



Europäisches Patentamt  
European Patent Office  
Office européen des brevets



(11) **EP 1 001 142 A2**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:  
**17.05.2000 Patentblatt 2000/20**

(51) Int. Cl.<sup>7</sup>: **F01L 9/04**

(21) Anmeldenummer: **99121716.7**

(22) Anmeldetag: **03.11.1999**

(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: **16.11.1998 DE 19852655**

(71) Anmelder: **DaimlerChrysler AG  
70567 Stuttgart (DE)**

(72) Erfinder:  
• **Kirschbaum, Frank  
70327 Stuttgart (DE)**

• **Maute, Kurt  
71067 Sindelfingen (DE)**  
• **Pandit, Madhukar, Prof., Dr.  
67663 Kaiserslautern (DE)**  
• **Virnich, Michael  
54317 Korlingen (DE)**

(74) Vertreter: **Kolb, Georg et al  
DaimlerChrysler AG,  
Postfach 35 35  
74025 Heilbronn (DE)**

(54) **Verfahren zum Betreiben eines elektromagnetischen Aktuators zur Betätigung eines Gaswechselventils**

(57) Verfahren zum Betreiben eines elektromagnetischen Aktuators.

Bei bekannten elektromagnetischen Aktuatoren mit jeweils mindestens einem auf einen Anker wirkenden Elektromagneten können betriebsbedingte Schwankungen von Systemparametern zu einer Fehlfunktion führen, insbesondere zu einem erhöhten Verschleiß des Aktuators, unerwünschter Geräuschentwicklung und überhöhtem Energieverbrauch. Das neue Verfahren soll einen sicheren Dauerbetrieb ermöglichen.

Erfindungsgemäß wird die Auftreffgeschwindigkeit des Ankers auf den Elektromagneten auf einen vorgegebenen Wert geregelt. Hierzu wird eine von einer Induktivitätsänderung des Elektromagneten abhängige Regelgröße als Maß der Auftreffgeschwindigkeit des Ankers auf den Elektromagneten gebildet und die Regelgröße durch Steuerung der Energiezufuhr zum Elektromagneten auf einen Sollwert geregelt, den die Regelgröße bei einem vorgegebenen Wert der Auftreffgeschwindigkeit des Ankers auf den Elektromagneten annimmt.

Betätigung von Gaswechselventilen in Brennkraftmaschinen mit elektromagnetischen Aktuatoren.

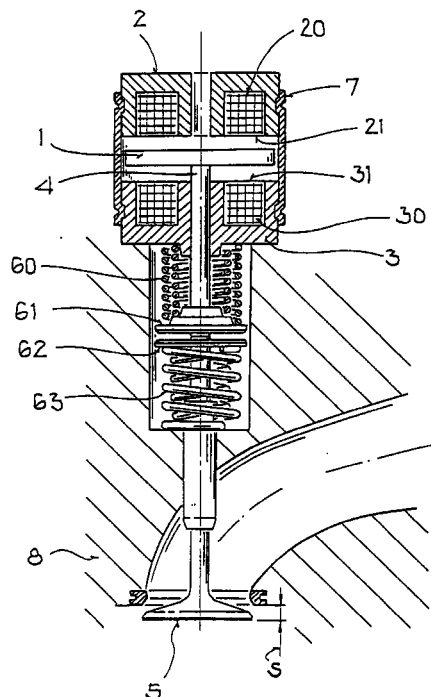


FIG. 1

## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben eines elektromagnetischen Aktuators gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

**[0002]** Elektromagnetische Aktuatoren werden üblicherweise in Brennkraftmaschinen zur Betätigung von Gaswechselventilen eingesetzt, mit denen das Ein- und Ausströmen eines Arbeitsmediums in die bzw. aus den Brennkammern der Brennkraftmaschine gesteuert wird.

**[0003]** Ein derartiger Aktuator ist beispielsweise aus der DE 196 31 909 A1 bekannt. Dieser vorbekannte Aktuator weist zwei Elektromagnete — einen Schließmagneten und einen Öffnungsmagneten — mit sich gegenüberliegenden Polflächen und einen zwischen den Polflächen der Elektromagnete axial bewegbaren Anker auf, der gegen die Kraft zweier Ventilsfedern auf das zu betätigende Gaswechselventil wirkt. Bei nicht bestromten Elektromagneten wird der Anker durch die gegensinnig arbeitenden Ventilsfedern in einer Gleichgewichtslage etwa in der Mitte zwischen den Polflächen der Elektromagnete festgehalten.

**[0004]** Durch abwechselnde Bestromung, d. h. Ein- und Ausschaltung der beiden Elektromagnete wird der Anker und somit auch das Gaswechselventil aus der Gleichgewichtslage vom jeweils bestromten Elektromagneten angezogen und für die Dauer der Strombeaufschlagung an der Polfläche dieses Elektromagneten festgehalten. Das Gaswechselventil befindet sich dabei in einer Schließstellung, wenn der Anker an der Polfläche des als Schließmagnet arbeitenden einen Elektromagneten anliegt und es befindet sich in einer Offensstellung, wenn der Anker an der Polfläche des als Öffnungsmagnet arbeitenden anderen Elektromagneten anliegt.

**[0005]** Bei dem vorbekannten Aktuator wird die Gleichgewichtslage des Ankers durch Messung der Induktivitäten der beiden Elektromagnete und durch einen Vergleich der beiden gemessenen Induktivitätswerte ermittelt und im Falle einer Abweichung vom gewünschten Wert eine Nachjustierung der Gleichgewichtslage vorgenommen.

**[0006]** Aus der US 4 823 825 ist ferner bekannt, daß bei einem Aktuator der eingangs genannten Art das Auftreffen des Ankers auf den bestromten Elektromagneten anhand einer kurzzeitigen Abnahme und einer anschließenden erneuten Zunahme eines durch diesen Elektromagneten fließenden Erregerstromes erkannt wird. Das Fehlen dieser kurzzeitigen Abnahme des Erregerstromes ist ein Hinweis auf eine bereits eingetretene Fehlfunktion; diese läßt sich zwar nicht vermeiden, sie wird jedoch sofort erkannt, so daß Maßnahmen zur Fehlerbehebung eingeleitet werden können.

**[0007]** Ungelöst ist jedoch das Problem, den Einfluß betriebsbedingter Systemparameter, insbesondere Schwankungen der Reibung, der Temperatur und des Drucks in den Brennkammern aber auch Viskositätsän-

derungen des Schmiermittels und Verschleiß oder Verschmutzung des Aktuators oder Gaswechselventils, in der Steuerung zu eliminieren. Dies kann zu einer Fehlfunktion des Aktuators führen, insbesondere zu einem erhöhten Verschleiß des Aktuators, unerwünschter Geräuschentwicklung und überhöhtem Energieverbrauch. Ein sicherer Dauerbetrieb des Aktuators ist damit nicht gewährleistet.

**[0008]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 anzugeben, das einen sicheren Dauerbetrieb ermöglicht.

**[0009]** Die Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die kennzeichnenden Merkmale des Patentanspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen ergeben sich aus den unteransprüchen.

**[0010]** Der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, daß die Bewegung des Ankers eine Änderung der Induktivität des Elektromagneten bewirkt. Die Induktivitätsänderung des Elektromagneten ist somit ein Maß der Ankergeschwindigkeit und infolgedessen auch ein Maß der Auftreffgeschwindigkeit des Ankers auf den Elektromagneten oder der Auftreffgeschwindigkeit des Gaswechselventils in einen Ventilsitz.

**[0011]** Erfindungsgemäß wird eine von der Induktivitätsänderung des Elektromagneten abhängige Regelgröße als Maß der Auftreffgeschwindigkeit des Ankers auf den Elektromagneten gebildet. Diese Regelgröße wird durch Steuerung der Energiezufuhr zum Elektromagneten derart geregelt, daß die Auftreffgeschwindigkeit des Ankers auf den Elektromagneten einen vorgegebenen, d. h. geforderten Wert annimmt und somit begrenzt wird. Hierdurch wird sichergestellt, daß dem Anker auch bei einer Änderung der Systemparameter ausreichend Energie zugeführt wird, um ihn bis zum Elektromagneten zu bewegen und dort festzuhalten; andererseits wird die Energiezufuhr auf ein erforderliches Maß begrenzt. Dies führt zu einem fehlerfreien Betrieb sowie zu einem geringen Stromverbrauch, einem geringen Verschleiß, einer geringen Geräuschentwicklung und zu einer Vermeidung des Abprallens des Ankers oder Gaswechselventils vom Elektromagneten bzw. Ventilsitz.

**[0012]** In einer vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens wird die Regelgröße durch Messung der Geschwindigkeit einer während der Ankerbewegung auftretenden Stromabnahme eines durch den Elektromagneten fließenden Erregerstromes gebildet.

**[0013]** In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens wird der zeitliche Verlauf der Induktivität des Elektromagneten ermittelt und aus diesem Induktivitätsverlauf die Geschwindigkeit des Ankers zum Zeitpunkt des Auftreffens auf den Elektromagneten als Regelgröße hergeleitet.

**[0014]** Den Induktivitätsverlauf erhält man durch Erfassung der sich in aufeinanderfolgenden Zeitintervallen ergebenden Induktivität des Elektromagneten. Vorteilhafterweise wird die Induktivität des Elektroma-

gneten aus den zeitlichen Verläufen einer dem Elektromagneten zugeführten Erregerspannung und eines durch den Elektromagneten fließenden Erregerstromes ermittelt.

**[0015]** Vorteilhaft ist auch die Erfassung der Resonanzfrequenz eines aus dem Elektromagneten und einer Kapazität gebildeten LC-Schwingkreises oder die Erfassung des komplexen Widerstandes des Elektromagneten mittels eines dem Elektromagneten zugeführten hochfrequenten Meßsignals und die Ermittlung der Induktivität des Elektromagneten aus der Resonanzfrequenz bzw. aus dem komplexen Widerstand.

**[0016]** Vorzugsweise wird die Regelgröße mit einem vorgegebenen Sollwert verglichen und ein nächster Einschaltzeitpunkt des Elektromagneten in Abhängigkeit des Vergleichsergebnisses vorgegeben. Hierdurch wird die dem Anker während der nächsten Betätigung des Gaswechselventils zuzuführende Energie derart gesteuert, daß die Auftreffgeschwindigkeit des Anker auf den Elektromagneten auf den vorgegebenen Wert geregelt wird.

**[0017]** Der Sollwert der Regelgröße entspricht dem vorgegebenen Wert der Auftreffgeschwindigkeit des Ankers auf den Elektromagneten; er wird vorteilhafterweise in Abhängigkeit von Systemparametern, insbesondere in Abhängigkeit der Reibung, der Temperatur und des beim Öffnen des Gaswechselventils in des Brennkammer herrschenden Druckes, vorgegeben. Vorzugsweise werden auch die Einschaltzeitpunkte des Elektromagneten in Abhängigkeit von Systemparametern vorgegeben. Als besonders vorteilhaft erweist es sich, neben den Einschaltzeitpunkten auch die lokalen Maximalwerte des durch den Elektromagneten fließenden Erregerstromes in Abhängigkeit von Systemparametern vorzugeben.

**[0018]** In einer vorteilhaften Weiterbildung des Verfahrens werden aus den sich im eingeregelter Zustand bei verschiedenen Systemparametern einstellenden Einschaltzeitpunkten des Elektromagneten oder sowohl aus diesen Einschaltzeitpunkten als auch aus den sich bei den gleichen Systemparametern ergebenden lokalen Maximalwerten des Erregerstromes Steuerdaten gebildet, die in Abhängigkeit der Systemparameter in einem Speicher abgespeichert werden. Bei einer Änderung der Systemparameter wird der nächste Einschaltzeitpunkt des Elektromagneten nach Maßgabe der den momentanen Systemparametern entsprechenden abgespeicherten Steuerdaten vorgesteuert, d. h. vorgegeben und anschließend nachgeregelt.

**[0019]** Bei einem Aktuator mit zwei einander gegenüberliegenden Elektromagneten, die gegen die Kraft zweier Ventiltfedern auf den Anker wirken, ist es ausreichend, die Auftreffgeschwindigkeit des Ankers auf einen der beiden Elektromagnete anhand der Induktivitätsänderung dieses Elektromagneten zu erfassen, da der Anker bei korrekt eingestellter Gleichgewichtslage auf beide Elektromagnete mit im wesentlichen gleicher Geschwindigkeit auftrifft. Vorteilhafterweise wird

Auftreffgeschwindigkeit des Ankers auf beide Elektromagnete in gleicher Weise geregelt, da dann eine genaue Einhaltung der Gleichgewichtslage des Ankers nicht mehr erforderlich ist.

**[0020]** Die Erfindung wird im folgenden anhand eines Ausführungsbeispiels unter Bezugnahme auf die Figuren näher beschrieben: Es zeigen:

Figur 1 einen elektromagnetischen Aktuator zur Betätigung eines Gaswechselventils,

Figur 2 ein Zeitdiagramm eines Ventilhubs und zweier durch jeweils einen von zwei Elektromagneten des Aktuators fließenden Erregerströme.

**[0021]** Gemäß Figur 1 umfaßt der Aktuator einen mit einem Gaswechselventil 5 in Kraftwirkung stehenden Stößel 4, einen mit dem Stößel 4 quer zur Stößel-Längsachse befestigten Anker 1, einen als Schließmagnet wirkenden Elektromagneten 2 sowie einen als Öffnungsmagnet wirkenden weiteren Elektromagneten 3, der vom Schließmagnet 2 Richtung der Stößel-Längsachse beabstandet angeordnet ist. Die Elektromagnete 2, 3 sind mittels eines Gehäuseteils 7 miteinander verbunden; sie weisen jeweils eine Erregerspule 20 bzw. 30 und einander gegenüberliegende Polflächen 21 bzw. 31 auf, zwischen denen der Anker 1 durch abwechselnde Bestromung der beiden Elektromagnete 2, 3, d. h. der Erregerspulen 20 bzw. 30, hin- und herbewegt wird. Zwei gegensinnig wirkende Ventiltfedern 60, 63, die zwischen dem Öffnungsmagnet 3 und dem Gaswechselventil 5 angeordnet sind und mit zwei Federtellern 61, 62 am Aktuator bzw. Zylinderkopfteil 8 der Brennkraftmaschine befestigt sind, bewirken, daß der Anker 1 im stromlosen Zustand der Erregerspulen 20, 30 in einer Gleichgewichtslage etwa in der Mitte zwischen den Polflächen 21, 31 der Elektromagnete 2, 3 festgehalten wird.

**[0022]** Zum Starten des Aktuators wird einer der Elektromagnete 2, 3 durch Anlegen einer Erregerspannung an die entsprechende Erregerspule 20 bzw. 30 bestromt, d. h. eingeschaltet, oder es wird eine Anschwingroutine initiiert, durch die der Anker 1 zunächst durch wechselweises Bestromen der Elektromagnete 2, 3 in Schwingung versetzt wird, um nach einer Einschwingzeit auf die Polfläche 21 des Schließmagneten 2 oder die Polfläche 31 des Öffnungsmagneten 3 aufzutreffen.

**[0023]** Bei geschlossenem Gaswechselventil 5 liegt der Anker 1 an der Polfläche 21 des Schließmagneten 2 an und er wird solange in dieser Position festgehalten, solange der Schließmagnet 2 bestromt wird. Um das Gaswechselventil 5 zu öffnen wird der Schließmagnet 2 abgeschaltet und anschließend der Öffnungsmagnet 3 eingeschaltet. Die in Öffnungsrichtung wirkende Ventiltfeder 60 beschleunigt den Anker 1 über die Gleichgewichtslage hinaus. Durch den nun bestromten

Öffnungsmagneten 3 wird dem Anker 1 zusätzlich kinetische Energie zugeführt, so daß dieser trotz etwaiger Reibungsverluste die Polfläche 31 des Öffnungsmagneten 3 erreicht und dort bis zur Abschaltung des Öffnungsmagneten 3 festgehalten wird. Zum erneuten Schließen des Gaswechselventils 5 wird der Öffnungsmagnet 3 ausgeschaltet und der Schließmagnet 2 anschließend wieder eingeschaltet. Hierdurch wird der Anker 1 zur Polfläche 21 des Schließmagneten 2 bewegt und dort festgehalten.

**[0024]** Der Abstand des Ankers 1 zum jeweiligen Elektromagnet 2, 3 legt die Induktivität dieses Elektromagneten 2 bzw. 3 fest; die Geschwindigkeit des Ankers 1 läßt sich somit anhand der Induktivitätsänderung der Elektromagnete 2, 3 ermitteln.

**[0025]** Im folgenden wird lediglich die Regelung der Auftreffgeschwindigkeit des Ankers 1 auf den Schließmagneten 2 beschrieben; die Regelung der Auftreffgeschwindigkeit des Ankers 1 auf den Öffnungsmagneten 3 wird in gleicher Weise vorgenommen.

**[0026]** Gemäß Figur 2 befindet sich das Gaswechselventil 5 bis zum Zeitpunkt  $t_{m2}$  in einer Offenstellung  $s_0$ , d. h. der Anker 1 liegt an der Polfläche 31 des Öffnungsmagneten 3 an. Zum Zeitpunkt  $t_{m2}$  wird der Öffnungsmagnet 3 abgeschaltet und anschließend zum Zeitpunkt  $t_n$  der Schließmagnet 2 eingeschaltet. Der Anker 1 löst sich somit vom Öffnungsmagneten 3 und bewegt sich in Richtung Schließmagnet 2, wodurch der Ventilhub  $s$  abnimmt. Der Erregerstrom  $I_3$  des Öffnungsmagneten 3 fällt dabei auf Null ab; der Erregerstrom  $I_2$  des Schließmagneten 2 steigt hingegen von Null bis zu einem lokalen Maximalwert  $I_{20}$  an, den er zum Zeitpunkt  $t_{n0}$  erreicht, und fällt daraufhin auf einen lokalen Minimalwert  $I_{21}$  ab, den er zum Zeitpunkt  $t_{n1}$  des Auftreffens des Ankers 1 auf den Schließmagneten 2 erreicht. Anschließend steigt der Erregerstrom  $I_2$  nochmals steil an und fällt danach auf einen Haltewert  $I_{22}$  ab, welcher beispielsweise durch Pulsweitenmodulation der Erregerspule 21 zugeführten Erregerspannung vorgegeben wird.

**[0027]** Die Geschwindigkeit mit der der Erregerstrom  $I_2$  im Zeitintervall  $t_{n0} \dots t_{n1}$  abnimmt, hängt von der Ankergeschwindigkeit ab, und zwar ist die Stromabnahme  $\Delta I$  für große Ankergeschwindigkeiten größer als für kleine Ankergeschwindigkeiten. Die Entstehung dieser Stromabnahme  $\Delta I$  läßt sich anhand folgender Gleichung erklären:

$$u(t) = i(t) \cdot R_{Cu} + \frac{d\Psi}{dt}$$

**[0028]** Dabei steht  $u(t)$  für die dem Schließmagneten 2 zugeführte Erregerspannung,  $i(t)$  für den Erregerstrom  $I_2$  des Schließmagneten 2, der aufgrund der angelegten Erregerspannung  $u(t)$  durch die Erregerspule 20 fließt,  $R_{Cu}$  für den ohmschen Widerstand der Erregerspule 20 und  $d\Psi/dt$  für die induzierte Gegenspannung, d. h. für die zeitliche Ableitung des verketteten magnetischen Flusses  $\Psi(t)$ . Für letzteren gilt die

Beziehung  $\Psi(t) = i(t) \cdot L(t)$ , wobei  $L(t)$  für die Induktivität des Schließmagneten 2 steht, so daß man für die induzierte Gegenspannung  $d\Psi/dt$  folgende Gleichung erhält:

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{di(t)}{dt} \cdot L(t) + i(t) \cdot \frac{dL}{dx} \cdot \frac{dx}{dt}$$

**[0029]** Mit  $x$  wird dabei der Hubweg des Ankers 1 bzgl. des Schließmagneten 2 bezeichnet, d. h. der Abstand zwischen der Polfläche 21 des Schließmagneten 2 und dem Anker 1. Eine Bewegung des Ankers 1 in Richtung des Schließmagneten 2 liefert somit einen positiven Beitrag zur induzierten Gegenspannung  $d\Psi/dt$ , der um so größer ist, je größer der Betrag der zeitlichen Änderung  $dx/dt$  des Abstandes  $x$ , d. h. die Ankergeschwindigkeit, ist. Aufgrund der während der Bewegungsphase des Ankers 1 konstant gehaltenen Erregerspannung  $u(t)$  nimmt der Erregerstrom  $i(t)$  nach Erreichung des lokalen Maximums  $I_{20}$  mit einer von der Ankergeschwindigkeit  $dx/dt$  abhängigen Geschwindigkeit ab. Die Geschwindigkeit der Stromabnahme  $\Delta I$  des Erregerstromes  $I_2$  ist somit eine Funktion der Auftreffgeschwindigkeit des Ankers 1 auf den Schließmagneten 2. Sie läßt sich auf verschiedene Arten ermitteln: eine Möglichkeit besteht darin, den Erregerstrom  $I_2$  abzutasten, numerisch zu differenzieren und den kleinsten der so erhaltenen Werte zu bestimmen; sie läßt sich aber auch näherungsweise durch Detektion des lokalen Maximums  $I_{20}$  und des darauffolgenden lokalen Minimums  $I_{21}$  und durch Berechnung der Steigung einer durch das lokale Maximum  $I_{20}$  und durch das lokale Minimum  $I_{21}$  durchgehenden Geraden ermitteln.

**[0030]** Um die Auftreffgeschwindigkeit des Ankers 1 auf den Schließmagneten 2 zu regeln, wird eine Regelgröße  $v_{IST}$  gebildet, die der Geschwindigkeit der Stromabnahme  $\Delta I$  des Erregerstromes  $I_2$  entspricht, die Regelgröße  $v_{IST}$  mit einem Sollwert  $v_{SOLL}$  verglichen und der nächste Einschaltzeitpunkt des Schließmagneten 2 in Abhängigkeit des Vergleichsergebnisses vorgegeben. Es handelt sich hierbei um eine iterativ lernende Regelung, die nach folgendem Algorithmus abläuft:

$$T_{n+1} = T_n + k \cdot (v_{SOLL} - v_{IST})$$

**[0031]**  $T_n$  und  $T_{n+1}$  stellen dabei die Einschaltzeitpunkte des Schließmagneten 2 in aufeinanderfolgenden Zyklen dar; sie werden jeweils in Bezug auf einen definierten Referenzzeitpunkt des jeweiligen Zyklus angegeben. Als Zyklus wird dabei der Vorgang zwischen zwei aufeinanderfolgenden Öffnungs- oder Schließvorgängen des Gaswechselventils 5 bezeichnet. Ferner stellt  $n$  eine Zyklusnummer,  $k$  einen Proportionalitätsfaktor und  $v_{SOLL} - v_{IST}$  das Ergebnis des Vergleichs der Regelgröße  $v_{IST}$  mit dem Sollwert  $v_{SOLL}$  dar.

**[0032]** Im vorliegenden Beispiel handelt es sich bei den Referenzzeitpunkten der jeweiligen Zyklen um die Abschaltzeitpunkte  $t_{m2}$ ,  $t_{m+1,2}$  des Öffnungsmagneten 3, so daß mit den Bezeichnungen aus Figur 2 gilt:

$$T_n = t_n - t_{m2}$$

$$T_{n+1} = t_{n+1} - t_{m+1,2}.$$

**[0033]** Der Sollwert  $v_{SOLL}$  der Regelgröße  $v_{IST}$  ist derjenige Wert der Regelgröße  $v_{IST}$ , der bei einem vorgegebenen, d. h. geforderten Wert der Auftreffgeschwindigkeit des Ankers 1 auf den Schließmagneten 2 gemessen wird. Er kann in Abhängigkeit verschiedener Systemparameter, insbesondere in Abhängigkeit der Reibung des Gaswechselventils 5 und der beweglichen Teile des Aktuators, der Temperatur des Schmiermittels, des Druck in der Brennkammer zum Zeitpunkt des Öffnens des Gaswechselventils 5 und der Einschaltzeitpunkte der Elektromagnete 2, 3, variieren. Der Sollwert  $v_{SOLL}$  wird daher vorteilhafterweise in Abhängigkeit dieser Systemparameter, die mittels geeigneter Sensoren oder anhand von Kennlinienfeldern ermittelt werden, dynamisch vorgegeben.

**[0034]** Durch schrittweises Verschieben der Einschaltzeitpunkte  $T_n$ ,  $T_{n+1}$  des Schließmagneten 2 wird dem Anker 1 mit jedem Zyklus jeweils mehr oder weniger kinetische Energie zugeführt, wodurch die Auftreffgeschwindigkeit des Ankers 1 auf den Schließmagneten 2 zu- bzw. abnimmt. Dementsprechend ist die Stromabnahme  $\Delta I$  von Zyklus zu Zyklus stärker bzw. weniger stark ausgeprägt. Somit wird ein Lernen von Zyklus zu Zyklus gewährleistet.

**[0035]** Die Anwendung dieses Algorithmus setzt eine zyklische Arbeitsweise mit sich wiederholenden Prozeßabläufen voraus, wobei diese nicht streng periodisch erfolgen müssen. Demnach wird der Algorithmus nur dann eingesetzt, wenn die Systemparameter (Reibung, Temperatur, Druck in der Brennkammer) sich von Zyklus zu Zyklus nicht oder nur wenig ändern. In stark zyklusvarianten Phasen wird vorteilhafterweise vorgesteuert, d. h. die Systemparameter werden ermittelt und die Einschaltzeitpunkte  $T_{n+1}$  für die jeweils folgenden Zyklen werden zunächst in Abhängigkeit der Systemparameter vorgegeben und anschließend nachgeregelt. Ist die Aufprallgeschwindigkeit in einer zyklusinvarianten Phase auf den vorgegebenen Wert eingeregelt, läßt sich der Einschaltzeitpunkt  $T_{n+1}$  in Abhängigkeit der Systemparameter als Steuerdaten in einer Speichereinheit abspeichern und zur Vorsteuerung bei gleichen Systemparametern verwenden. Hierdurch wird eine adaptive Vorsteuerung realisiert.

**[0036]** Im vorliegenden Beispiel wird die Wirkung der Induktivitätsänderung der Elektromagnete 2 und 3 auf den Erregerstrom  $I_2$  bzw.  $I_3$  ausgewertet. Da zwischen dem Bewegungsverlauf des Ankers 1 und dem Induktivitätsverlauf der Elektromagnete 2, 3 ein funktionaler Zusammenhang besteht, der sich ohne weiteres, beispielsweise anhand einer Meßreihe, ermitteln läßt, kann die Auftreffgeschwindigkeit des Ankers 1 auf die Elektromagnete 2, 3 auch dadurch geregelt werden, daß der Induktivitätsverlauf des jeweiligen Elektromagneten 2 bzw. 3 ermittelt wird, hieraus der Bewegungs-

verlauf des Ankers 1 bestimmt wird und aus diesem Bewegungsverlauf die Geschwindigkeit des Ankers 1 zum Zeitpunkt des Auftreffens auf den jeweiligen Elektromagneten 2 bzw. 3 ermittelt und als Regelgröße  $v_{IST}$  bereitstellt wird.

**[0037]** Im folgenden werden verschiedene Möglichkeiten zur Ermittlung der Induktivität des Schließmagneten 2 aufgezeigt; die Induktivität des Öffnungsmagneten 3 läßt sich selbstverständlich auf die gleiche Weise ermitteln.

**[0038]** Wie bereits ausgeführt gilt für die Erregerspannung  $u(t)$  des Schließmagneten 2 folgende Gleichung

$$u(t) = i(t) \cdot R_{Cu} + \frac{d\Psi}{dt}.$$

**[0039]** Hieraus erhält man durch Integration nach der Zeit den verketteten magnetischen Fluß

$$\Psi(t) = \int_0^t (u(\tau) - i(\tau) \cdot R_{Cu}) d\tau + C.$$

**[0040]** Mit  $\Psi(t) = i(t) \cdot L(t)$  und der Randbedingung  $\Psi(0) = C = 0$  ergibt sich für die Induktivität folglich

$$L(t) = \frac{\int_0^t (u(\tau) - i(\tau) \cdot R_{Cu}) d\tau}{i(t)}$$

für  $i(t) \neq 0$ . Der Induktivitätsverlauf  $L(t)$  des Schließmagneten 2 läßt sich somit aus den zeitlichen Verläufen der Erregerspannung  $u(t)$  und Erregerstromes  $i(t)$  berechnen.

**[0041]** Ferner läßt sich der Induktivitätsverlauf  $L(t)$  des Schließmagneten 2 auch durch Messung der Resonanzfrequenz eines mittels einer Kapazität und dem Schließmagneten 2 gebildeten LC-Schwingkreises ermitteln. Die mittlere Resonanzfrequenz wird hierbei durch die Wahl der Kapazität wird so hoch gewählt, daß die Bewegung des Ankers 1 hinreichend genau aufgelöst wird und die Ankerposition sich während einer Schwingungsperiode nur minimal ändert. Beispielsweise erhält man bei einer Flugzeit, d. h. Bewegungszeit des Ankers 1 von ca. 3,5 ms und einer mittleren Resonanzfrequenz von etwa 14 kHz 50 Schwingungsperioden und somit 50 Werte für die Ankerposition, mit denen die Bewegung des Ankers 1 bei einem Ventilhub von ca. 7 mm ausreichend genau aufgelöst wird.

**[0042]** Der Induktivitätsverlauf des Schließmagneten 2 läßt sich auch durch Messung von dessen komplexen Widerstandes ermitteln. Hierzu wird der dem schließmagneten 2 zugeführten Erregerspannung  $u(t)$

eine hochfrequente Meßspannung als Meßsignal überlagert und der durch die Meßspannung bewirkte Anteil des Erregerstromes  $i(t)$  anhand seiner Frequenz detektiert und nach Betrag und Phasenlage ausgewertet. Das Verhältnis aus der Meßspannung und dem der Meßspannung entsprechenden Anteil des Erregerstromes ergibt einen komplexen Zahlenwert — den aus einem ohmschen und einem imaginären Anteil bestehenden komplexen Widerstand des Elektromagneten — aus dessen imaginärem Anteil die momentane Induktivität des Schließmagneten 2 hergeleitet wird.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben eines elektromagnetischen Aktuators zur Betätigung eines Gaswechselventils (5), bei dem der Aktuator mit mindestens einem Elektromagneten (2, 3) über einen Anker (1) gegen die Kraft mindestens einer Ventillfeder (60, 63) auf das Gaswechselventil (5) wirkt und dieses durch Bewegung des Ankers (1) betätigt, dadurch gekennzeichnet, daß eine von einer Induktivitätsänderung des Elektromagneten (2, 3) abhängige Regelgröße ( $v_{IST}$ ) als Maß der Auftreffgeschwindigkeit des Ankers (1) auf den Elektromagneten (2, 3) gebildet wird und daß die Regelgröße ( $v_{IST}$ ) durch Steuerung der Energiezufuhr zum Elektromagneten (2, 3) auf einen Sollwert ( $v_{SOLL}$ ) geregelt wird, den sie bei einem vorgegebenen Wert der Auftreffgeschwindigkeit des Ankers (1) auf den Elektromagneten (2, 3) annimmt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zur Bildung der Regelgröße ( $v_{IST}$ ) die Geschwindigkeit einer während der Ankerbewegung auftretenden Stromabnahme ( $\Delta I$ ) eines durch den Elektromagneten fließenden Erregerstromes ( $I_2, I_3$ ) ermittelt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zur Bildung der Regelgröße ( $v_{IST}$ ) der zeitliche Verlauf der Induktivität des Elektromagneten (2, 3) ermittelt wird.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß der zeitliche Verlauf der Induktivität des Elektromagneten (2, 3) aus dem zeitlichen Verlauf einer dem Elektromagneten zugeführten Erregerspannung ( $u(t)$ ) und dem zeitlichen Verlauf eines durch den Elektromagneten (2, 3) fließenden Erregerstromes ( $i(t)$ ) ermittelt wird.
5. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß der zeitliche Verlauf der Induktivität des Elektromagneten (2, 3) aus dem Verlauf der Resonanzfrequenz eines aus dem Elektromagneten (2, 3) und einer Kapazität gebildeten LC-Schwingkreises ermittelt wird.
6. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß der zeitliche Verlauf der Induktivität des Elektromagneten (2, 3) aus dem Verlauf eines mittels eines hochfrequenten Meßsignals erfaßten komplexen Widerstandes des Elektromagneten (2, 3) ermittelt wird.
7. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Energiezufuhr zum Elektromagneten (2, 3) gesteuert wird, indem die Regelgröße ( $v_{IST}$ ) mit einem vorgegebenen Sollwert ( $v_{SOLL}$ ) verglichen wird und ein nächster Einschaltzeitpunkt ( $T_{n+1}$ ) des Elektromagneten (2, 3) in Abhängigkeit des Vergleichsergebnisses vorgegeben wird.
8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Sollwert ( $v_{SOLL}$ ) der Regelgröße ( $v_{IST}$ ) in Abhängigkeit von Systemparametern vorgegeben wird.
9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Einschaltzeitpunkte ( $T_n, T_{n+1}$ ) des Elektromagneten (2, 3) in Abhängigkeit von Systemparametern vorgegeben werden.
10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß ein nächster lokaler Maximalwert ( $I_{20}$ ) des Erregerstroms ( $I_2, I_3$ ) in Abhängigkeit von Systemparametern vorgegeben wird.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß aus den sich bei verschiedenen Systemparametern einstellenden Einschaltzeitpunkten ( $T_n$ ) des Elektromagneten (2, 3) Steuerdaten gebildet werden, die in Abhängigkeit der Systemparameter abgespeichert werden, und daß bei einer Änderung der Systemparameter der nächste Einschaltzeitpunkt ( $T_{n+1}$ ) des Elektromagneten (2, 3) nach Maßgabe der den momentanen Systemparametern entsprechenden abgespeicherten Steuerdaten vorgesteuert wird.
12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Steuerdaten aus den sich bei verschiedenen Systemparametern ergebenden lokalen Maximalwerten ( $I_{20}$ ) des Erregerstroms ( $I_2, I_3$ ) gebildet werden.
13. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Aktuator mit zwei einander gegenüberliegenden Elektromagneten (2, 3) gegen die Kraft zweier Ventillfedern (60, 63) auf den Anker (1) wirkt.
14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Auftreffgeschwindigkeiten des Ankers (1) auf die beiden Elektromagnete (2, 3)

jeweils in gleicher Weise geregelt werden.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

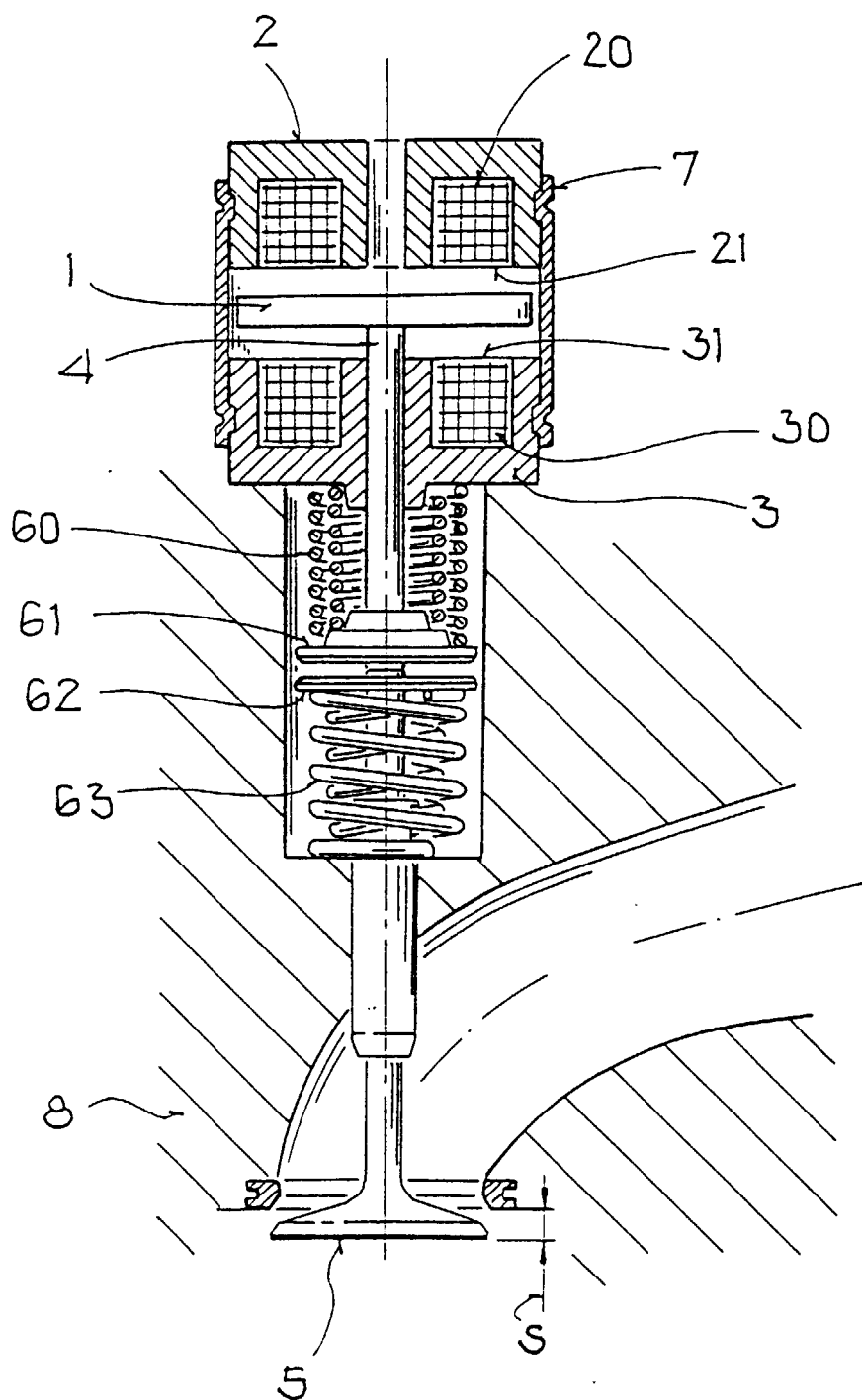


FIG. 1



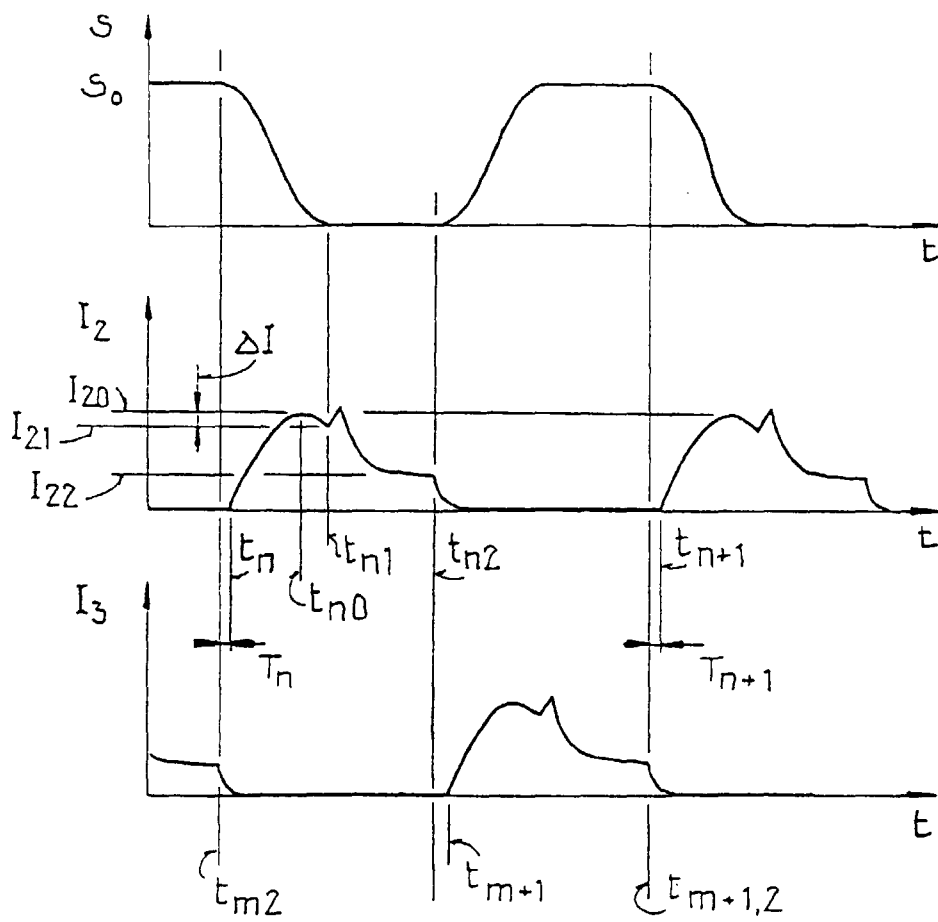


FIG.2