



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11) EP 0 936 636 A2

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
18.08.1999 Patentblatt 1999/33

(51) Int. Cl.⁶: H01F 7/08, H01F 3/10

(21) Anmeldenummer: 98124681.2

(22) Anmeldetag: 24.12.1998

(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

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

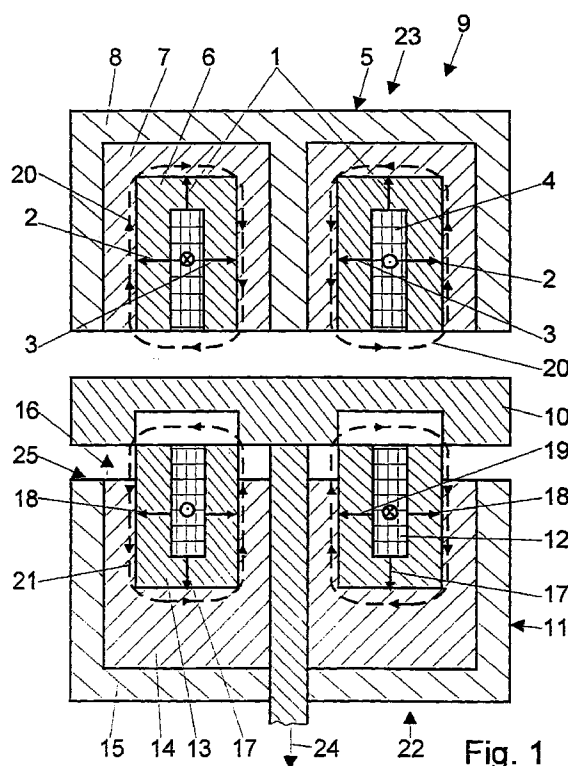
(72) Erfinder:
• Gander, Hans
72574 Bad Urach (DE)
• Kirschbaum, Frank
70327 Stuttgart (DE)

(30) Priorität: 10.02.1998 DE 19805171

(54) **Elektromagnet**

(57) Die Erfindung geht aus von einem Elektromagnet mit einer Spule und einem Spulenkern, der aus zumindest zwei ferromagnetischen Materialien besteht.

Es wird vorgeschlagen, daß in Diffusionsrichtung des Magnetfelds der Spule der Spulenkern unterschiedliche Materialien aufweist, wobei die in Diffusionsrichtung näher bei der Spule liegenden Materialien eine kleinere Sättigungsflußdichte B_S haben, die bei einer kleineren Feldstärke H_S erreicht werden als die Materialien, die weiter von der Spule entfernt sind.



EP 0 936 636 A2

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen Elektromagneten nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

[0002] Um möglichst starke elektromagnetische Felder zu erzeugen, werden in der Regel Elektromagnete mit einer Spule und einem ferromagnetischen Kern verwendet. Der Kern befindet sich in der Spule und/oder umgibt diese. Wird ein Strom durch die Spule geleitet, baut sich gemäß dem Durchflutungsgesetz um die Spule ein Magnetfeld mit der Feldstärke H auf. Unter der Kraftwirkung des Magnetfelds orientieren sich die im Kernmaterial vorhandenen magnetischen Dipole in Feldrichtung und erhöhen so die magnetische Flußdichte bzw. Induktion im Vergleich zu einer Luftspule von B_0 auf B . Die resultierende Flußdichte ist damit von der Feldstärke H abhängig. Der funktionale Zusammenhang wird durch die nichtlineare Magnetisierungskurve $B = \mu(H) \cdot H$ beschrieben. In der Spule wirkt eine Selbstinduktion, so daß der Strom und die davon abhängige Feldstärke H verzögert ansteigt. Ferner wird der Aufbau des Magnetfelds durch entstehende Wirbelströme im Kernmaterial verzögert, die die Diffusion des Magnetfelds in den Kern behindern und zu Verlusten führen.

[0003] Um eine kurze Ansprechzeit bei einem Elektromagneten zu erreichen, sollte das elektromagnetische Feld schnell aufgebaut und auch wieder abgebaut werden und trotz geringen Abmessungen des Elektromagneten eine große Endkraft ergeben. Dies ist insbesondere bei sehr dynamischen Systemen wichtig, wie z.B. bei Aktuatoren zur Betätigung von Gaswechselventilen von Brennkraftmaschinen. Elektromagnetische Aktuatoren zur Betätigung von Gaswechselventilen besitzen in der Regel zwei Schaltmagnete, einen Öffnungsmagneten und einen Schließmagneten mit jeweils einer Spule und einem Kern, zwischen deren Polflächen ein Anker coaxial zu einer Ventilachse verschiebbar angeordnet ist. Der Anker wirkt über einen Ankerstößel auf einen Ventilschaft des Gaswechselventils. Bei Aktuatoren nach dem Prinzip des Massenschwingers wirkt ein vorgespannter Federmechanismus auf den Anker. Als Federmechanismus dienen meist zwei vorgespannte Druckfedern, und zwar eine obere und eine untere Ventiltfeder. Die obere Ventiltfeder belastet in Öffnungsrichtung und die untere Ventiltfeder in Schließrichtung des Gaswechselventils. Bei nicht erregten Magneten wird der Anker durch die Ventiltfedern in einer Gleichgewichtslage zwischen den Magneten gehalten.

[0004] Wird der Aktuator beim Start aktiviert, wird entweder der Schließmagnet oder der Öffnungsmagnet kurzzeitig übererregt oder der Anker mit einer Anschwingroutine mit seiner Resonanzfrequenz ange-regt, um aus der Gleichgewichtslage angezogen zu werden. In geschlossener Stellung des Gaswechselventils liegt der Anker an der Polfläche des erregten Schließmagneten an und wird von diesem gehalten.

Der Schließmagnet spannt die in Öffnungsrichtung wirkende Ventiltfeder weiter vor. Um das Gaswechselventil zu öffnen, wird der Schließmagnet ausgeschaltet und der Öffnungsmagnet eingeschaltet. Die in Öffnungsrichtung wirkende Ventiltfeder beschleunigt den Anker über die Gleichgewichtslage hinaus, so daß dieser von dem Öffnungsmagneten angezogen wird. Der Anker schlägt an die Polfläche des Öffnungsmagneten an und wird von dieser festgehalten. Um das Gaswechselventil wieder zu schließen, wird der Öffnungsmagnet ausgeschaltet und der Schließmagnet eingeschaltet. Die in Schließrichtung wirkende Ventiltfeder beschleunigt den Anker über die Gleichgewichtslage hinaus zum Schließmagneten. Der Anker wird vom Schließmagneten angezogen, schlägt auf die Polfläche des Schließmagneten auf und wird von diesem festgehalten.

[0005] Die Flugzeit des Ankers zwischen dem Öffnungsmagneten und dem Schließmagneten ist sehr kurz und reicht meist nicht, daß der Kern des fangenden Magneten vollständig vom Magnetfeld der Spule durchsetzt ist, nachdem an diese eine Spannung angelegt wurde. Um zu erreichen, daß der Kern vom Magnetfeld vollständig durchsetzt bzw. der Magnet eine ausreichende Anziehungskraft erreicht hat, sobald der Anker in dessen Wirkungsbereich kommt, muß der fangende Magnet aktiviert werden bevor sich der Anker vom haltenden Magneten löst. Dies führt zu unnötigem Energieaufwand. Ferner kann mit den meist relativ träg ansprechenden Magneten nicht auf abrupt auftretende Störgrößen reagiert werden.

[0006] Es ist bekannt, Eisenkerne aus gegeneinander isolierten, dünnen Blechen aufzubauen, deren Berührungsflächen quer zu den elektrischen Feldlinien liegen, d.h. senkrecht zur Wicklung der Spule (vgl. H. Linse, Elektrotechnik für Maschinenbauer, 8., überarbeitete Auflage, Teubner 1987, S. 66 ff). Dadurch treten in den einzelnen Blechen nur kleine Spannungen und damit kleine Wirbelströme auf.

[0007] Ferner ist aus der DE 37 29 418 A1 bekannt, einen Spulenkern in Längsrichtung nebeneinander aus verschiedenen Materialien herzustellen. Der Spulenkern besteht aus einem Verbundkörper, der aus zumindest zwei mechanisch verspannten Materialien besteht, von denen mindestens eines ferromagnetisch ist und in Richtung der Längsachse anisotropische, weichmagnetische Eigenschaften besitzt. Dem Verbundkörper wird ein weichmagnetischer Körper zugeordnet, welcher eine niedrigere Koerzitivfeldstärke als der ferromagnetische Teil des Verbundkörpers aufweist und mit diesem magnetostatisch ausreichend gekoppelt ist. Durch die mechanischen Spannungen im Verbundkörper entsteht in Längsrichtung des Spulenkerns eine magnetische Vorzugsrichtung. Wirkt auf den Spulenkern ein äußeres Magnetfeld, ändert sich die Magnetisierungsrichtung im Verbundkörper mehr oder weniger sprunghaft, wenn eine bestimmte Feldstärke überschritten oder unterschritten wird, wodurch Impulse erzeugt werden können.

[0008] Durch den zusätzlichen weichmagnetischen Körper können in einem Hysteresiszyklus zwei Impulse erzeugt werden. Ferner können auch kurze Spulenkerns verwendet werden.

[0009] Die Aufgabe der Erfindung besteht darin, einen Elektromagneten zu entwickeln, der möglichst in kurzer Zeit eine große Anziehungskraft bzw. Haltekraft erzeugt, um dadurch insbesondere bei einem Aktuator zur Betätigung eines Gaswechselventils die Ventilbewegung besser steuern zu können. Die Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die Merkmale des Anspruchs 1 gelöst, während vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung den Unteransprüchen entnommen werden können.

[0010] Für die magnetische Flußdichte B gilt:

$$B = \mu \cdot H$$

H: Feldstärke

μ : Permeabilität

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

μ_0 : magnetische Feldkonstante, Permeabilität des Vakuums

μ_r : materialabhängige Permeabilitätszahl

[0011] Bei ferromagnetischen Materialien ist die Permeabilitätszahl $\mu_r(H)$ von der Feldstärke H abhängig, und zwar fällt sie bei einer bestimmten Feldstärke H_S ab. Die magnetische Flußdichte B steigt dadurch in einem ersten Bereich mit der Feldstärke H nahezu linear an und strebt ab einer Feldstärke H_S in einem zweiten nicht linearen Bereich eine Sättigungsflußdichte B_S zu. Die Erfindung geht von der Erkenntnis aus, daß bei einer Feldstärke H_S , bei der man sich im Bereich der Sättigungsflußdichte B_S befindet weniger Wirbelströme im Kernmaterial auftreten und dadurch die Diffusionsgeschwindigkeit v_D des Magnetfelds in das Kernmaterial um ein vielfaches größer ist als bei einer Feldstärke H, bei der man sich noch im linearen Bereich von B befindet. Für die Diffusionsgeschwindigkeit v_D gilt:

$$v_D \approx \sqrt{\frac{t}{\sigma \mu}}$$

[0012] Es werden um einen Faktor 200 bis 300 höhere Geschwindigkeitswerte erreicht (vgl. Feinwerktechnik & Messtechnik 90 (1982) 5, B. Aldefeld: Felddiffusion in Elektromagneten, S. 222 ff.). Ferner ist die Permeabilität μ bei Kernmaterialien mit einer geringeren Sättigungsflußdichte B_S insgesamt kleiner und damit die Diffusionsgeschwindigkeit größer.

[0013] Bei dem erfindungsgemäßen Spulenkern hat das in Diffusionsrichtung näher bei der Spule liegende Material, eine kleinere Sättigungsflußdichte B_S , die bei

einer kleineren Feldstärke H_S erreicht wird als das Material, das weiter von der Spule entfernt ist. Wird der Elektromagnet aktiviert bzw. an die Spule eine Spannung angelegt, entsteht durch eine Selbstinduktion in der Spule eine Spannung, die den Stromanstieg I und damit den Anstieg der Magnetfeldstärke H verzögert. Jedoch werden durch den erfindungsgemäßen Spulenkern schon in der Anstiegsphase der Magnetfeldstärke H, d.h. bei einer kleinen Magnetfeldstärke H_S die Sättigungsflußdichte B_S der in Diffusionsrichtung näher bei der Spule liegenden Materialien erreicht, damit eine kleine Permeabilität μ und eine hohe Diffusionsgeschwindigkeit v_D . Bezeichnet man den Bereich im Spulenkern als Diffusionsfront, bei dem die Flußdichte auf einen definierten kleinen Wert abgefallen ist, so sind vorzugsweise die Materialien in Diffusionsrichtung so auf den Verlauf der Magnetfeldstärke abgestimmt, daß an der Diffusionsfront stets eine kleine Permeabilität μ und eine hohe Diffusionsgeschwindigkeit v_D auftritt. Je mehr Materialien verwendet werden, desto besser können diese auf den Verlauf der Magnetfeldstärke abgestimmt werden, am besten mit unendlich vielen Materialien, beispielsweise durch stufenlose Materialübergänge in speziellen Legierungen.

[0014] Bei einer hohen Diffusionsgeschwindigkeit des Magnetfelds nimmt eine nach außen wirkende Fläche A des Elektromagneten schnell zu und damit die Anziehungskraft F.

[0015] Für die Anziehungskraft gilt:

$$F = \frac{B^2}{2\mu_0} \cdot A$$

[0016] Ferner ist aus der Gleichung zu entnehmen, daß die Materialien mit einer geringen Sättigungsflußdichte B_S eine geringere Endkraft F_E bewirken. Im Mittel kann jedoch durch die Wahl der Materialien mit höheren Sättigungsflußdichten B_S insgesamt eine ausreichende Endkraft F_E erreicht werden.

[0017] In einer Ausgestaltung der Erfindung wird vorgeschlagen, den erfindungsgemäßen Elektromagneten bei einem Aktuator zu verwenden, mit dem wie oben beschrieben, ein Gaswechselventil einer Brennkraftmaschine über einen Anker betätigt wird. Durch den schnelleren Kraftaufbau kann der Elektromagnet später aktiviert werden, beispielsweise erst nachdem sich der Anker von einem gegenüberliegenden, bislang haltenden Magneten gelöst hat, wodurch Energie eingespart wird. Ferner kann durch die kürzere Ansprechzeit des Elektromagneten die Ventilbewegung exakter geregelt werden, insbesondere kann auf möglicherweise auftretende Störungen schneller reagiert werden.

[0018] Damit ein fangender Elektromagnet, beispielsweise der Öffnungsmagnet, möglichst früh mit einer möglichst großen Kraft auf den Anker wirkt, nachdem sich dieser von einem bislang haltenden Elektromagneten, dem Schließmagneten, abgelöst hat, ist es

bekannt, einen sogenannten „kennlinienbeeinflussten Elektromagneten“ (KLB-Magnet) einzusetzen. Der Spulenkern des KLB-Magneten weist vorzugsweise im Bereich der Spule in Richtung des entsprechend geformten Ankers eine Stufe auf, wodurch der Anker früher in das Magnetfeld des fangenden KLB-Magneten eintritt. Die Flugzeit des Ankers bis in das Magnetfeld des fangenden Magneten ist kürzer als bei einem zum Anker hin flachen Spulenkern bzw. flachen Polfläche. Damit der KLB-Magnet nach der kurzen Flugzeit schon ein möglichst starkes Magnetfeld aufgebaut hat und seine besondere Wirkung entfalten kann, muß dieser bei herkömmlichen Elektromagneten besonders früh aktiviert werden, d.h. bevor sich der Anker vom haltenden Elektromagneten löst, wodurch unnötige Energie verbraucht wird und die Gefahr entsteht, daß sich der Anker bei zusätzlich hinzutretenden Einflüssen leichter von der Polfläche des haltenden Magneten löst. Daher ist es besonders vorteilhaft einen KLB-Magneten entsprechend dem erfindungsgemäßen Elektromagneten mit einem schnellen Kraftaufbau auszuführen. Energie wird eingespart und die Gefahr vermindert, daß sich der Anker ungewollt zu früh löst. Möglich ist auch weitere, dem Fachmann bekannte Konstruktionen zur Erhöhung der Kraft oder Beschleunigung des Kraftaufbaus mit dem erfindungsgemäßen Elektromagneten zu kombinieren, wie beispielsweise mit einem aus gegeneinander isolierten Blechen aufgebauten Spulenkern, wie oben beschrieben.

[0019] Der erfindungsgemäße Elektromagnet kann neben dem Einsatz bei Aktuatoren für Gaswechselventile vorzugsweise in allen Anwendungsgebieten eingesetzt werden, bei denen ein möglichst schneller Kraftaufbau erforderlich ist.

[0020] Weitere Einzelheiten der Erfindung sowie die daraus resultierenden Vorteile sind der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen zu entnehmen. In der Beschreibung und in den Ansprüchen sind zahlreiche Merkmale im Zusammenhang dargestellt und beschrieben. Der Fachmann wird die Merkmale zweckmäßigerweise auch einzeln betrachten und zu weiteren sinnvollen Kombinationen zusammenfassen.

[0021] Es zeigen:

- Fig. 1 einen Ausschnitt eines Aktuators mit zwei Elektromagneten,
- Fig. 2 einen Stromverlauf über der Zeit,
- Fig. 3 einen Verlauf einer Magnetfeldstärke über der Zeit,
- Fig. 4 einen Verlauf einer Permeabilitätszahl über der Feldstärke bei einem ferromagnetischen Stoff,
- Fig. 5 drei Verläufe von Flußdichten von drei verschiedenen Materialien und
- Fig. 6 eine Variante nach Fig. 5.

[0022] Fig. 1 zeigt einen Ausschnitt eines Aktuators 9, der einen Öffnungsmagneten 22 und einen Schließma-

gneten 23 aufweist. Die Elektromagnete 22, 23 besitzen jeweils eine Spule 4, 12, die von einem Spulenkern 5, 11 umgeben ist. Wird an eine der Spulen 4, 12 eine Spannung angelegt, steigt der Strom I durch die Selbstinduktion verzögert an (Fig. 2). Um die Spule 4, 12 entsteht ein Magnetfeld 20, 21, dessen Feldstärke H entsprechend der Stromstärke I verzögert ansteigt (Fig. 3). Das Magnetfeld 20, 21 breitet sich ausgehend von der Spule 4, 12 in den Spulenkern 5, 11 aus, d.h. in dem Spulenkern 5, 11 werden vorhandene magnetische Dipole in Feldrichtung ausgerichtet, was auch als Diffusion bezeichnet wird.

[0023] Die Spulenkern 5, 11 weisen in Diffusionsrichtung 1, 2, 3, 17, 18, 19 unterschiedliche ferromagnetische Materialien 6, 7, 8, 13, 14, 15 auf. Ferromagnetische Materialien besitzen eine von der Feldstärke H abhängige Permeabilitätszahl μ_r , und zwar steigt diese zuerst bis zu einem Maximalwert an und fällt anschließend wieder ab (Fig. 4). Aus dem Zusammenhang

$$B = \mu_r \mu_0 H$$

ergibt sich daraus, daß die Flußdichte B ab einer bestimmten Feldstärke H_S , bei der die Permeabilitätszahl μ_r abfällt, sich an eine Sättigungsflußdichte B_S annähert (Fig. 5 und 6).

[0024] In den Fig. 5 und 6 ist beispielsweise für zwei verschiedene Materialkombinationen die Flußdichte B über der Feldstärke H aufgetragen, und zwar in Fig. 5 für den Schließmagneten 23 und in Fig. 6 für den Öffnungsmagneten 22. Je weiter das Material 6, 7, 8, 13, 14, 15 in Diffusionsrichtung 1, 2, 3, 17, 18, 19 von der Spule 5, 12 entfernt ist, desto größer ist seine Sättigungsflußdichte B_{S6} , B_{S7} , B_{S8} , B_{S13} , B_{S14} , B_{S15} , die jeweils in Diffusionsrichtung 1, 2, 3, 17, 18, 19 bei einer höheren Feldstärke H_{S6} , H_{S7} , H_{S8} , H_{S13} , H_{S14} , H_{S15} erreicht wird. Beim Schließmagneten 23 in Fig. 5 besitzen die Materialien 6, 7, 8 in Diffusionsrichtung 1, 2, 3 bei kleinen Feldstärken H jeweils eine größere Steigung der Flußdichte B, die Materialien 13, 14, 15 des Öffnungsmagneten 22 besitzen dagegen in Diffusionsrichtung 17, 18, 19 bei kleinen Feldstärken H jeweils eine kleinere Steigung der Flußdichte B, wobei eine Kombination zwischen den Materialien 13, 14, 15 des Öffnungsmagneten 22 und den des Schließmagneten 23 möglich ist. Eine Materialkombination in Diffusionsrichtung 1, 2, 3, 17, 18, 19 könnte beispielsweise Flußstahl, Baustahl und Armco-Eisen sein.

[0025] Die Diffusion besitzt eine Geschwindigkeit v_D , die von der Permeabilität μ und damit von der Permeabilitätszahl μ_r abhängig ist, und zwar:

$$v_D \approx \sqrt{\frac{t}{\sigma \mu}}$$

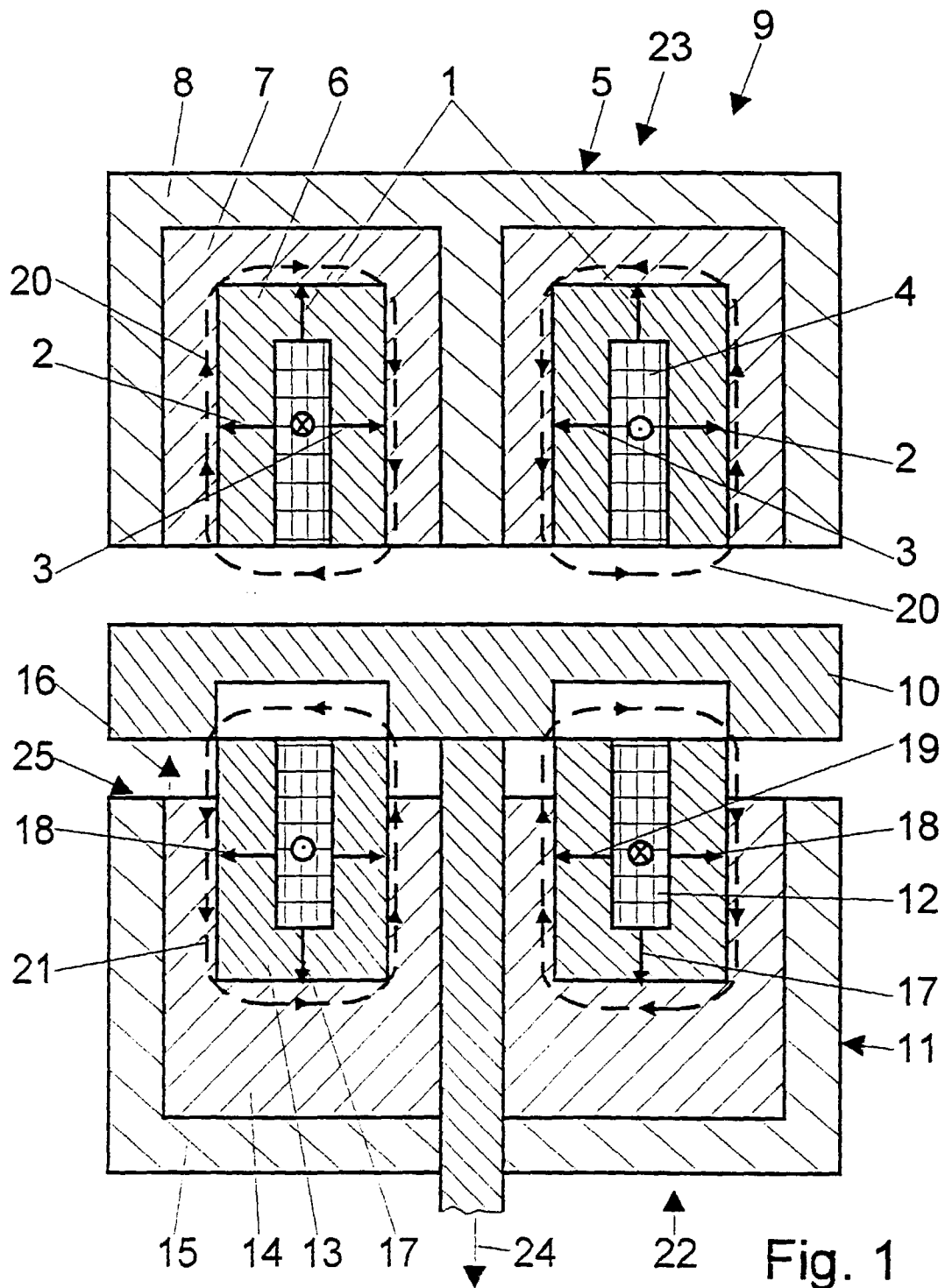
[0026] Die Diffusionsgeschwindigkeit v_D ist sehr groß

bei einer kleinen Permeabilitätszahl und damit im Sättigungsbereich eines Materials. Steigt die Feldstärke H entsprechend Fig. 3 an, wird schon früh, noch in der Anstiegsphase von H , die Feldstärke H_{S6} oder H_{S13} der Materialien 6, oder 13 erreicht und anschließend die der Materialien 7, 8 oder 14, 15. Schon in der Anstiegsphase von H werden dadurch besonders hohe Diffusionsgeschwindigkeiten V_D erreicht und damit ein besonders schneller Kraftaufbau.

[0027] In Öffnungsrichtung 24 muß beispielsweise bei einem Auslaßventil eine große Kraft aufgebracht werden, um das Ventil gegen einen Abgasdruck zu öffnen. Der Öffnungsmagnet 22 ist hierfür vorzugsweise als sogenannter Kennlinienbeeinflüßter-Magnet (KLB-Magnet) ausgeführt, d.h. der Öffnungsmagnet 22 besitzt eine gestufte Polfläche 25 bzw. ist in Richtung 16 des entsprechend geformten Ankers 10 gestuft ausgeführt. Dies wird vorzugsweise dadurch erreicht, daß die Spule 12 von Kernmaterial 13 umgeben in Richtung 16 des Ankers 10 versetzt angeordnet ist. Der Öffnungsmagnet 22 wirkt dadurch mit seinem Magnetfeld 21 früher auf den sich vom Schließmagneten 23 in Öffnungsrichtung 24 bewegendem Anker 10. Die Flugzeit des Ankers 10 vom Schließmagneten 23 bis in den Wirkungsbereich des Öffnungsmagneten 22 ist dadurch besonders kurz. Das Magnetfeld 21 muß schnell aufgebaut werden, wodurch ein erfindungsgemäßer Aufbau des Spulenkerns 11 mit verschiedenen Materialien 13, 14, 15 besonders vorteilhaft ist.

Patentansprüche

1. Elektromagnet mit einer Spule und einem Spulenkern, der aus zumindest zwei ferromagnetischen Materialien besteht, dadurch gekennzeichnet, daß in Diffusionsrichtung (1, 2, 3, 17, 18, 19) des Magnetfelds (20, 21) der Spule (4, 12) der Spulenkern (5, 11) unterschiedliche Materialien (6, 7, 8, 13, 14, 15) aufweist, wobei die in Diffusionsrichtung (1, 2, 3, 17, 18, 19) näher bei der Spule (4, 12) liegenden Materialien (6, 13) eine kleinere Sättigungsflußdichte B_S haben, die bei einer kleineren Feldstärke H_S erreicht werden als die Materialien (7, 8, 14, 15), die weiter von der Spule (4, 12) entfernt sind.
2. Elektromagnet nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch die Verwendung bei einem Aktuator (9), mit dem ein Gaswechselventil einer Brennkraftmaschine über einen Anker (10) betätigt wird.
3. Elektromagnet nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Spulenkern (11) in Richtung (16) des entsprechend geformten Ankers (10) gestuft ist. (KLB-Magnet)



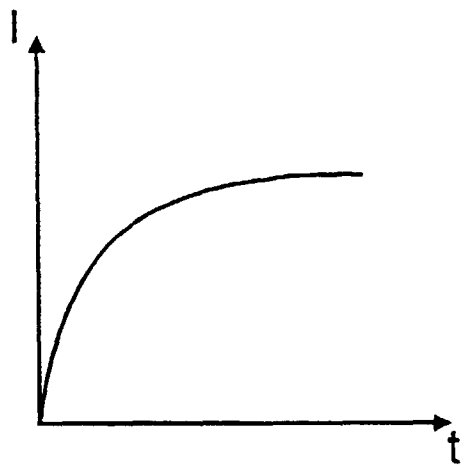


Fig. 2

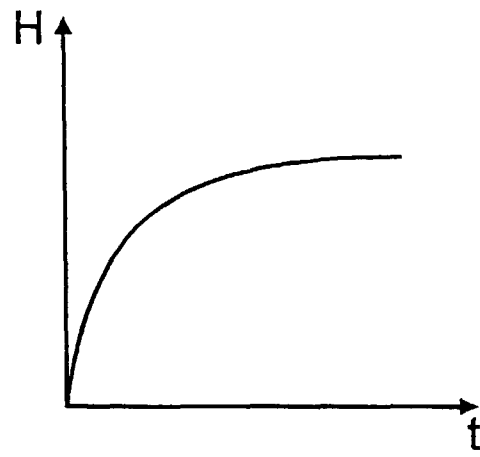


Fig. 3

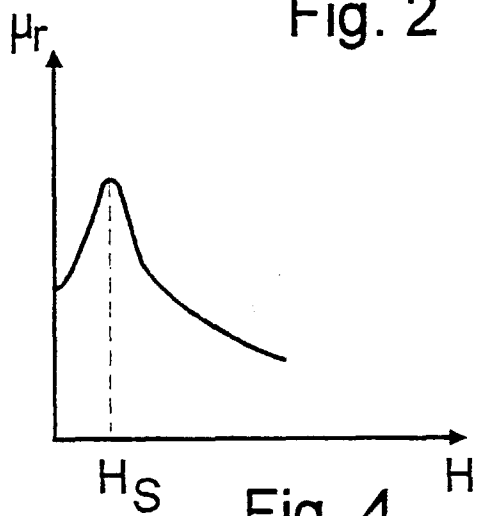


Fig. 4

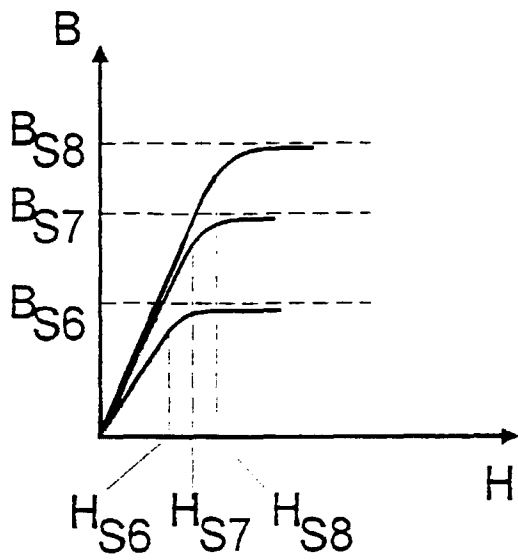


Fig. 5

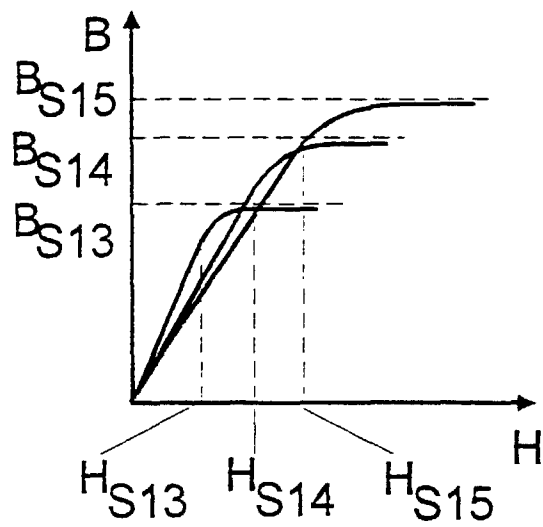


Fig. 6