rückstellfeder RF1 bzw. RF2 über piezoelektrische Geber, die der Abstützung der Rückstellfedern RF1 bzw. RF2 zugeordnet sind, ein entspre-

chendes Wegsignal und ein Geschwindigkeitssignal abzuleiten.

[0016] Es ist auch möglich, einen sogenannten LED-Schattungssensor im Bereich des Ankers 1 anzubringen. Meßgröße bei diesem Sensor ist die Änderung der Lichtintensität, die bei der Ankerbewegung durch eine entsprechende hubabhängige Abschattung bewirkt wird. Daraus kann die aktuelle Ankerposition und damit auch der Ankerweg und hieraus abgeleitet, die Ankergeschwindigkeit bestimmt werden.

[0017] Auch durch die Anordnung von "richtungsfühlenden" Sensoren an den Elektromagneten ist es möglich, über die Erfassung der sich ändernden Richtung des Verlaufs der magnetischen Feldlinien die sich ändernde Ankerposition und damit den Ankerweg zu erfassen. Durch eine entsprechende Anordnung kann das Hauptfeld, aber auch das Streufeld des Elektromagneten gemessen werden und aus den sich von der Position des Ankers abhängigen Veränderungen der Ankerweg abgeleitet werden.

[0018] Da es hier insbesondere auf die Erfassung der Ankerbewegung im Nahbereich der Polfläche des Elektromagneten ankommt, ist es auch möglich, über kapazitive Sensoren und die Veränderung ihrer Kapazität in Abhängigkeit vom Ankerhub die Ankerbewegung zu erfassen. Erforderlich sind aber hier hochfrequente Anregungsfrequenzen im MHz-Bereich.

[0019] Der hier in bezug auf den Anker 1 verwendete Begriff "Endlage" gilt auch für die Positionen, die der Anker einnimmt, wenn bei Vorhandensein eines Ventilspiels das Ventil seinen Sitz erreicht.

[0020] Grundsätzlich gilt für die Regelung der Bestromung, daß durch die Steuerung auf einen Haltestrom umgeschaltet wird, der auch getaktet sein kann, wenn der Anker an einer Polfläche seine Endlage erreicht hat.

[0021] Das beschriebene Verfahren zur Reduzierung der Auftreffgeschwindigkeit des Ankers bzw. des Ventils im Sitz berücksichtigt auch das Auftreten größerer Bewegungsverluste, da es über die "Führung" der Bestromung nach der Ankergeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Weg ein Arbeiten des Reglers auf der sicheren Seite erzwingt. Damit kann verhindert werden, daß der Anker "verhungert", also die Polfläche des jeweils fangenden Magneten nicht mehr erreichen kann, da immer eine genügende Energieeinspeisung bewirkt wird. Die Problematik stellt sich vor allen Dingen bei den Gasauslaßventilen, die gegen hohe Gaskräfte öffnen müssen.

[0022] Zur Belegung des Kennfeldes 11 werden die gemessenen oder auch rekonstruierten Größen "Weg" und "Geschwindigkeit" an ein Kennfeld adressiert, dem direkt ein Strom-Soll-Wert entnommen wird, und zwar derart, daß basierend auf einem wirklichkeitsnahen Aktuatormodell jeweils der optimale Strom ermittelt wird, der eine Aufsetzgeschwindigkeit von annähernd 0 ermöglicht. Dies erfolgt entsprechend der Grafik in Fig. 2 durch numerische Lösung des Differentialgleichungs-

systems des Aktuatormodells, indem vom Augenblick des Aufsetzens des Ankers mit niedriger Aufsetzgeschwindigkeit (Punkt A im Zustandsraum) ausgehend rückwärts in der Zeit integriert wird. Dabei wird für jedes Wegelement $\Delta s = s_i - s_{i-1}$, das dem Wegabstand zweier benachbarter Kennfeldpunkte entspricht und für jede sinnvolle Geschwindigkeit V_j des Kennfeldes an der Wegposition s_j jeweils der Wertebereich der Stromvorgabe in genügend feiner Abstufung durchlaufen, um für jede sinnvolle Geschwindigkeit v_j an der Wegposition s_{i-1} einen Strom-Soll-Wert zu erhalten, der sicher zum Ausgangspunkt A führt. Dabei kann ein zusätzliches Gütemaß verwendet werden, um unter mehreren möglichen Strom-Soll-Werten einen optimalen Wert auszuwählen.

[0023] Das in Fig. 3 wiedergegebene Flußdiagramm zeigt den Ablauf des in Fig. 2 schematisch dargestellten Kennfeldfüllens durch Rückwärtsrechnen über einen Rechner. Begonnen wird mit dem gewünschten Endzustand, also $s=0$ (= anliegender Anker) und einer bestimmten Sollauftreffgeschwindigkeit $v=v(0)$. Ausgehend hiervon wird aufgrund der Kräftegleichungen mit Hilfe des Modells errechnet, welcher Zustand $(s(i), v(j))$ kurz vorher vorgelegen haben muß, wenn ein bestimmter Strom vorausgesetzt wird. Somit ist es durch dieses Rückwärtsrechnen möglich, für verschiedene Stromwerte herauszufinden, bei welchem "Vorzustand" der Strom ZU dem gewünschten "Endzustand" führt. Dieser Stromwert wird nun unter dem entsprechenden Kennfeldpunkt, also dem entsprechenden Vorzustand eingetragen. Dies wird solange wiederholt, bis alle sinnvollen Stromwerte durchgespielt sind, wie in Fig. 2 dargestellt.

[0024] Nach dem ersten Durchlaufen aller möglichen Stromwerte erhält man nun eine neuerliche Anzahl von möglichen Kennfeldpunkten, die eine Erreichung des endgültigen Endzustandes ermöglichen. Diese Kennfeldpunkte sind in der Abbildung 2 als zweite Spalte von links zu sehen. Nun wird für jeden dieser Punkte mit dem Rückwärtsrechnen zur dritten Spalte begonnen. Jeder dieser Punkte wird nun als neuer "gewünschter Zustand" angesehen und für jeden dieser Punkte wird für alle sinnvollen Ströme die Rückwärtsrechnung durchgeführt. So wird bei jedem Punkt für jeden Strom ein "Vorzustand" $s(i), v(j)$ ermittelt, der bei dem entsprechenden Strom zu dem gewünschten Zustand führt. Somit ist es auch möglich, daß ein "Vorzustand" bei unterschiedlichen Strömen zu mehreren gültigen "gewünschten" Zuständen führt. Zunächst muß also in jedem Kennfeldpunkt sowohl der Strom als auch der hiermit erreichbare "Endzustand" bzw. gewünschte Zustand gespeichert werden.

[0025] Abschließend muß nun noch zwischen den jeweils möglichen Strömen in einem Kennfeldpunkt ausgewählt werden. Hierfür kann ein Gütemaß ermittelt werden, das eine Bewertung der Kennfeldpunkteinträge vornimmt. Ein solches Gütemaß kann beispielsweise aufgrund einer als besonders sinnvoll erachteten Tra-

jektorie durch das Kennfeld ermittelt werden (je weniger Abweichung von der Trajektorie, um so besser ist der Kennfeldeintrag). Oder es können auch andere Kriterien wie beispielsweise ein möglichst wenig zu ändernder Strom zur Auswahl der endgültigen Kennfeldeinträge verwendet werden. 5

Patentansprüche

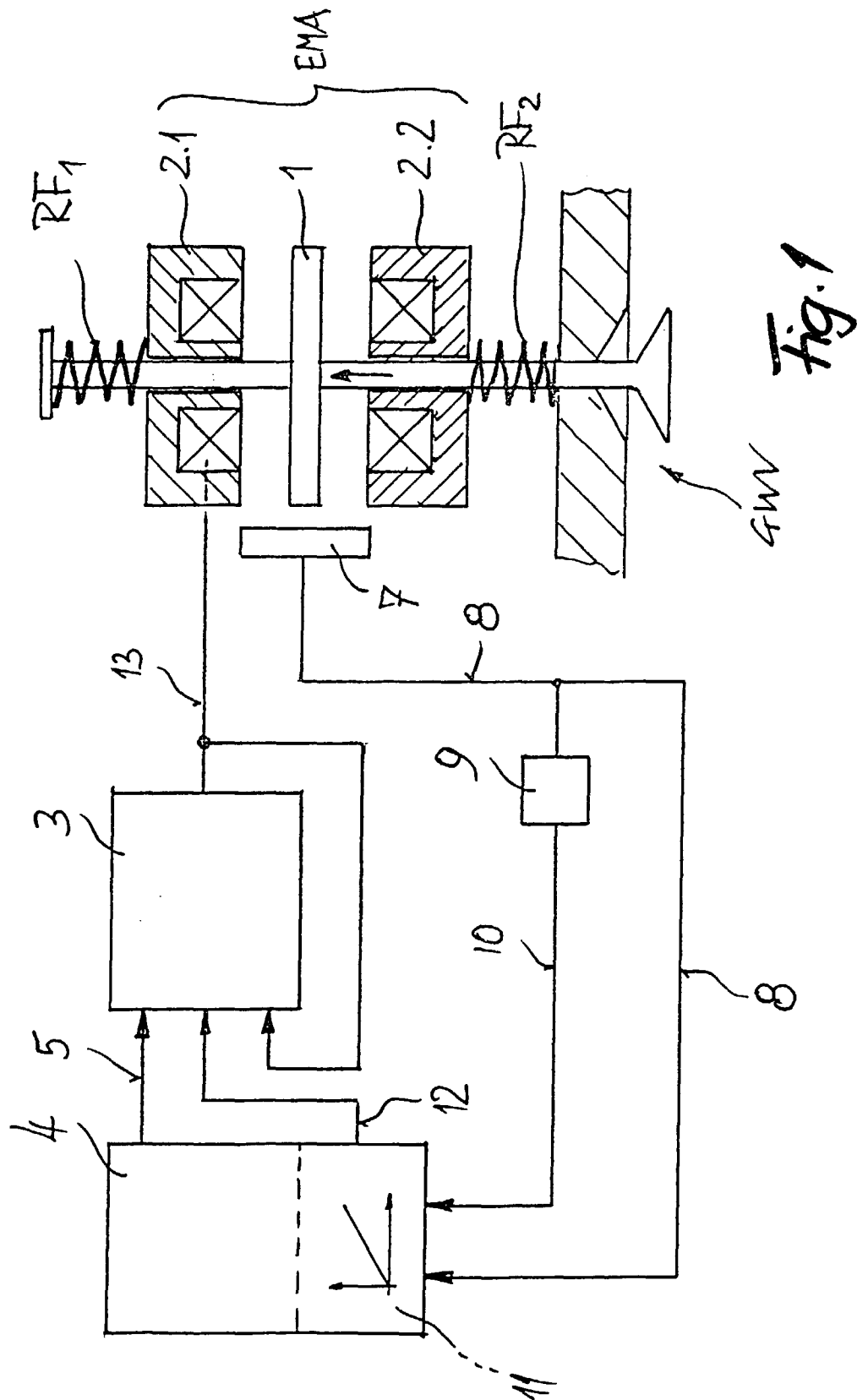
1. Verfahren zur Regelung eines elektromagnetischen Aktuators mit wenigstens einem Elektromagneten und einem auf ein Stellglied einwirkenden Anker, der gegen die Kraft wenigstens einer Rückstellfeder durch gesteuerte Bestromung des mit einer Polfläche versehenen Elektromagneten über eine Steuereinrichtung aus einer ersten Schaltstellung in eine zweite, durch die Anlage des Ankers an der Polfläche definierte zweite Schaltstellung bewegbar ist, dadurch gekennzeichnet, daß für die Steuerung der Bestromung zur Einregelung einer geringen Auftreffgeschwindigkeit des Ankers auf die Polfläche
 - a) - beim jeweiligen Schaltvorgang der Ankerweg (s) und der Verlauf der Ankergeschwindigkeit (v) als Ist-Werte erfaßt werden, 25
 - b) - die erfaßten Ist-Werte von Ankerweg (s) und Ankergeschwindigkeit (v) mit einem in der Steuereinrichtung abgelegten Kennfeld für eine vorgegebene Abhängigkeit der Geschwindigkeit über den Flugweg des Ankers verglichen werden und hierdurch ein Soll-Wert für die Bestromung des Elektromagneten vorgegeben wird und 30
 - c) - der Ist-Wert für die Bestromung mit dem Soll-Wert für die Bestromung verglichen und nach Ausregelung einer sich hieraus ergebenden Differenz der Elektromagnet bestromt wird. 35

40

45

50

55



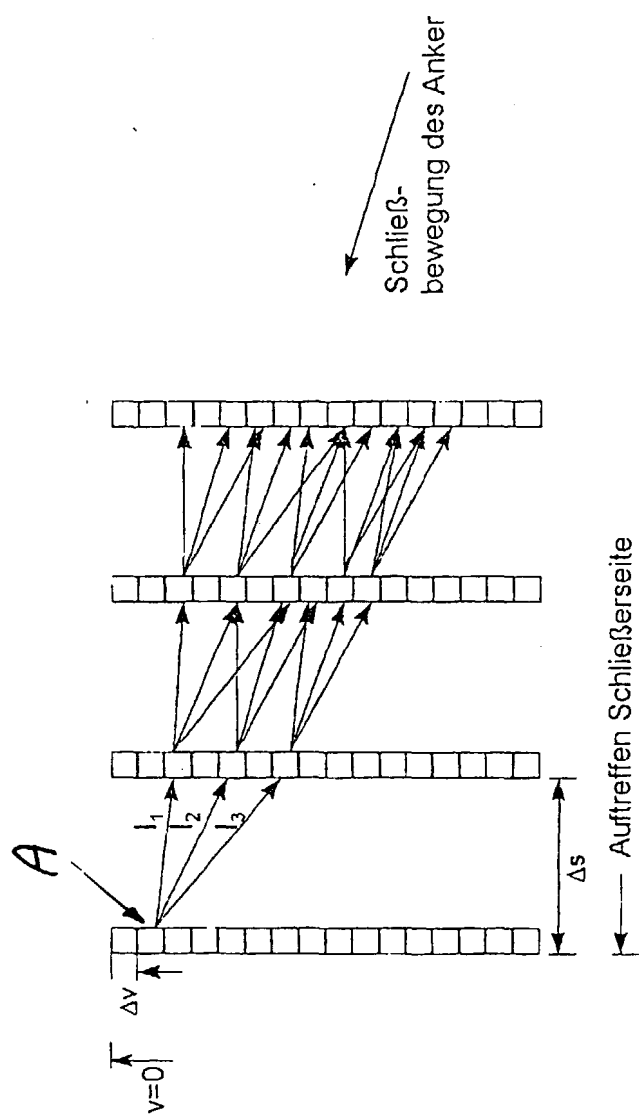


Fig. 2

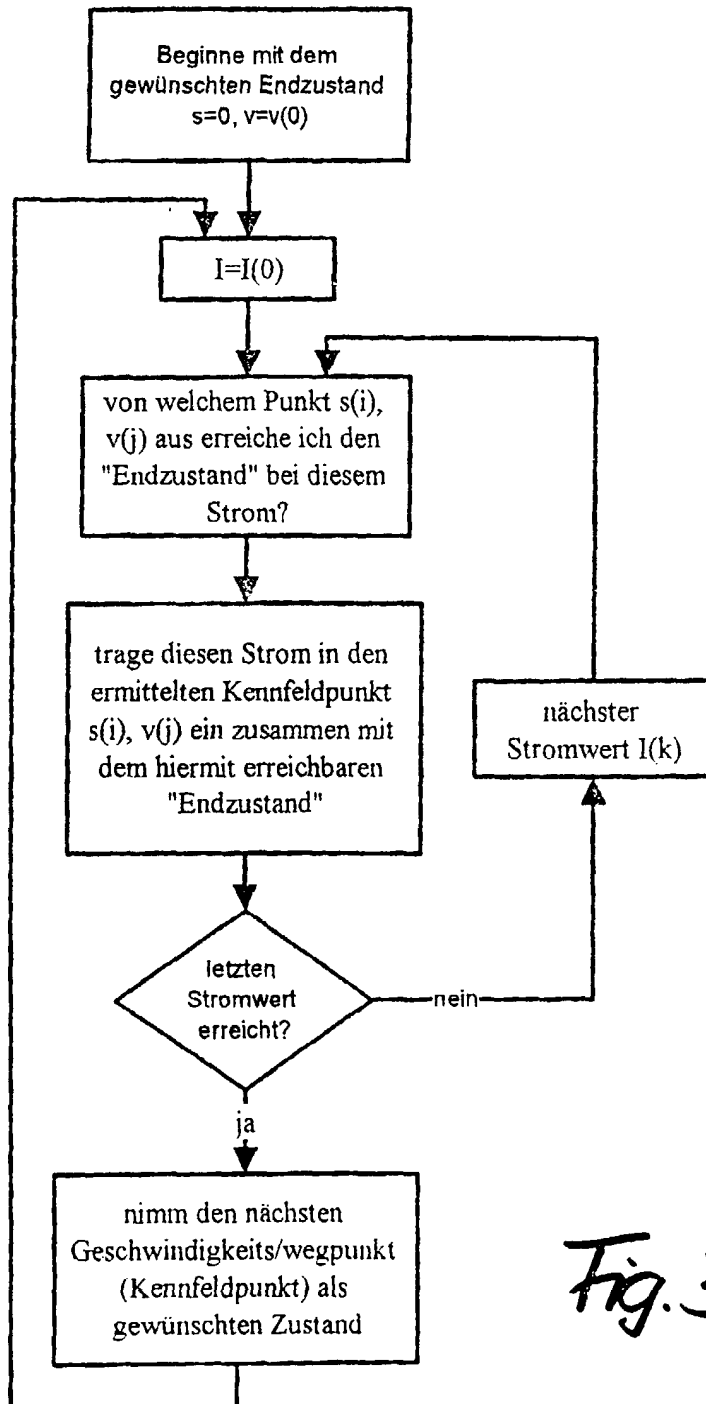


Fig. 3