

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung der Position eines Ankers, der einem elektromagnetischen Stellgerät zugeordnet ist, gemäß des Oberbegriffs des Patentanspruchs 1.

[0002] Der Stellantrieb ist einem elektromechanischen Stellgerät zugeordnet, das beispielsweise ein als Gaswechselventil einer Brennkraftmaschine ausgebildetes Stellglied hat. Ein derartiges Stellgerät hat also ein Gaswechselventil und einen Stellantrieb. Der Stellantrieb weist vorzugsweise zwei Elektromagnete auf, zwischen denen jeweils gegen die Kraft eines Rückstellmittels ein Anker durch Abschalten des Erregerspulenstroms des gerade haltenden Elektromagneten und Einschalten des Erregerspulenstroms des nun fangenden Elektromagneten bewegt werden kann.

[0003] Ein Verfahren zur Bestimmung der Position des Ankers ist aus DE 19836769 bekannt. In diesem Verfahren wird die Wegposition aus der zeitlichen Ableitung der Ströme durch die Erregerspule und der Spannungsabfälle an der Erregerspule an jeweils zwei Zeitpunkten ermittelt. Das Verfahren hat den Nachteil, dass für die genaue Ermittlung der Wegposition zeitlich stark veränderliche Spannungsabfälle erforderlich sind. Zusätzlich basiert die Auswertemethode auf einer Näherungsformel, die nur im Bereich großer Luftspalte ($> \sim 1 \text{ mm}$) genau ist und in dem für eine Regelung des Aktuators mit geringen Auftreffgeschwindigkeiten wichtigen Bereich kleiner Luftspalte große Ungenauigkeiten aufweist. Das Verfahren ist daher nur adaptiv regelbar und in einem geschlossenen Regelkreis ohne Adaption nur schwer realisierbar. Zusätzlich ist für eine zufriedenstellende Auswertung eine sehr frühe Bestromung der Erregerspule auf ein hohes Stromniveau erforderlich, die zu hohen elektrischen Verlusten führt.

[0004] Ein weiteres Auswerteverfahren benötigt eine Messspule, wie aus JP 7224624A bekannt, in welcher die Messspule zur Auswertung der Wegposition angewandt wird. Dieses Verfahren führt zu einem erhöhten Aufwand für Verkabelung und Kontaktierungstechnik und reduziert zusätzlich den zur Verfügung stehenden Wickelraum für die Erregerspule.

[0005] Der Erfindung liegt die Aufgabe zu Grunde, ein Verfahren zur Bestimmung der Position eines Ankers zu schaffen, das eine genauere Auswertung zulässt.

[0006] Diese Aufgabe wird durch die Merkmale des Anspruchs 1 gelöst.

[0007] Das erfindungsgemäße Verfahren hat den Vorteil, dass mit nur einer Erregerspule je Elektromagnet eine im Vergleich zu DE 19836769 genauere Auswertung der Wegposition realisiert wird. Im Gegensatz zum bekannten Verfahren ist nur die Auswertung des Absolutstromes erforderlich und auf eine Erfassung der Spannungsabfälle an der Erregerspule kann gegebenenfalls verzichtet werden. Zusätzlich kann mit dem Verfahren kontinuierlich die Position ausgewertet werden, d.h. der Auswertezeitpunkt ist nicht so zu wählen, dass hohe veränderliche Spannungsabfälle an der Erregerspule anliegen müssen. Zusätzlich ist bei dem Verfahren ein niedriges Messstromniveau ausreichend, um eine genaue Wegposition zu bestimmen. Dies wirkt sich insbesondere vorteilhaft auf den elektrischen Energiebedarf während der Bewegungsphase des Ankers von einer Anlagefläche des Elektromagneten zur anderen Anlagefläche aus. Eine wesentliche Verbesserung kann das Verfahren im Bereich kleiner Luftspalte erzielen, da die Wegposition in Gegensatz zu der in DE 19836769 beschriebenen Näherungsfunktion bei dem erfindungsgemäßen Verfahren durch Interpolation eines für den Magneten genau ermittelten Kennfeldes bzw. einer funktionalen Abbildung des Kennfeldes ermittelt wird. Durch die höhere Genauigkeit vor allem im Bereich kleiner Luftspalte ist eine Regelung, die die Aufprallgeschwindigkeit des Ankers auf die Anlagefläche des Elektromagneten minimiert, leichter zu realisieren. Eine adaptive Regelung, ist im Gegensatz zum in DE 19836769 beschriebenen Verfahren nicht erforderlich.

[0008] Für ein gegebenes Magnetsystem kann ein Kennlinienfeld mittels einer FEM-Methode ermittelt werden, bei dem der Zusammenhang zwischen Strom durch die Erregerspule, magnetischer Fluss der Erregerspule sowie dem Luftspalt zwischen Anker und der Anlagefläche am Magneten ermittelt werden kann. Aus dem Kennfeld kann bei bekannten magnetischen Fluss und Strom eindeutig die Position des Ankers festgestellt werden. Der Strom wird gemessen und der magnetische Fluss der Erregerspule wird, wie im weiteren beschrieben wird, berechnet.

[0009] Bekanntlich lässt sich der magnetische Fluss einer Erregerspule wie folgt ermitteln:

$$\Phi = \frac{1}{N} \cdot \int U_{ind} \cdot dt \quad (G1)$$

wobei:

Φ Magnetischer Fluss durch die Erregerspule

N: Anzahl der Windungen der Erregerspule

U_{ind} : Induktionsspannung der Erregerspule

[0010] Die Induktionsspannung ergibt sich bekannterweise aus

$$U_{ind} = U_{Spule} - U_{RCU}$$

oder

$$U_{ind} = U_{Spule} - I_{Spule} \cdot R_{Spule} \quad (G2)$$

Mit:

U_{ind} : Induktionsspannung der Erregerspule
 U_{RCU} : Spannungsabfall am Widerstand der Erregerspule
 U_{Spule} : Spannung an der Erregerspule
 I_{Spule} : Strom durch die Erregerspule
 R_{Spule} : Widerstand der Erregerspule

[0011] Der magnetische Fluss ist somit darstellbar als folgende Funktion:

$$\Phi = \frac{1}{N} \cdot \int (U_{Spule} - I_{Spule} \cdot R_{Spule}) \cdot dt \quad (G3)$$

[0012] Der magnetische Fluss durch die Erregerspule kann somit durch Messung des Erregerspulenstroms sowie Messung des Spannungsabfalls an der Erregerspule ermittelt werden.

[0013] Eine weitere Vereinfachung der Erfassung des magnetischen Flusses ist möglich durch Berechnung der Erregerspulenstromspannung in Abhängigkeit des Betriebszustandes einer Leistungsendstufenschaltung. Bei einer bekannten Leistungsendstufe, die halbe H-Brücke genannt wird, sind vier verschiedene Betriebszustände möglich. Diese sind Ruhezustand (RZ), Aufmagnetisierungszustand (AMZ), Freilauf (FL) sowie schnelle Stromrückführung (SSR) mit Energierückführung.

[0014] Im Betriebszustand des Aufmagnetisierens (AMZ) kann der Spannungsabfall an der Erregerspule wie folgt ermittelt werden:

$$U_{Spule} = U_V - I_{Spule} \cdot \sum_i R_i \quad (G4)$$

mit

R_i : Widerstände beim Aufmagnetisieren (z.B. Widerstände der MOS-Transistoren, Widerstände Verkabelung und Kontaktierung, Messwiderstände)
 U_V : Versorgungsspannung

[0015] Im Betriebszustand der Schnellen Energierückführung (SSR) entspricht die Erregerspulenstromspannung der negativen Versorgerspannung, den Spannungsabfällen an beiden Dioden, die sich im Stromkreis befinden sowie den Verlusten an Messwiderstand und den Kontaktierungs- und Verkabelungswiderständen:

$$U_{Spule} = -U_V - 2 \cdot U_D - I_{Spule} \cdot \sum_i R_i \quad (G5)$$

mit:

R_i : Widerstände der in Schaltzustand des harten Abschaltens mit Energierückführung (Messwiderstände, Kontaktierungs- und Leitungswiderstände)
 $2 \cdot U_D$: Spannungsabfall an den beiden Dioden beim harten Abschalten

[0016] Im Betriebszustand des Freilaufs wird die Erregerspulenspannung durch den Spannungsabfall an der Freilaufdiode sowie den Verlusten am Messwiderstand und dem MOS-Transistor sowie der Widerstände bestimmt. Die Erregerspulenspannung ist dann näherungsweise

$$U_{Spule} = -U_D - I_{Spule} \cdot \sum_i R_i \quad (G6)$$

mit:

R_i : Widerstände im Schaltzustand des Freilaufs (Messwiderstände, Widerstand der MOS-Transistoren)

U_D : Spannungsabfall an der Diode im Freilaufkreis

[0017] In jedem Betriebszustand kann die Erregerspulenspannung und somit der magnetische Fluss rechnerisch bestimmt werden. Zur Ermittlung der Wegposition ist somit lediglich eine Erfassung des Stroms erforderlich.

[0018] Bei einer Anwendung des Verfahrens bei Elektromagneten mit Wirbelströmen wird der magnetische Fluß durch die Erregerspule aufgrund von Wirbelströmen reduziert. Zur Genauigkeitserhöhung muß die Induktionsspannung, die den magnetischen Fluss erzeugt, daher um den Einfluss der Wirbelströme korrigiert werden, damit die genauere Berechnung des magnetischen Flusses möglich ist. Bei Elektromagneten mit sehr geringen Wirbelstromverlusten kann der Einfluss der Wirbelströme durch einen Faktor berücksichtigt werden.

$$U_{ind,korrigiert} = U_{ind} \cdot \frac{R_W}{R_W + R_{Spule}} \quad (G7)$$

mit

R_W : Wirbelstromwiderstand

$R_{Erregerspule}$: Erregerspulenwiderstand

$U_{ind,korrigiert}$: Induktionsspannung nach Berücksichtigung von Wirbelstromeinflüssen

U_{ind} : Induktionsspannung der Erregerspule

[0019] Für eine genaue Wirbelstromerfassung ist eine genaue Modellierung des zeitlich veränderlichen Wirbelstromwiderstandes erforderlich. Dies ist bei Elektromagneten mit geringen Wirbelstromverlusten vorteilhaft, bei Elektromagneten mit signifikanten Wirbelstromverlusten unbedingt erforderlich. Bei Elektromagneten mit geringen Wirbelstromverlusten kann der Wirbelstromwiderstand näherungsweise als konstant angesetzt werden.

[0020] Ausführungsbeispiele der Erfindung werden anhand der schematischen Figuren der Zeichnung näher erläutert.

Fig. 1 zeigt die Anordnung des Stellgerätes und einer Steuereinrichtung in einer Verbrennungskraftmaschine.

Fig. 2a und Fig. 2b zeigen verschiedene Ausführungsformen eines elektromagnetischen Stellgerätes, bei denen das erfindungsgemäße Verfahren zur Positionsbestimmung angewandt werden kann.

Fig. 3a zeigt eine mögliche Ausführung einer Leistungsstufe, die in einer Steuereinrichtung Verwendung finden kann.

Fig. 3b beschreibt eine mögliche Anordnung von Strom- und Spannungsmessern innerhalb der Leistungsstufe, die die für das Verfahren notwendigen Größen liefern.

Fig. 3c beschreibt eine alternative Ausführung einer Leistungsstufe, die beim erfindungsgemäßen Verfahren eingesetzt werden kann.

Fig. 4 zeigt ein beispielhaftes Kennfeld, das den Zusammenhang zwischen Strom, magnetischen Fluss durch die Erregerspule und Luftspalt bzw. Position des Ankers relativ zur Anlagefläche der Elektromagneten beschreibt.

Fig. 5a-5d zeigen den zeitlich veränderlichen Stromverlauf der Erregerspulen und die Position des Ankers.

Fig. 6a und Fig. 6b zeigen Ablaufdiagramme zum Bestimmen der Position X des Ankers;

Fig. 7 zeigt ein Diagramm des Luftspalts δ über dem Fluß Φ ;

Fig 8a bis 8c zeigen Diagramme verschiedener Strommessverfahren.

[0021] Ein elektromechanisches Stellgerät **1** (gemäß Fig.1) umfasst ein Stellglied **9**, das hier als Gaswechselventil ausgebildet ist. Der Stellantrieb besteht aus zwei Elektromagneten **5a** und **5b**. An beiden Elektromagneten sind jeweils mindestens eine Erregerspule **12a** bzw. **12b** angeordnet. Es ist ein Anker **6** vorgesehen, der sich bei seiner Schwenkbewegung zwischen der Anlagefläche an dem oberen Elektromagneten und der Anlagefläche an dem unteren Elektromagneten bewegt. Bei einer Bewegung des Ankers hin zur unteren Anlagefläche dient eine Feder **8** als Rückstellmittel, während bei einer Bewegung hin zur oberen Anlagefläche ein Drehstab **7** als Rückstellmittel dient. Der Anker **6** ist in seiner Ruheposition in der Mittelstellung zwischen oberer und unterer Anlagefläche gezeigt. Die Ansteuerung des Stellgerätes erfolgt über eine Steuereinrichtung, die aus einer Steuereinheit **3** und Leistungsendstufen **2, 4** besteht. Die Erregerspulen **12 a** und **12 b** des Stellgerätes sind mit den Leistungsendstufen **2** und **4** über Kabel **10** leitend verbunden. In der Steuereinheit **3** werden Messstellen von Strom und Spannungsabfällen erfasst und/oder Signale von einer nicht dargestellten übergeordneten Steuerereinrichtung für Motorbetriebsfunktionen erfasst und Stellsignale erzeugt, in deren Abhängigkeit die beiden Erregerspulen des Stellgerätes gesteuert werden. Die Steuereinheit **3** hat einen Regler, dessen Regelgrößen der Strom durch die Erregerspulen I_1, I_2 sowie der Spannungsabfall $U_{1,Spule}, U_{2,Spule}$ an den Erregerspulen der beiden Elektromagnete sind. Der Regler liefert die Steuersignale für die Steuerleitungen L_1, L_2 für die obere Leistungsendstufe **2** sowie die Steuersignale L_1', L_2' für die untere Leistungsendstufe **4**, mit der die Steuereinheit mit den Leistungsendstufen leitend verbunden sind. Da in der Erfindung ein Verfahren zur Positionsbestimmung erläutert, wird auf die Ausgestaltung des Regler und deren Funktionalität nicht näher eingegangen.

[0022] In der Fig. 1 sind zwei Magnete mit je einer Spule vorgesehen. Es ist auch möglich, durch besondere Polausbildung mit einer Spule auszukommen, die dann für beide Funktionen (Halten und Fangen) eingesetzt wird.

[0023] In Fig. 2a und Fig. 2b sind mögliche Ausführungen eines elektromechanischen Stellgerätes dargestellt. In Fig. 2a ist ein aus DE 19825728 bekanntes elektromechanisches Stellgerät dargestellt, in dem die Betätigung des Stellgliedes durch den Anker **6'** direkt erfolgt und eine obere und untere Rückstellfeder die Rückstellkraft des Ankers erzeugen. In Fig. 2b ist ein aus der Patentanmeldung PCT EP 9908755 bekanntes Stellgerät dargestellt, das dadurch gekennzeichnet ist, das es einen im Hebel integrierten Anker **6''** aufweist. Bei diesem Stellgerät erzeugt eine Ventilrückstellfeder die eine Rückstellkraft, während ein im Ankerrohr gelagerter Drehstab die andere Gegenkraft liefert.

[0024] Der in Fig. 3a dargestellte Aufbau einer Leistungsendstufe umfasst neben der Erregerspule **W** einen ersten Transistor **TR₁** und einen zweiten Transistor **TR₂**, dessen Gate-Anschlüsse mit den Steuerleitungen L_1 und L_2 elektrisch leitend verbunden sind. Ferner umfasst die Leistungsendstufe eine Diode **D1** und eine Freilaufdiode **D2** sowie den Messwiderstand R_{Mess} , der für die Strommessung des Stroms durch die Erregerspule vorgesehen ist. Ein zusätzlicher Widerstand R_1 dient zur Abbildung der Widerstände der Kontaktierung und Stromleitung. Die Leistungsendstufe kann in vier verschiedenen Betriebszuständen gesteuert werden, die jeweils charakterisiert sind durch den jeweiligen Schaltzustand der Transistoren **TR₁** und **TR₂**. Die Betriebszustände sind Ruhezustand (RZ), Aufmagnetisieren (AMZ), Freilauf (FL) sowie hartes Abschalten mit schneller Stromrückführung (SSR). Liegt an den Gate-Anschlüssen der vorzugsweise als MOS-Transistor ausgebildeten Transistoren **TR₁** und **TR₂** ein hohes Spannungspotential an, so ist der jeweilige Transistor von seinem Drain-Anschluss zum Source-Anschluss leitend. Liegt am Gate-Anschluss ein niedriges Spannungspotential an, so sperrt der Transistor von seinem Drain-Anschluss zu seinem Source-Anschluss.

[0025] Im Ruhezustand RZ sind die Transistoren **TR1** und **TR2** nicht leitend und der Strom durch die Erregerspule ist ebenfalls Null.

Im Betriebszustand des Aufmagnetisierens AMZ werden beide Transistoren leitend betrieben. Strom fließt dann von der Spannungsquelle mit dem Potential der Versorgerspannung durch den Transistor **TR₁**, die Erregerspule, durch den Messwiderstand R_{mess} und den Transistor **TR₂** hin zu einem Masseanschluss, der auf einem Bezugspotential ist. Im Betriebszustand des Freilaufs wird Transistor **TR₂** leitend betrieben und Transistor **TR₁** nicht leitend. Fließt im Zeitpunkt des Überganges in den Betriebszustand des Freilaufs FL ein Strom durch die Erregerspule **W**, so wird die Freilaufdiode **D2** leitend und der Strom durch die erste Erregerspule nimmt abhängig von den Verlusten im Widerstand der Erregerspule, dem Transistor **TR₂**, dem Messwiderstand R_{mess} und der Freilaufdiode **D2** ab.

Im Betriebszustand der schnellen Stromrückführung SSR werden die Transistoren **TR₁** und **TR₂** nicht leitend betrieben. Fließt beim Übergang in den Betriebszustand der schnellen Stromrückführung SSR ein Strom durch die Erregerspule **W**, so werden die Freilaufdiode **D2** und die Diode **D1** leitend. Der Strom fließt dann von dem Bezugspotential über die Freilaufdiode **D1**, die Erregerspule, den Messwiderstand R_{mess} , die Diode **D2** hin zur Spannungsquelle mit dem Spannungspotential der negativen Versorgerspannung U_v . Wird die Erregerspule nicht in Sättigung betrieben, so ist der Spannungsabfall in der Erregerspule gleich der negativen Versorgerspannung U_v zuzüglich der negativen Durchlassspannungen der Freilaufdiode **D1** und der Diode **D2** und den Verlusten am Messwiderstand.

[0026] In Fig. 3b ist die Positionierung der Messstellen zur Erfassung des Stromes durch die Erregerspule sowie des Spannungsabfalls an der Erregerspule in der Leistungsendstufe beschrieben. So wird der Spannungsabfall U_{Spule} zwischen der Zuführungsleistung zur Erregerspule und der Rückführungsleistung erfasst. Der Strom I wird aus dem Spannungsabfall am Messwiderstand R_{mess} ermittelt. Alternative Positionierungen der Messstellen zur Erfassung des Stromes durch die Erregerspule sind ebenfalls möglich. Außerdem kann statt des Messwiderstandes auch ein Hall-Element zur Strommessung eingesetzt werden.

[0027] In Fig. 3c ist eine alternative Endstufenbeschaltung dargestellt. Bei dieser Anordnung muss in der Aufmagnetisierungsphase (AMZ) nur der eine MOS-Transistor TR1 geschaltet werden. Der Strom fließt dann über die Erregerspule W, den Messwiderstand zum Masseanschluss der auf einem Bezugspotential liegt. In der Freilaufphase (FL) wird der zweite MOS-Transistor TR2 geschaltet und der erste MOS-Transistor abgeschaltet. Fließt im Zeitpunkt des Überganges in den Betriebszustand des Freilaufs FL ein Strom durch die Erregerspule, so wird die Freilaufdiode D1 leitend und der Strom durch die Erregerspule nimmt abhängig von den Verlusten im Widerstand der Erregerspule, dem Transistor TR1, dem Messwiderstand R_{mess} und der Freilaufdiode D1 ab. Im Betriebszustand der schnellen Stromrückführung (SSR) werden beide MOS-Transistoren abgeschaltet. Die Zener-Diode D2' wird dann wirksam. Fließt ein Strom durch die Erregerspule nimmt dieser abhängig von der Zener-Spannung, den Verlusten an der Freilaufdiode D1', dem Widerstand der Erregerspule und dem Messwiderstand R_{mess} ab. Der Vorteil dieser Endstufenbeschaltung liegt in den geringeren Verlusten beim Einschalten der Erregerspule und der geringeren Belastung der beiden MOS-Transistoren. Dies führt zu geringeren Kosten, ermöglicht jedoch im Gegensatz zur in Fig.3a und 3b beschriebenen Endstufenbeschaltung keine Rückspeisung der Energie im Betriebszustand der schnellen Stromrückführung. Diese Beschaltung eignet sich besonders für Elektromagnete die geringe mechanische Verluste zu überwinden haben

[0028] Als Alternative zu der beschriebenen Endstufenbeschaltungen sind auch andere Schaltungsvarianten denkbar wie z.B. eine Vollbrücke mit vier MOS-Transistoren. Alternative Schaltungsvarianten sind geeignet, wenn sie mindestens drei unterschiedliche Betriebszustände ermöglichen.

[0029] In Fig. 4 ist ein Kennlinienfeld eines Elektromagneten aufgezeigt, in dem der Zusammenhang zwischen Strom I durch die Erregerspule, dem magnetischem Fluss Φ ($V_{\mu s}$) der Erregerspule sowie dem Luftspalt zwischen Anker und der Anlagefläche am Magneten ermittelt werden kann. Aus dem Kennlinienfeld kann bei bekannten magnetischen Fluss und Strom durch die Erregerspule der Luftspalt zwischen Anker und der Anlagefläche des Magneten ermittelt werden und somit die Position des Ankers beziehungsweise des Ventils bestimmt werden. Die Ermittlung des Luftspaltes erfolgt durch Interpolation des Kennlinienfeldes, wie in Fig. 4 gezeigt, bzw. durch Berechnung mittels einer Funktion, die das Kennfeldes in ausreichender Genauigkeit abbildet. Zur möglichst genauen Ermittlung der Wegposition ist es vorteilhaft, die Wegposition in dem Kennlinienbereich zu ermitteln, in dem eine hohe Auflösung zwischen Luftspalt und der Messgrößen magnetischer Fluss und Strom gegeben ist, d.h. vorzugsweise im Bereich kleiner Luftspalte und eines großen magnetischen Flusses durch die Erregerspule.

[0030] In den Figuren 5a bis d sind verschiedene Verfahren der Ermittlung des Stromes und des magnetischen Flusses zur Positionsbestimmung während der Bewegungsphase von der Anlagefläche eines Elektromagneten zur Anlagefläche des anderen Elektromagneten dargestellt. In den Figuren 5a bis d ist der zeitliche Ablauf der Erregestromniveaus I_1 und I_2 durch die beiden Erregerspulen der Elektromagnete sowie die Position X des Ankers dargestellt.

[0031] In einem ersten in Fig. 5a dargestellten Verfahren wird der Anker durch Bestromung der Erregerspule mit dem Strom I_1 zunächst beispielweise mittels eines Zweipunktreglers auf einem Haltestromniveau I_H gehalten. In diesem Zustand befindet sich der Anker an der Anlagefläche eines Elektromagneten. Die Position X ist dann s1. Zur Einleitung der Bewegung wird der Strom vom Haltestromniveau I_H auf ein Messstromniveau I_M reduziert und für die Zeit Δt_M auf dem Messstromniveau gehalten. Nachdem der Strom ein Stromniveau I_S erreicht, welches geringfügig unter dem Haltestromniveau und über dem Messstromniveau liegt, setzt die Hubbewegung ein. Mittels der Flussänderung und der Stromänderung kann die Position des Ankers beim Ablösevorgang von der Anlagefläche des Elektromagneten kontinuierlich ermittelt werden. Die Wegposition ist solange ermittelbar, bis der Messstrom nach der Zeit Δt_M abgeschaltet wird. Nach Abschalten des Messstroms wird der Fangstrom I_2 der Erregerspule des anderen Elektromagneten aktiviert. Dieser Fangstrom kompensiert die mechanischen Verluste während der Hubbewegung und gewährleistet, dass der Anker sich hin bis zum Anliegen an der Anlagefläche des gegenüberliegenden Elektromagneten bewegt. Nach Einschalten des Fangstromes wird der Strom I_2 der zweiten Erregerspule und der magnetische Fluss ausgewertet. Während des Zeitintervalls Δt_F kann die Position des Ankers kontinuierlich bestimmt werden. Nach Auftreffen des Ankers auf die Anlagefläche des gegenüberliegenden Elektromagneten (Position s2) wird der Anker wieder durch das Haltestromniveau I_H an der Anlagefläche des Elektromagneten gehalten.

[0032] Das in Fig. 5b dargestellte Verfahren unterscheidet sich von dem in Fig.5a dargestellten Verfahren dadurch, dass der Strom der ersten Erregerspule I_1 nach der Haltephase Δt_H im Anschluss auf Null zurückgeführt wird. Die Bestimmung der Position kann somit nur in einem kurzen Zeitintervall nach Beginn der Ankerbewegung erfolgen. Der Strom I_2 der Erregerspule des Fangmagneten wird dann zuerst auf einem Messstromniveau I_M gesetzt und dann auf das Fangstromniveau I_F erhöht. Die Auswertung der Position erfolgt dann sowohl im Messstrombetrieb als auch im Fangstrombetrieb. Das zweite Verfahren ist vorteilhaft in Hinblick auf den elektrischen Energiebedarf für eine Fangphase, hat jedoch den Nachteil dass die Wegposition durch Auswertung der Fangspule ungenauer erfasst werden kann, da die Auswertung in einem Kennfeldbereich erfolgt, in dem eine geringe Auflösung vorhanden ist.

[0033] In dem in Fig. 5c beschriebenen Verfahren werden beide Erregerspulen für eine bestimmte Zeitdauer auf einem Messstromniveau Δt_{M1} und Δt_{M2} betrieben. Zeitweise erfolgt der Betrieb parallel. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass lückenlos die Wegposition ermittelt werden kann und gegebenenfalls Ungenauigkeiten bei der Wegpositionserfassung bedingt durch Schwankungen der Widerstände und Ungenauigkeiten der Strommessung durch redu-

dante Auswertung kompensiert werden.

[0034] In dem in Fig. 5d beschriebenen vierten Verfahren wird die Wegposition nur beim Abschalten des Stroms I_1 und während des Wirkens des Fangstromes I_2 ermittelt. Die Wegposition kann dann nur zu Beginn des Ablösevorgangs des Ankers von der Anlagefläche am Elektromagneten sowie nach Einsetzen des Fangstromes ermittelt werden. Dieses Verfahren ist vorteilhaft, da die elektrische Leistungsaufnahme während der Fangphase sowie die Bremswirkung des abschaltenden Elektromagneten minimiert werden kann.

[0035] In Fig. 6a und Fig. 6b sind Ablaufdiagramme zur Erfassung der Ankerposition dargestellt, die in der Steuereinheit 3 abgearbeitet werden. Das Programm berechnet die Position X des Ankers, wenn sich der Anker von der Position s1 zur Position s2 bewegt. Ein äquivalentes Programm, das die Position X berechnet, wenn sich der Anker von der Position s2 zur Position s1 bewegt, ist ebenfalls vorgesehen.

[0036] In Fig. 6a ist das Ablaufdiagramm zur Erfassung der Ankerposition beim Abschalten der einen Haltespule dargestellt, d.h. beim Beginn der Hubbewegung des Ankers. In einem ersten Schritt S1 wird das Programm gestartet. In einem zweiten Schritt S2 wird dem Strom I_1 der Haltestromwert I_H , dem magnetischen Fluss Φ_1 der Haltefluss Φ_H , sowie der Position X der Anfangswert s_1 zugeordnet. Im Schritt S3 wird dem Strom I_1 ein Anfangsstromwert $I_0 < I_H$, dem magnetischen Fluss Φ_1 ein Anfangsfluss Φ_0 , sowie der Position X_1 der Anfangswert S_1 zugeordnet. In einem vierten Schritt S4 wird geprüft, ob der gemessene Strom I_1 das eingestellte Haltestromniveau unterschreitet, d.h. es wird geprüft, ob die Hubbewegung beginnt. Sofern die Bedingung erfüllt ist, wird im Schritt S5 ein neuer Stromwert I_M ermittelt und die Induktionsspannung U_{ind} der Erregerspule berechnet. Aus der Induktionsspannung wird in Schritt S6 ein neuer Wert des magnetischen Flusses Φ_1 berechnet und zwar mit Hilfe des Anfangswerts des magnetischen Flusses Φ_0 und der Integration der Induktionsspannung. Die Ermittlung der Position X erfolgt in Schritt S7 durch Interpolation des Kennfeldes. In Schritt S8 wird geprüft, ob der gemessene Strom größer ist als ein unterer Grenzwert I_U , der in der Regel sehr klein oder gleich Null ist. Ist die Bedingung nicht erfüllt, wird die Ermittlung der Wegposition fortgesetzt. Ist die Bedingung erfüllt, wird in Schritt S9 der Strom I_1 sowie der magnetische Fluss Φ_1 gleich Null gesetzt. In Schritt S10 wird die Positionsbestimmung abgeschlossen.

[0037] In Fig. 6b ist das Ablaufdiagramm zur Erfassung der Ankerposition beim Einschalten des Fangstromes I_2 dargestellt, d.h. die Bestimmung der Wegposition nach bereits eingesetzter Ankerbewegung. In einem ersten Schritt S1 wird das Programm gestartet. In einem zweiten Schritt S2 wird der Strom I_2 sowie magnetischer Fluss Φ_1 Null gesetzt. Im Schritt S3 wird dem Strom I_2 der Anfangsstromwert I_0 , dem magnetischen Fluss Φ_2 der Anfangsfluss Φ_0 , zugeordnet. In einem vierten Schritt S4 wird geprüft, ob der gemessene Strom größer als Null ist, d.h. es wird geprüft, ob der Fangstrom eingeschaltet wurde. Sofern die Bedingung erfüllt ist, wird im Schritt S5 ein neuer Stromwert $I_2 = I_F$ ermittelt und die Induktionsspannung U_{ind} der Erregerspule berechnet. Aus der Induktionsspannung wird in Schritt S6 ein neuer Wert des magnetischen Flusses Φ_2 berechnet und zwar mit Hilfe Anfangswerts des magnetischen Flusses Φ_0 und der Integration der Induktionsspannung. Die Ermittlung der Position X erfolgt in Schritt S7 durch Interpolation des Kennfeldes. In Schritt S8 wird geprüft, ob der Anker die Position s2 erreicht hat, d.h. ob die Ankerbewegung abgeschlossen ist. Ist die Bedingung nicht erfüllt, so wird die Ermittlung der Wegposition fortgesetzt. Ist die Bedingung erfüllt, wird der Strom I_2 gleich dem Haltestrom I_H gesetzt, dem magnetischen Fluss Φ_2 der Haltefluss Φ_H zugeordnet und der Position X gleich der Endposition s2 zugeordnet. In Schritt S10 wird abgefragt, ob die Positionsbestimmung abgebrochen werden soll. Diese Abfrage ermöglicht eine Fortsetzung der Wegbestimmung während der Haltephase, um genauere Anfangsflusswerte sowie Anfangsstromwerte für den Abschaltvorgang der aus der Haltephase zu erhalten, sowie um festzustellen, ob sich der Anker während der Haltephase ablöst.

Ein Meßverfahren, welches zur Positionsbestimmung dient, muß gewährleisten, daß insbesondere bei schnell schaltenden elektromechanischen Aktuatoren eine hohe Genauigkeit der Positionsermittlung erzielt wird, gleichzeitig darf die Dynamik der Anker / Ventilbewegung nicht stark beeinträchtigt werden. Zusätzlich ist gefordert, dass der Energiebedarf des Messverfahrens möglichst gering gehalten wird.

[0038] Die Genauigkeit der Positionsbestimmung hängt ab von der Genauigkeit der ermittelten Kennfelder sowie der Genauigkeit der Kennfeldinterpolation beziehungsweise der Genauigkeit, die mittels einer Berechnung mit einer Funktion erzielt werden kann. Aus dem in Fig. 4 dargestellten Kennfeld wird ersichtlich, dass mit abnehmendem magnetischen Fluss es zunehmend schwieriger wird, mittels Kennfeldinterpolation die Position zu bestimmen. Dies wird noch deutlicher bei Betrachtung der Fig. 7, in der der Luftspalt δ über dem Fluß Φ aufgetragen ist. Die von der Regelung geforderte Genauigkeit der Positionsbestimmung kann also nur gewährleistet werden, wenn in Abhängigkeit des Luftspaltes zwischen Anker und Magnet ein entsprechender Mindestflusswert vorliegt.

[0039] Bei der Erfindung kann die Positionsauswertung nur dann sinnvoll erfolgen, wenn der magnetische Fluß Φ größer ist als ein definierter Mindestflusswert Φ_{min} , der in Abhängigkeit des Luftspaltes aus der jeweiligen Genauigkeit der Kennfeldinterpolation / der Berechnung mittels Näherungsfunktion abgeleitet wird.

[0040] In dem in Fig. 8a dargestellten Messverfahren, bei dem die Ströme $I_{\mu 1}$ und $I_{\mu 2}$, der Weg x des Ankers und der Fluß Φ über der Zeit aufgetragen sind und das dem der Fig. 5 a entspricht, kann eine Positionsauswertung mit hoher Genauigkeit bis zum Zeitpunkt t1 erfolgen, solange gilt, dass $\Phi > \Phi_{min}$. Danach wird die Positionsauswertung ungenau und muß mit geeigneten Hilfsmethoden für ein Regelverfahren ausgewertet werden. Ab dem Zeitpunkt t2

wird die Positionsauswertung wieder genauer, da $\Phi > \Phi_{\min}$ wieder erfüllt ist.

[0041] Dieses Verfahren weist die Vorteile eines geringen Energiebedarfs, einer geringen Beeinträchtigung der Dynamik und eine gute Auswertung der Anfangs- und Endbewegung auf. Es ist jedoch nur eine schlechte oder keine sinnvolle Auswertung im Mittenbereich der Ankerbewegung möglich.

[0042] In dem zweiten Messverfahren gemäß Fig. 8b wird der Erregerstrom des einen Magneten iM1 zuerst auf ein niedrigeres Stromniveau reduziert, damit gewährleistet ist, dass die Magnetkraft kleiner als die Federkraft wird und der Anker beginnt, sich zu bewegen. Damit ist gewährleistet, dass die Dynamik des Elektromagneten so gering wie möglich beeinträchtigt wird. Danach wird der Erregerstrom entsprechend der Forderung $\Phi > \Phi_{\min}$ wieder erhöht, so dass über einen längeren Zeitraum, nämlich bis zum Zeitpunkt t3, eine genaue Positionsauswertung möglich ist. Sofern das Regelverfahren eine diskontinuierliche Positionsauswertung gestattet, wird der Zeitpunkt t3 so gewählt, dass so lange es notwendig ist eine Positionsauswertung erfolgen kann. Danach wird der Erregerstrom des Fangmagneten iM2 zugeschaltet. Sobald dabei der Mindestflusswert $\Phi_{\min}$ wieder erreicht ist, kann die Position wieder mit der geforderten Genauigkeit ermittelt werden.

Erfordert ein Regelverfahren eine kontinuierliche Positionsauswertung, so wird der Erregerstrom iM1 später erst abgeschaltet, so dass gewährleistet ist, dass bis zu Zeitpunkt t3 die Positionsauswertung durchgeführt werden kann. Hier wird der Abschaltzeitpunkt so bemessen, dass während des gesamten Messverfahrens immer der Mindestflusswert $\Phi_{\min}$ durch den Erregerstrom durch die eine oder andere Erregerspule erreicht wird.

[0043] Hier ist eine Auswertung der Position über einen längeren Zeitraum bzw. eine kontinuierliche Auswertung mit hoher Genauigkeit möglich, allerdings auf Kosten eines höheren Energiebedarfs und einer geringfügigen Beeinträchtigung der Dynamik.

[0044] Der Fig. 8c liegt ein diskontinuierliches Verfahren zu Grunde, mit dem zusätzlich zur Anfangs- und Endbewegung Referenzpunkte der Wegposition in der Bewegungsmitte ermittelt werden können, weil eine Bestromung von iM1 und iM2 in der Mitte so erfolgt, dass zeitweise $\Phi_{\min}$ überschritten wird. Dieses Verfahren weist einen geringen Energiebedarf und die geringste Beeinträchtigung der Dynamik auf. Es ist jedoch nur eine diskontinuierliche Positionsermittlung möglich. Der Vorteil gegenüber dem Verfahren der Fig. 8a liegt darin, dass genauere Referenzpunkte der Position ermittelt werden können.

[0045] In der Fig. 7 ist als Ergebnis der Anwendung des Verfahrens der Fig. 8b und 8c in Form von auswertbaren Kurven gezeigt.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Bestimmen der Position eines Ankers (6), der einem Stellantrieb zugeordnet ist, wobei der Stellantrieb mindestens einen Elektromagneten (5a, 5b) mit mindestens einer Erregerspule (12a, 12b) aufweist, wobei der Anker (6) zwischen einer ersten Anlagefläche an dem Elektromagneten und einer zweiten Anlagefläche bewegt wird, **dadurch gekennzeichnet**,

a. dass der Strom in und gegebenenfalls der Spannungsabfall an der wenigstens einen Erregerspule (12a, 12b) ermittelt wird,

b. dass der magnetische Fluss Φ durch die Erregerspule (12a, 12b) durch Integration der induzierten Spannung ermittelt wird, wobei die induzierte Spannung entweder berechnet wird aus dem Strom durch die Erregerspule unter Berücksichtigung des Betriebszustandes der Leistungsendstufe oder aus dem Strom durch die Erregerspule und dem Spannungsabfall an der Erregerspule ermittelt wird und

c. dass die Wegposition durch ein Kennfeld oder eine Funktion, das bzw. die den Zusammenhang zwischen dem magnetischen Fluss Φ , dem Strom I und der Wegposition abbildet, ermittelt wird.

2. Verfahren gemäß Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Ermittlung des Stromes ein Strommessverfahren angewandt wird, bei dem zuerst der Strom wenigstens der einen Erregerspule ermittelt wird, wobei das Stromniveau variiert zwischen einem Haltestromniveau und einem Messstromniveau und anschließend der Fangstrom der wenigstens einen Erregerspule ausgewertet wird (Fig. 5a).

3. Verfahren gemäß Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Ermittlung des Stromes ein Strommessverfahren angewandt wird, bei dem zuerst der Strom der wenigstens einen Erregerspule ermittelt wird, wobei das Stromniveau von einem Haltestromniveau abgeschaltet wird und anschließend der Fangstrom der wenigstens einen Erregerspule ausgewertet wird, bei dem der Fangstrom zwischen variierenden Fangstromniveaus und einem konstanten Messstromniveau ausgewertet wird (Fig 5b).

4. Verfahren gemäß Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Ermittlung des Stromes ein Strommessver-

fahren angewandt wird, bei dem zuerst der Strom der wenigstens einen Erregerspule ermittelt wird, wobei das Stromniveau variiert zwischen einem Haltestromniveau und einem Messstromniveau und anschließend der Fangstrom der wenigstens einen Erregerspule ausgewertet wird, wobei der Fangstrom zwischen variierenden Fangstromniveaus und einem konstanten Messstromniveau ausgewertet wird (**Fig. 5c**).

- 5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
5. Verfahren gemäß Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Ermittlung des Stromes ein Strommessverfahren angewandt wird, bei dem zuerst der Strom der wenigstens einen Erregerspule ermittelt wird, wobei das Stromniveau von einem Haltestromniveau abschaltet wird und anschließend der Fangstrom der wenigstens einen Erregerspule ausgewertet wird, wobei der Fangstrom bei variierenden Fangstromniveaus ausgewertet wird (**Fig. 5d**).
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Wegposition durch Interpolation eines Kennfeldes ermittelt oder mittels einer Funktion, die das Kennfeld abbildet, berechnet wird.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** zu einer genaueren Berechnung des magnetischen Flusses eine Korrekturfunktion zur Berücksichtigung der Wirbelstromverluste verwendet wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** Leistungsendstufen eingesetzt werden, die mehrere Betriebszustände wie das Aufmagnetisieren (AMZ), den Freilauf (FL) und eine schnelle Stromrückführung (SSR) ermöglichen.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1-5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Strommessung alternativ durch einen Messwiderstand oder ein Hall-Element erfolgt.
10. Verfahren zur Strombestimmung, insbesondere nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, daß** in Abhängigkeit der geforderten Genauigkeit des Regelverfahrens ein Mindestflußwert $\Phi_{\min}$ festgelegt wird und dass in Abhängigkeit von Mindestflußwert $\Phi_{\min}$ ein Strommessverfahren zur Anwendung kommt, bei dem in den für das Regelverfahren relevanten Wegbereichen die Bedingung $\Phi_{\min} > \Phi_{\min}$ erfüllt ist.
11. Verfahren nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet, daß** der Mindestflußwert $\Phi_{\min}$ in Abhängigkeit vom Luftspalt unterschiedlich festgelegt wird.
12. Verfahren nach Anspruch 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Strom der Erregerspulen so bemessen wird, daß über den gesamten Hubbereich der Mindestflußwert $\Phi_{\min}$ überschritten ist, so dass eine kontinuierliche Weg-Auswertung möglich ist (**Fig. 8b**).
13. Verfahren nach Anspruch 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Strom der Erregerspulen so bemessen wird, dass zu Anfang und am Ende der Hubbewegung $\Phi_{\min}$ überschritten ist und dass eine Stromanhebung im Mittenbereich vorgenommen wird, die eine Flussgröße $\Phi_{\min}$ verursacht (**Fig. 8c**).
14. Verfahren nach Anspruch 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein Strommessverfahren angewandt wird, bei dem der Haltestrom, der wenigstens einen Erregerwicklung auf ein solches Niveau (I_1) abgesenkt wird, dass sich der Anker (**6**) vom Haltemagneten ablöst, dass danach der Strom der Haltewicklung für eine Zeit erhöht wird derart, dass ein vorgegebener Wert $\Phi_{\min}$ des magnetischen Flusses nicht unterschritten wird und dass schließlich der Fangstrom eingeschaltet wird (**Fig. 8b**).
15. Verfahren nach Anspruch 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** bei Verwendung je einer Erregerwicklung für den Halte- und Fangstrom der Strom in der Halteerregerwicklung abgeschaltet wird, bevor der Fangstrom eingeschaltet wird (**Fig. 8b**).
16. Verfahren nach Anspruch 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** bei Verwendung je einer Erregerabwicklung für den Halte- und Fangstrom sich die Erregerströme zeitweise überlappen (**Fig. 8b**).
17. Verfahren nach Anspruch 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein Strommessverfahren angewandt wird, bei dem der Haltestrom der wenigstens eine Erregerwicklung zuerst abgeschaltet wird, so dass sich der Anker vom Haltemagneten ablöst, dass danach der Strom der Wicklung der wenigstens einen Erregerwicklung für eine Zeit erhöht wird derart, dass der vorgegebene Wert $\Phi_{\min}$ des magnetischen Flusses nicht unterschritten wird und dass danach der Fangstrom eingeschaltet wird (**Fig. 8c**).

18. Verfahren nach Anspruch 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** bei Verwendung je einer Erregerwicklung für den Halte- und den Fangstrom der Strom in der Halteerregerwicklung und / oder der Strom in der Fangerregerwicklung derart geregelt wird, dass $\Phi_{\min}$ nicht unterschritten wird.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

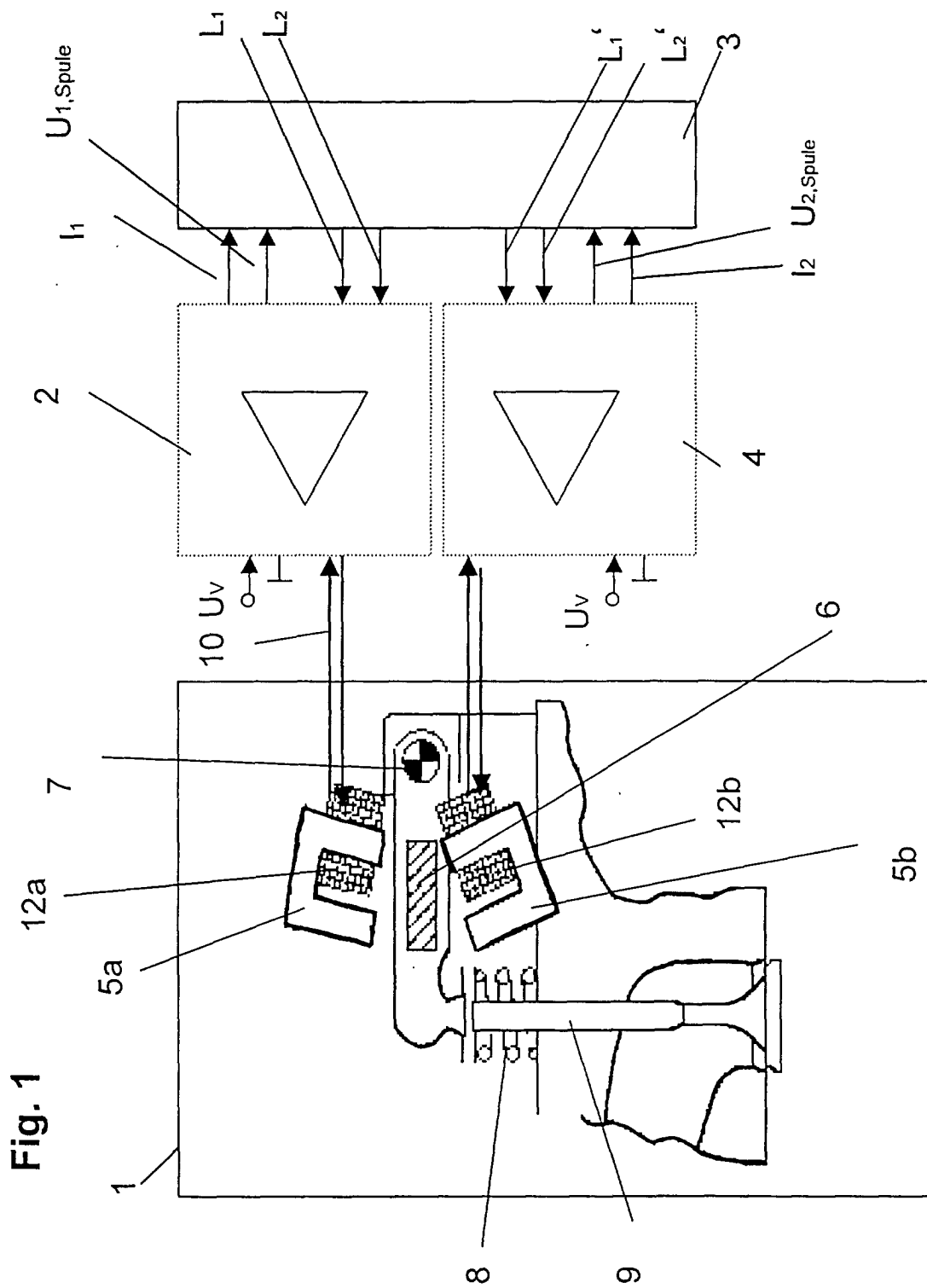


Fig. 2b

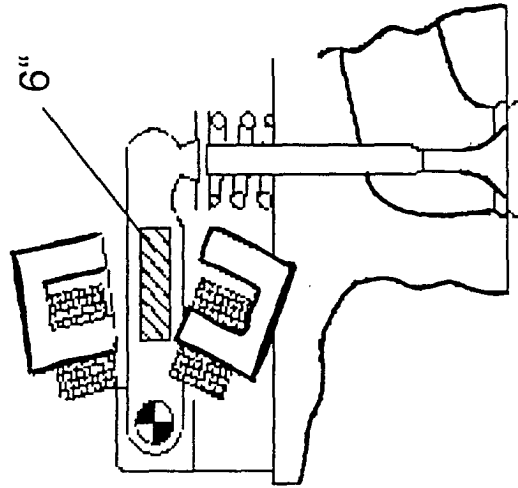


Fig. 2a

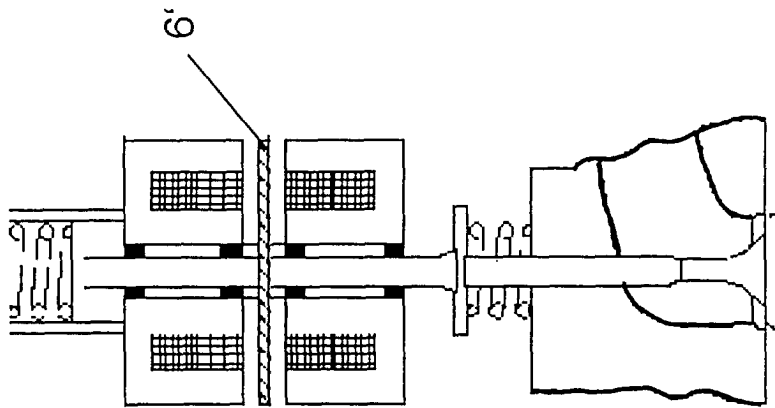
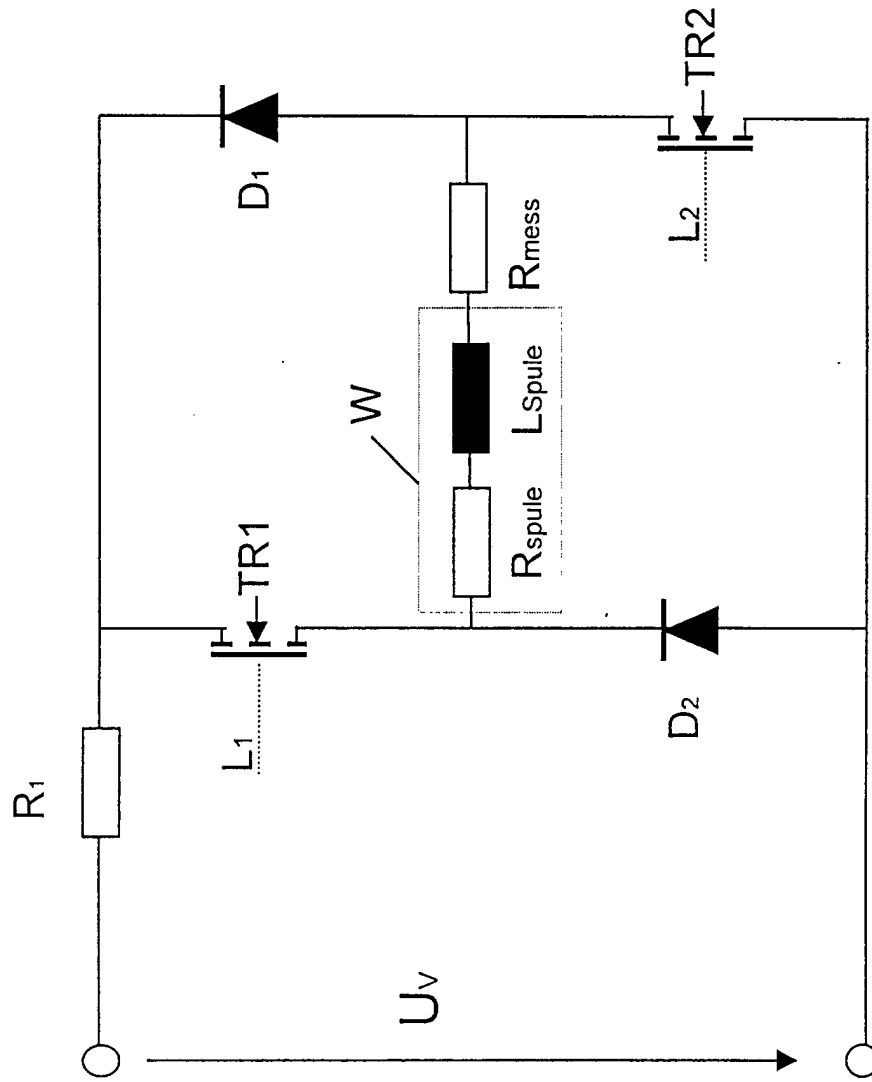


Fig. 3a



- Ruhezustand (RZ)
TR1=TR2=off
- Aufmagnetisieren (AMZ)
TR1=TR2=on
- Freilauf (FL)
TR2=on, TR1=off
- Hartes Abschalten mit schneller Stromrückführung (SSR)
TR1=TR2=off

Fig. 3b

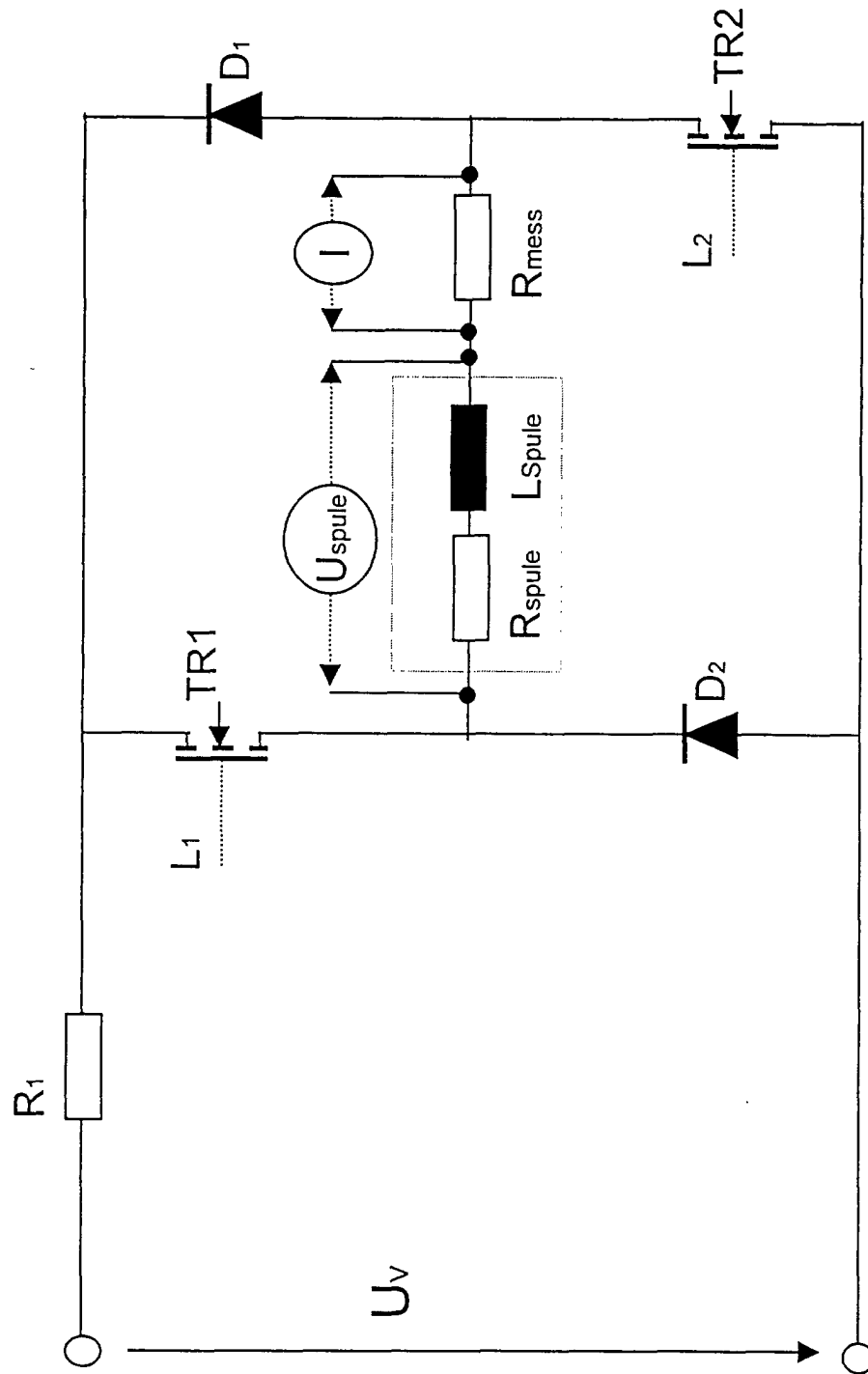


Fig. 3c

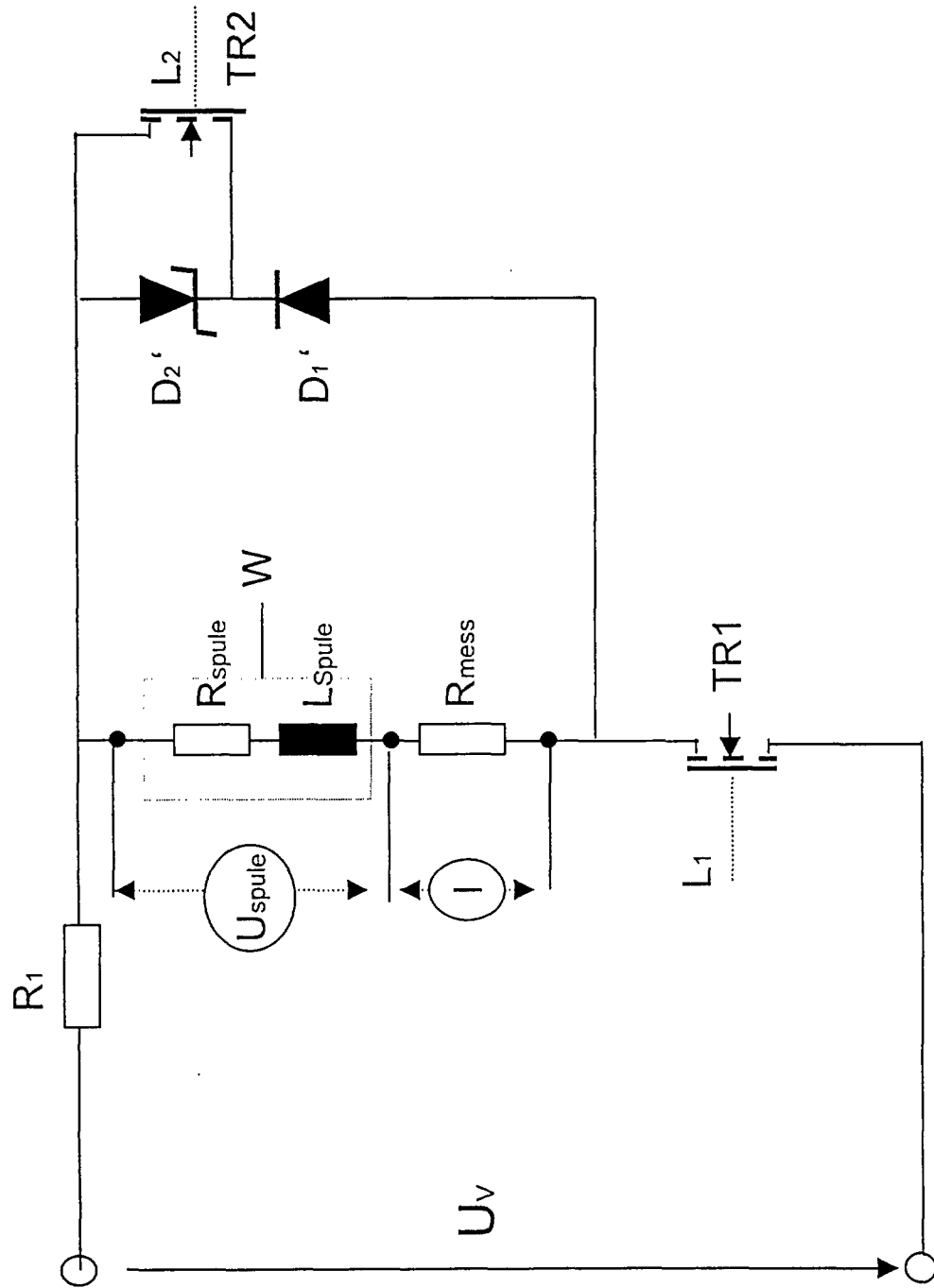


Fig. 4

Kennlinienfeld Luftspalt als Funktion des magnetischen Flusses und des Stromes durch die Erregerspule

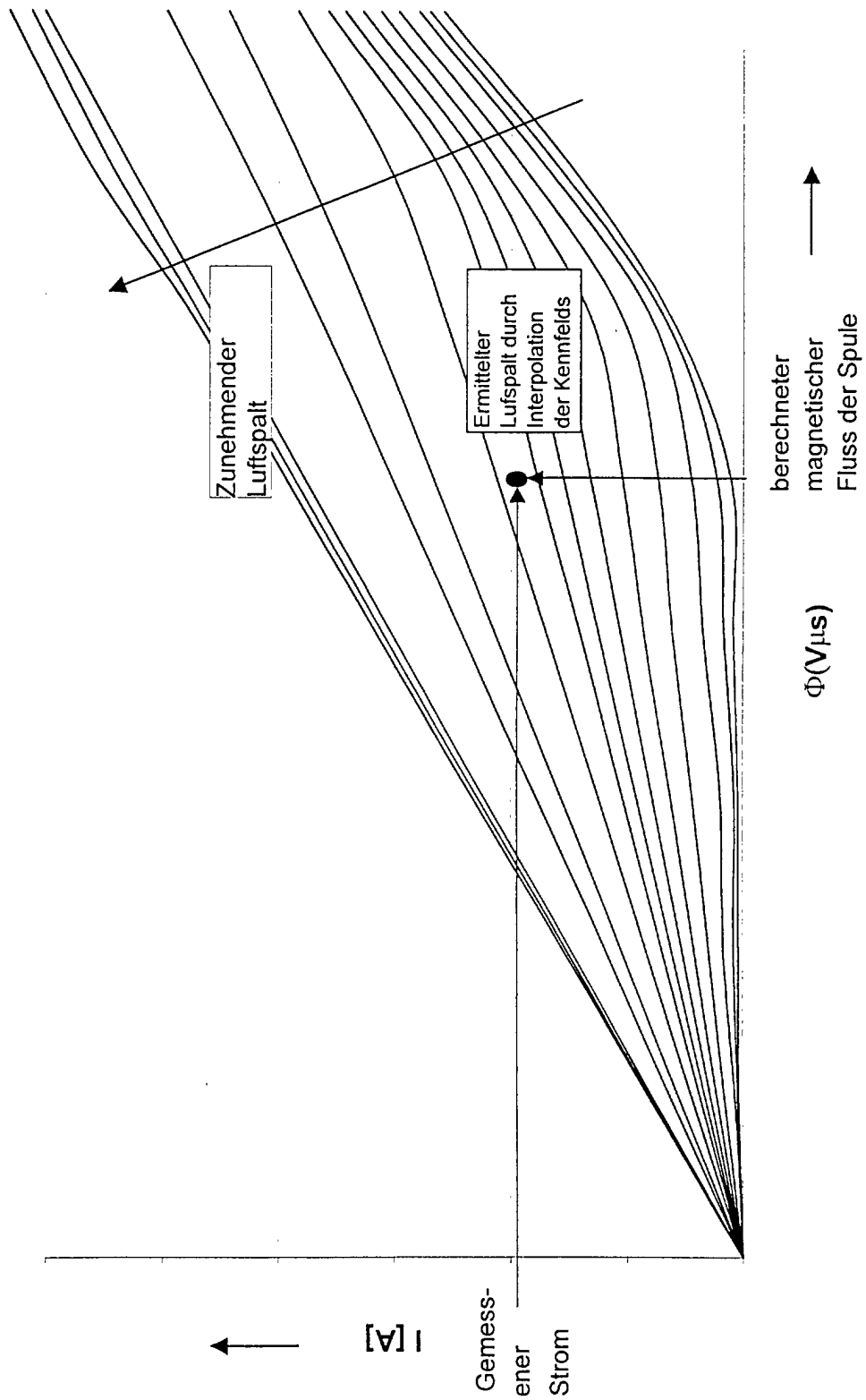


Fig. 5a

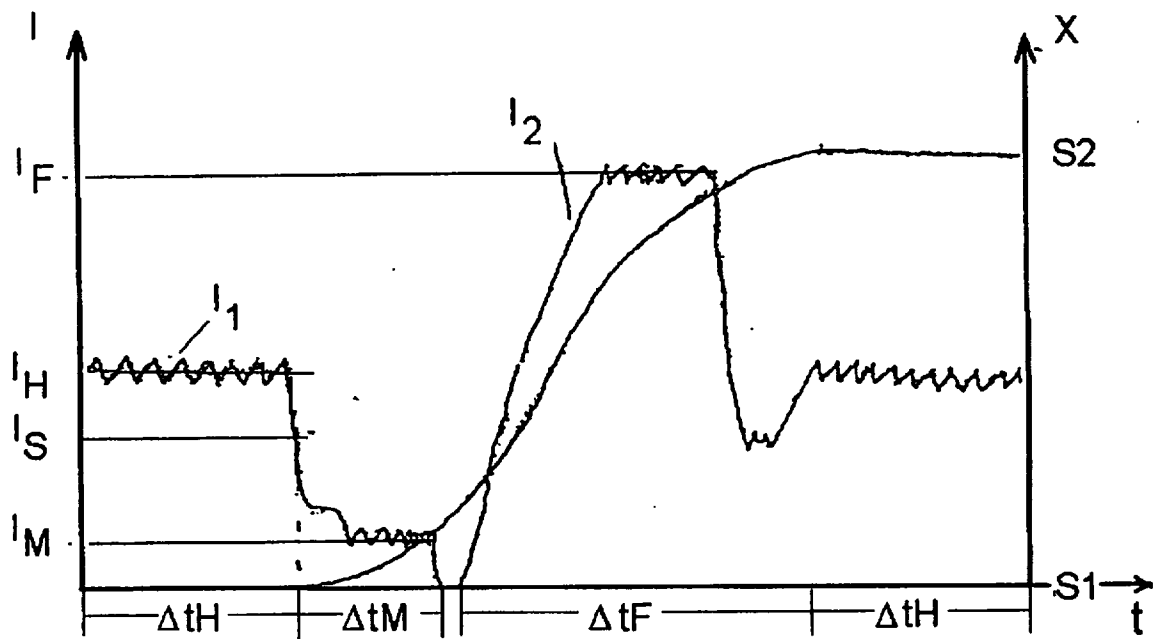


Fig. 5b

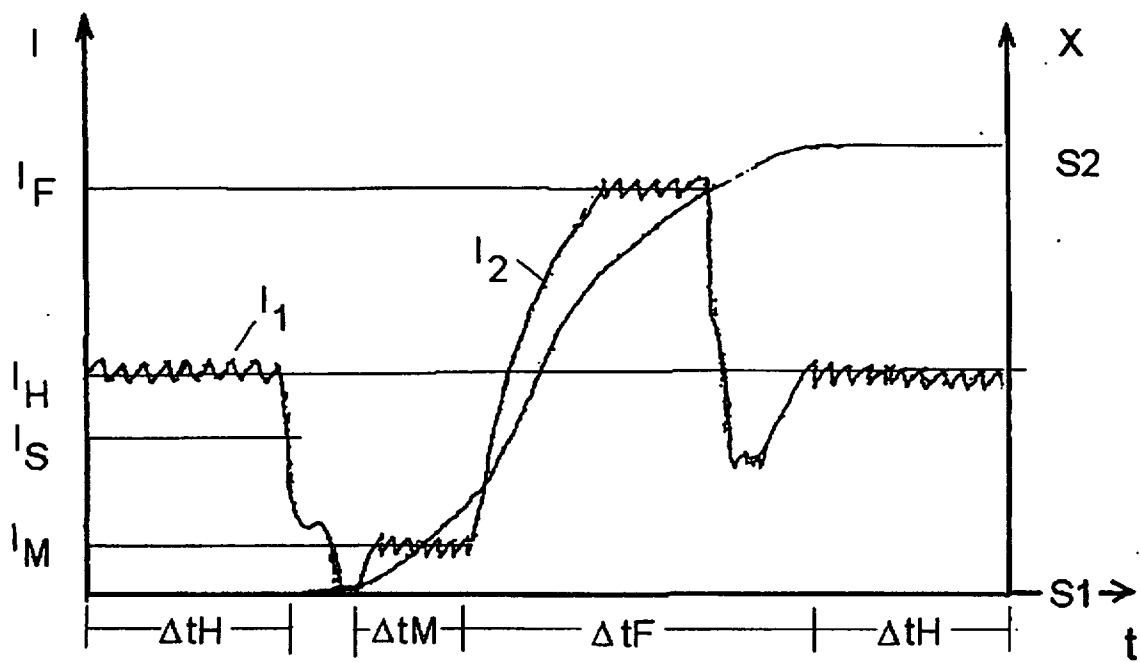


Fig. 5c

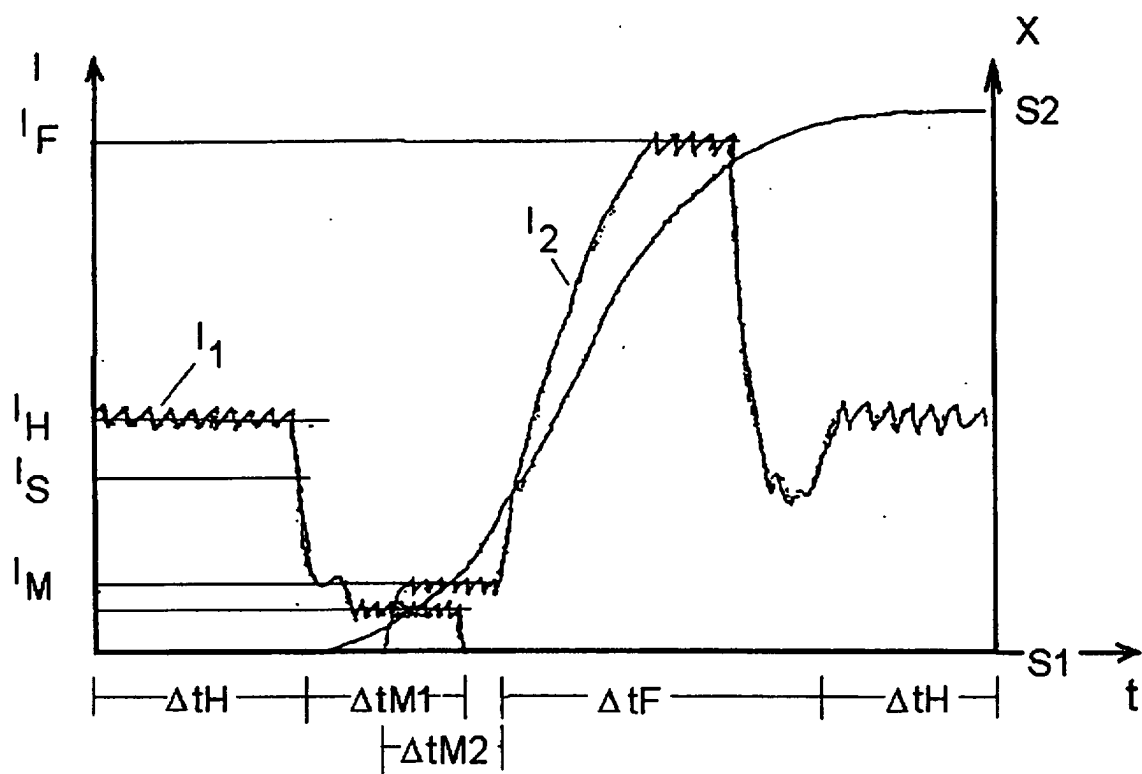


Fig. 5d

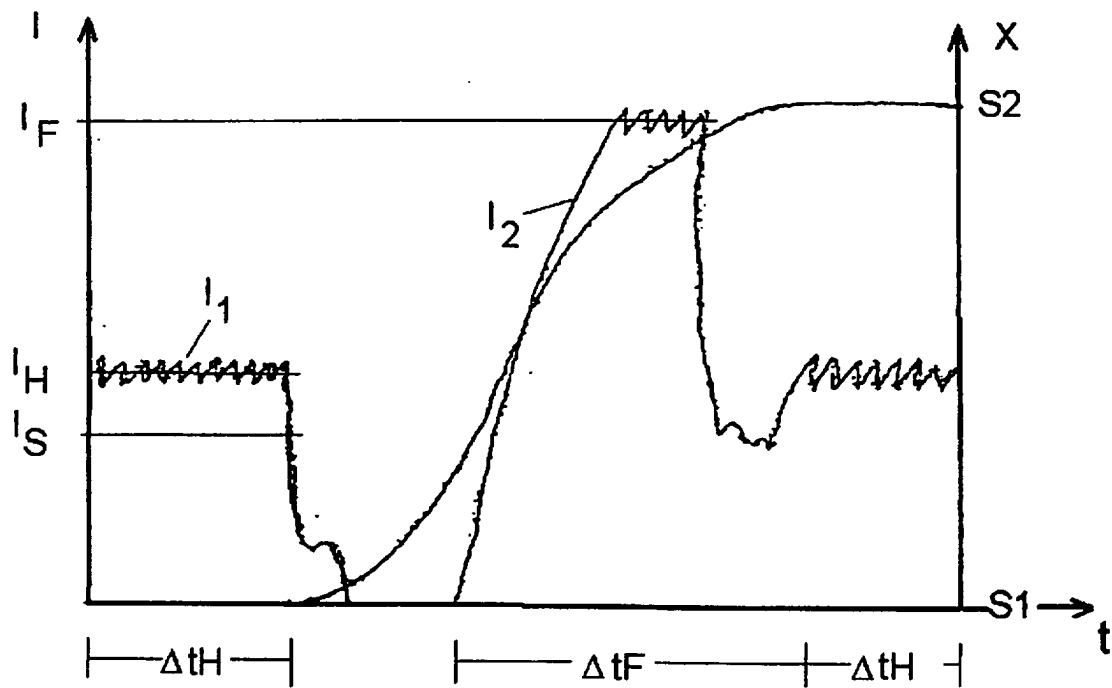


Fig. 6a

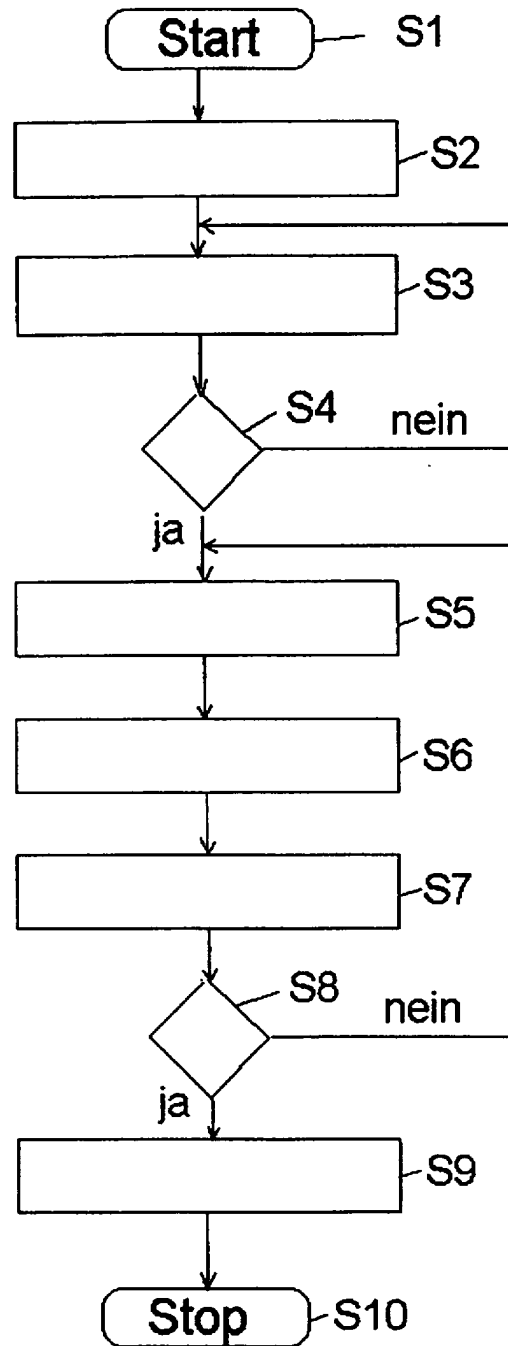
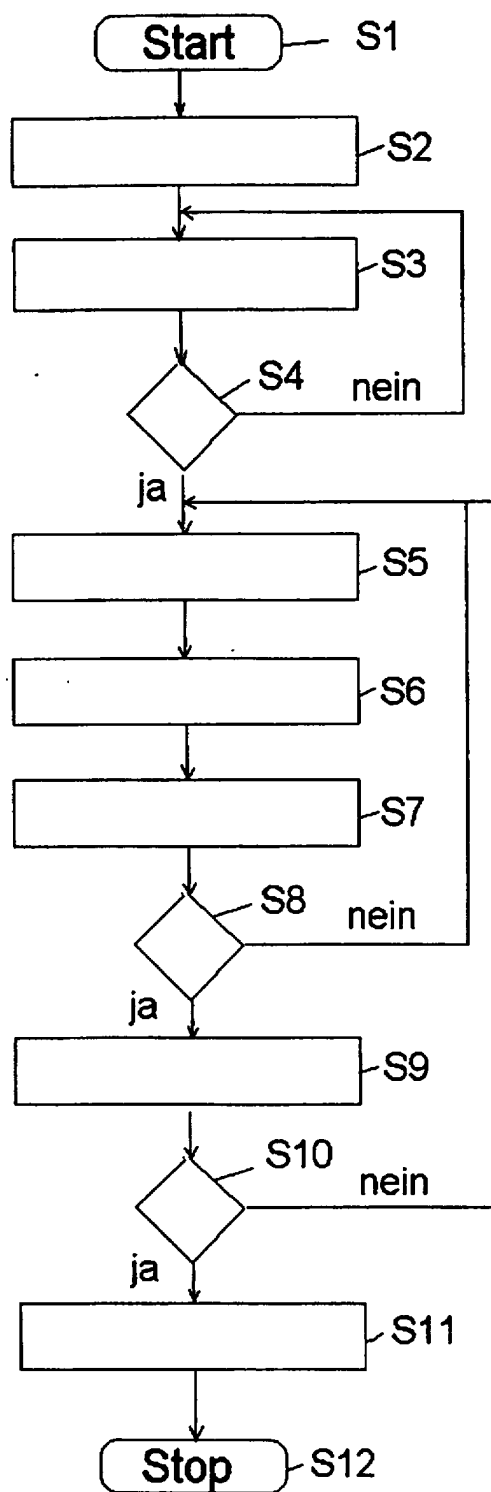


Fig. 6b



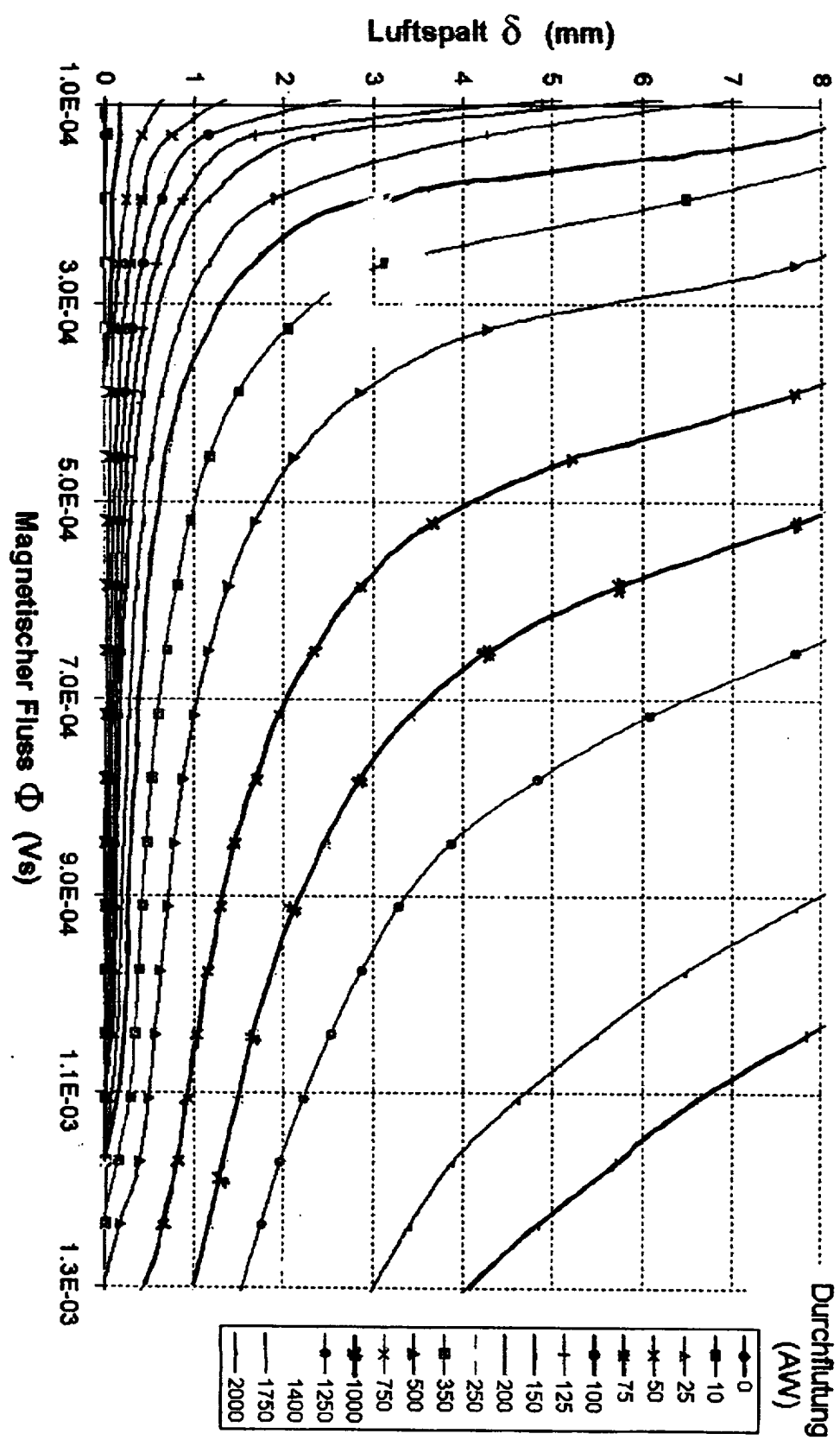


Fig. 7

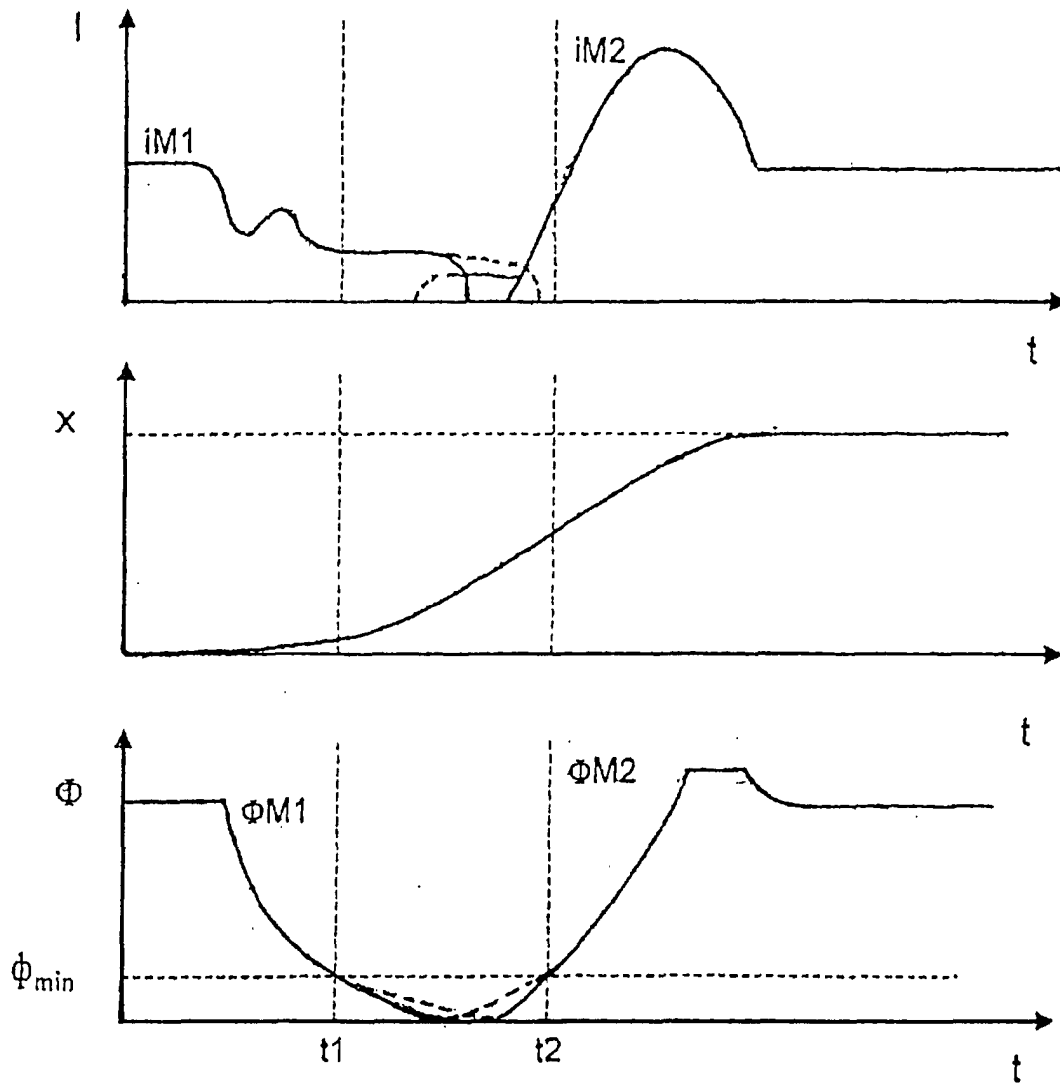


Fig. 8a

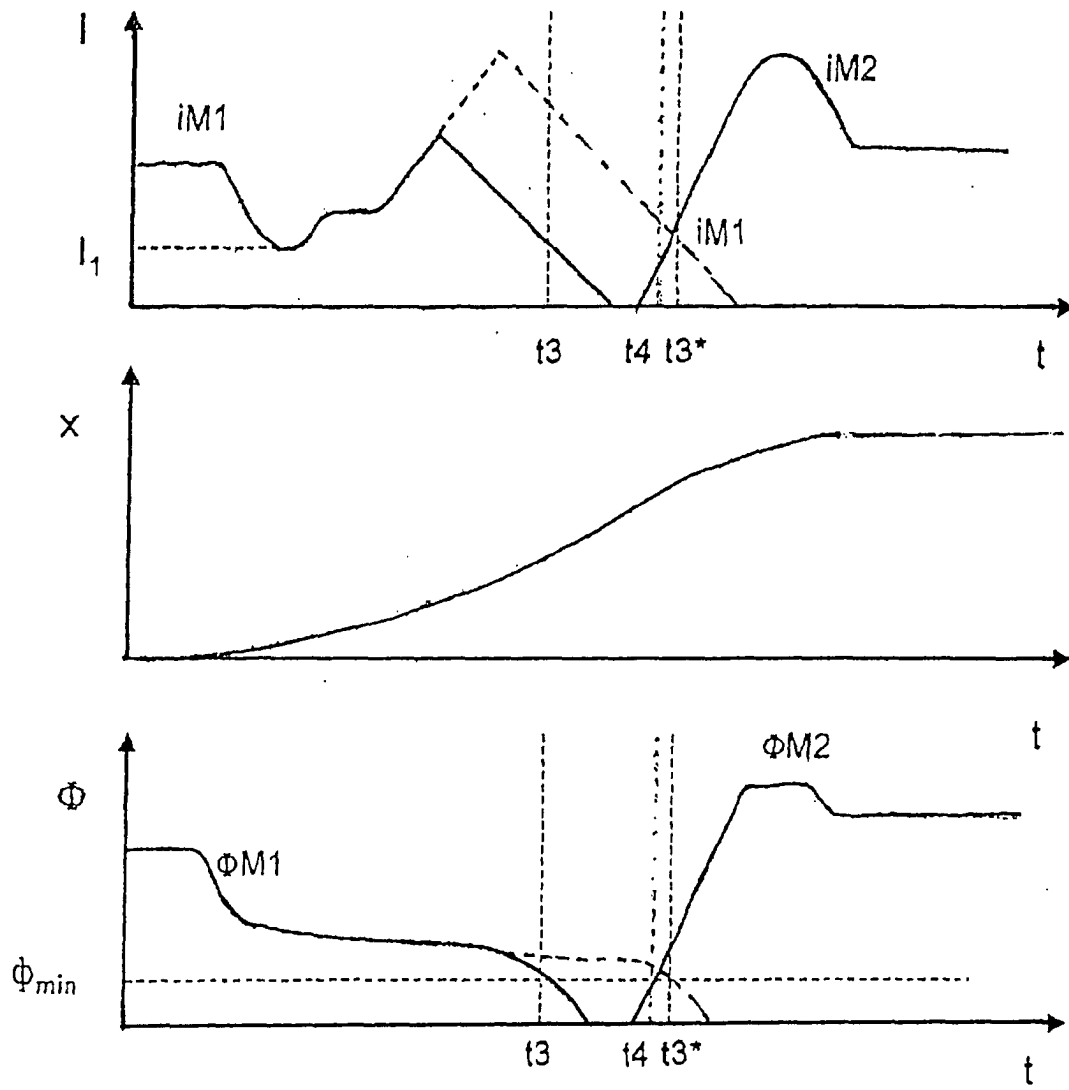


Fig. 8b

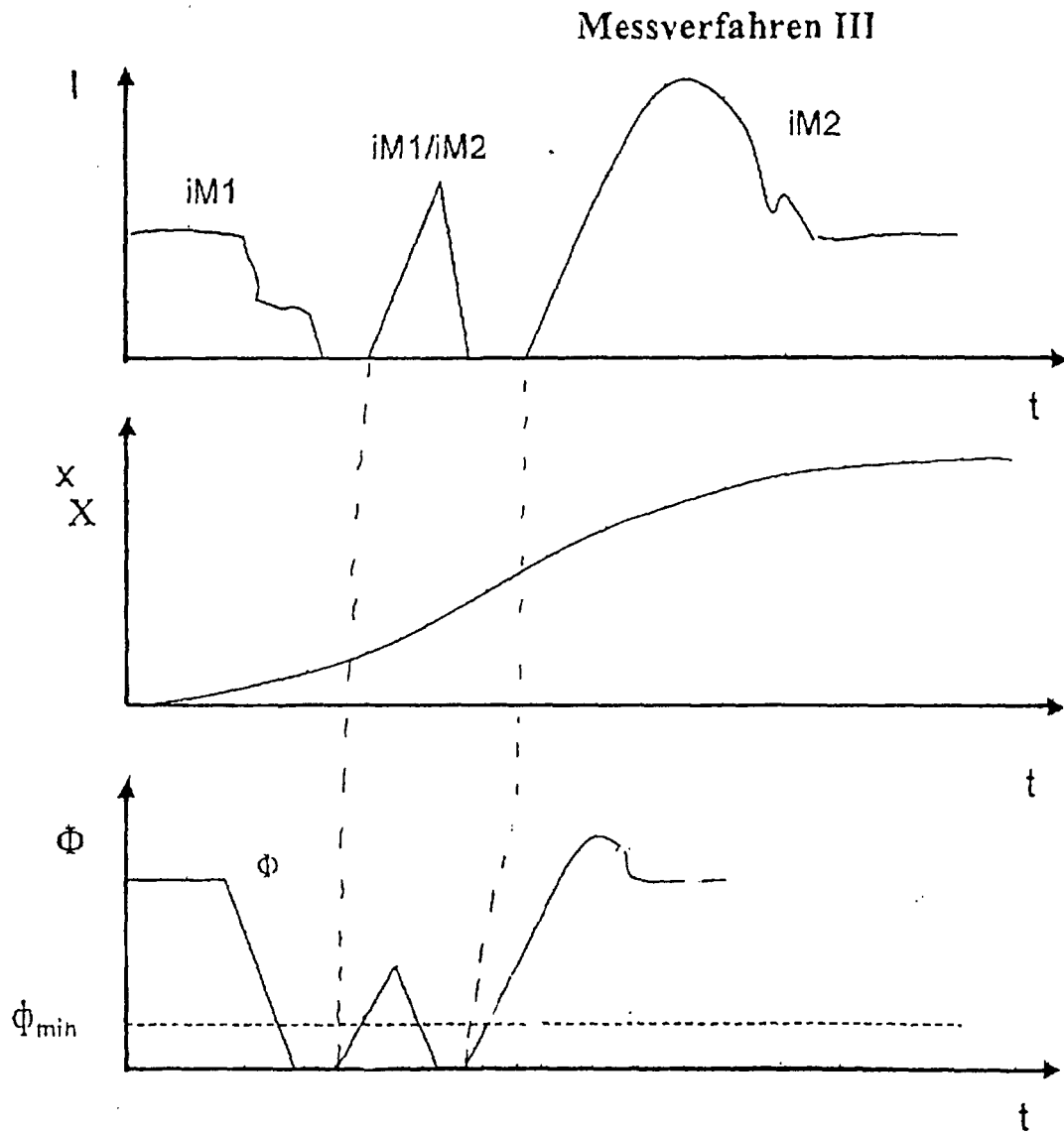


Fig. 8c