(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) **EP 3 224 465 B1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
16.10.2019 Patentblatt 2019/42

(21) Anmeldenummer: **15787557.6**

(22) Anmeldetag: **27.10.2015**

(51) Int Cl.:
F02D 41/20 *(2006.01)*

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2015/074903

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2016/083050 (02.06.2016 Gazette 2016/22)

(54) **VERFAHREN ZUM ERMITTELN DES ANKERHUBS EINES MAGNETAKTORS**

METHOD FOR DETERMINING THE ARMATURE STROKE OF A MAGNETIC ACTUATOR

PROCÉDÉ POUR DÉTERMINER LE TRAJET D'ARMATURE D'UN ACTIONNEUR MAGNÉTIQUE

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR

(30) Priorität: **27.11.2014 DE 102014224321**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
04.10.2017 Patentblatt 2017/40

(73) Patentinhaber: **Robert Bosch GmbH**
70442 Stuttgart (DE)

(72) Erfinder: **BEIER, Marco**
71229 Leonberg (DE)

(56) Entgegenhaltungen:
DE-A1- 10 034 830
DE-A1- 10 332 595
DE-A1-102009 042 777
DE-A1-102011 075 935
DE-A1-102012 000 766

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

EP 3 224 465 B1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln des Ankerhubs eines wenigstens einen Luftspalt und einen Anker aufweisenden Magnetaktors und ferner eine zum Durchführen eines derartigen Verfahrens geeignete Vorrichtung.

Stand der Technik

[0002] Derartige Aktoren können beispielsweise in Dieseleinspritzventilen bzw. Kraftstoffinjektoren zum Einsatz kommen, wo der Anker des Aktors mit einer Ventilnadel des Injektors mechanisch gekoppelt ist und der Ankerhub das Öffnungs- und Schließverhalten des Injektors und mithin die Einspritzmengendosierung bestimmt. Der Ankerhub kann sich jedoch während des Betriebs ändern, wodurch sich auch die Performance des gesamten Einspritzsystems ändern kann. Beispielsweise kommt es bei zu kleinem Ankerhub zu einem unerwünschten Androsseln des Einspritzventils, wohingegen bei einem zu groß eingestellten Ankerhub, z.B. infolge von Verschleißerscheinungen, in verstärktem Maße sog. Schließpreller auftreten, was die Ventilfunktion beträchtlich beeinträchtigen kann.

[0003] Aus der DE 10 2010 063 009 A1 ist ein Verfahren bekannt, das zum Ermitteln des Zeitpunkts des Beginns einer Bewegung eines einen Spulenantrieb aufweisenden Kraftstoffinjektors für einen Verbrennungsmotor eines Kraftfahrzeugs dient. Dazu umfasst das Verfahren die Schritte des Erfassens eines Stromverlaufs durch eine Spule des Spulenantriebs, des Erfassens eines Spannungsverlaufs einer an der Spule anliegenden Spannung, des Bestimmens einer magnetischen Hysteresekurve basierend auf dem erfassten Stromverlauf und dem erfassten Spannungsverlauf, des Vergleichens der magnetischen Hysteresekurve mit einer ersten vorgegebenen magnetischen Hysteresekurve, welche für einen in einer ersten Endposition fixierten Kraftstoffinjektor charakteristisch ist, und des Ermittelns des Zeitpunkts des Beginns der Bewegung basierend auf dem Vergleichsschritt. Bei diesem Stand der Technik werden jedoch lediglich Beginn und Ende der Öffnungs- bzw. Schließbewegung eines Ankers des Kraftstoffinjektors ermittelt, wozu jeweils zwei unterschiedliche Hysteresekurven erfasst werden müssen, um daraus eine die Öffnungs- bzw. Schließbewegung charakterisierende Sollwertabweichung zu ermitteln. Aus der DE 10 2011 075 935 A1 ist ein Verfahren bekannt, Funktions- und Fehlerzustände eines elektromagnetischen Aktors anhand eines Vergleichs mit zumindest einer magnetischen Referenzkennlinie zu ermitteln.

Vorteile der Erfindung

[0004] Das Verfahren mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 hat den Vorteil, dass der Ankerhub eines Magnetaktors mit relativ geringem messtechnischen und rechnerischen Aufwand ermittelbar ist. Dazu umfasst das Verfahren die Schritte des Bestimmens einer magnetischen Hysteresekurve des Magnetaktors, des Selektierens eines von einem Übergang des Ankers aus einer ersten stationären Endstellung in eine zweite stationäre Endstellung geprägten Kurvenabschnitts in der magnetischen Hysteresekurve, des Bestimmens des magnetischen Energiezustands des Magnetaktors in der zweiten stationären Endstellung des Ankers anhand des Verlaufs des selektierten Kurvenabschnitts, des Erzeugens eines Kurvenabschnitts im Intervall des selektierten Kurvenabschnitts, wobei der erzeugte Kurvenabschnitt den Magnetaktor mit dem in seiner ersten Endstellung fixierten Anker simuliert, um einen dazu korrespondierenden magnetischen Energiezustand des Magnetaktors zu bestimmen, und des Vergleichens der beiden Energiezustände des Magnetaktors basierend auf den Verläufen des selektierten Kurvenabschnitts und des erzeugten Kurvenabschnitts, um darauf basierend den Ankerhub zu ermitteln. Das erfindungsgemäße Verfahren eignet sich vorteilhaft auch für als Injektoren ausgebildete Magnetaktoren, um den Ankerhub in solchen Injektoren und mithin die Performance des zugehörigen Einspritzsystems laufend zu kontrollieren bzw. überwachen.

[0005] Weitere vorteilhafte Weiterbildungen und Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich durch die in den Unteransprüchen aufgeführten Maßnahmen.

[0006] Gemäß einer bevorzugten und besonders einfach ausführbaren Ausgestaltung der Erfindung wird zum Vergleichen der beiden Energiezustände deren Differenz gebildet.

[0007] Vorzugsweise wird zum Bestimmen der magnetischen Hysteresekurve des Magnetaktors der verkettete magnetische Fluss ψ in Abhängigkeit vom Strom I durch eine Spule des Magnetaktors erfasst. Der verkettete magnetische Fluss ist proportional zum Integral $\int U_{ind} dt$ und durch Messen der in einer Messspule des Magnetaktors induzierten Spannung und anschließende zeitliche Integration messtechnisch relativ einfach bestimmbar.

[0008] Die Erzeugung des Kurvenabschnitts erfolgt mittels wenigstens eines Polynoms, wobei die Koeffizienten und die Ordnung des Polynoms so gewählt werden, dass an durch Intervallgrenzen des selektierten Kurvenabschnitts vorgegebenen Anschlussstellen der magnetischen Hysteresekurve jeweils ein glatter Übergang erzielt wird. Unter einem glatten Übergang ist dabei zu verstehen, dass die den Kurvenabschnitt erzeugende Funktion an den Übergangsstellen bzw. Stützstellen bzw. Randpunkten zur erfassten Hysteresekurve stetige erste Ableitungen besitzt. Dadurch lässt sich der erzeugte Kurvenabschnitt ohne Diskontinuitäten in die Anschlussstellen der Hysteresekurve einpassen.

[0009] Eine vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass das Extrapolationsintervall für das wenigstens

eine Polynom in wenigstens zwei Teilintervalle zerlegt wird, wobei die Lage eines Knotens zwischen den Teilintervallen durch Projektion eines Punktes des selektierten Kurvenabschnitts auf eine Koordinatenachse bestimmt wird, wobei der Punkt etwa mit einem Ereignis korrespondiert, wo der Anker in seine zweite stationäre Endstellung gelangt. Dadurch ist es möglich, unterschiedliche Polynome in den Teilintervallen vorzusehen. Außerdem ist es für den Vergleich der jeweiligen Energiezustände, die mit dem selektierten Kurvenabschnitt und dem erzeugten Kurvenabschnitt korrespondieren, zweckmäßig, in dem selektierten Kurvenabschnitt nur denjenigen Bereich zu berücksichtigen, bei dem sich der Anker in seiner Ruhestellung, d.h. in seiner zweiten stationären Endstellung befindet; diesem Bereich wird das entsprechend zugeordnete Teilintervall des erzeugten Kurvenbereichs gegenübergestellt, um aus dem Vergleich bzw. der Differenz zwischen den Kurvenverläufen den Ankerhub ermitteln zu können.

[0010] Nach einer zweckmäßigen Ausführungsvariante der Erfindung wird das wenigstens eine Polynom im durch die Intervallgrenzen des selektierten Kurvenabschnitts vorgegebenen Extrapolationsintervall als kubische Spline-Funktion ausgebildet.

[0011] Eine besonders einfach zu realisierende Ausführungsvariante der Erfindung sieht vor, dass ein Kurvenabschnitt selektiert wird, der durch ein Abfallen des Ankers aus seiner ersten stationären Endstellung in seine zweite stationäre Endstellung geprägt ist. Die Abfallbewegung des Ankers ist in der Hystereseschleife des Magnetaktors deutlich markanter auszumachen und zu identifizieren als die dazu gegenläufige Ankeranzugbewegung, da die letztere typischerweise in den magnetischen Sättigungsbereich der Hystereseschleife hineinläuft und wegen des dort eher flachen Kurvenverlaufs nur relativ schwach ausgeprägt ist.

[0012] Eine bevorzugte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht darin, dass der Verlauf des mittels wenigstens eines Polynoms erzeugten Kurvenabschnitts im ersten Teilintervall eine konstante Steigung aufweist, welche mittels einer das Ankerhubverhalten des Magnetaktors charakterisierenden und durch den Quotienten $\Delta I/\Psi$ definierten physikalischen Kenngröße festgelegt wird, wobei ΔI eine Stromstärkendifferenz bezeichnet, die durch die Differenz definiert ist zwischen einem Strom I' durch den Magnetaktor bei aus der ersten stationären Endstellung abgefallenem Anker und einem Strom I" durch den Magnetaktor bei in der ersten stationären Endstellung fixiertem Anker, während mit Ψ ein der Stromstärkendifferenz ΔI zugeordneter verketteter magnetischer Fluss bezeichnet ist. Diese physikalische Kenngröße ist einerseits eine theoretisch herleitbare und andererseits eine experimentell gewinnbare Hilfsgröße, mit welcher die Koeffizienten des Polynoms im ersten Teilintervall ermittelbar sind. Zur Gewinnung dieser Kenn- bzw. Hilfsgröße genügen zwei Messreihen, die einmalig für jeden Magnetaktortyp durchgeführt werden.

[0013] Zum Ermitteln des Ankerhubs wird die gesamte Querschnittsfläche des wenigstens einen Luftspalts berücksichtigt, indem der Ankerhub Δh gemäß nachfolgender Gleichung berechnet wird:

$$\Delta h = \frac{2 \cdot \Delta E \cdot n^2 \cdot \mu_0}{\psi^2 \cdot \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right)},$$

wobei mit ΔE die magnetische Energiedifferenz zwischen den mit dem selektierten Kurvenabschnitt und dem erzeugten Kurvenabschnitt korrespondierenden Energiezuständen, mit n die Windungszahl der Spule des Magnetaktors, mit μ_0 die magnetische Permeabilität des Vakuums, mit ψ der verkettete magnetische Fluss und mit A_1 und A_2 Querschnittsflächen des Luftspalts bezeichnet sind.

[0014] Eine zum Durchführen des erfindungsgemäßen Verfahrens geeignete Vorrichtung umfasst eine Signalerzeugungseinrichtung zum Ansteuern des Magnetaktors und eine Detektionseinrichtung zum Bestimmen einer Hysteresekurve des angesteuerten Magnetaktors sowie eine Rechen- und Auswerteeinrichtung, wobei die Auswerteeinrichtung ausgebildet ist zum Selektieren eines von einem Übergang des Ankers aus einer ersten stationären Endstellung in eine zweite stationäre Endstellung geprägten Kurvenabschnitts in der magnetischen Hysteresekurve, zum Bestimmen des magnetischen Energiezustands des Magnetaktors in der zweiten stationären Endstellung des Ankers anhand des Verlaufs des selektierten Kurvenabschnitts, zum Erzeugen eines Kurvenabschnitts im Intervall des selektierten Kurvenabschnitts, wobei der erzeugte Kurvenabschnitt den Magnetaktor mit dem in seiner ersten Endstellung fixierten Anker simuliert, um einen dazu korrespondierenden magnetischen Energiezustand des Magnetaktors zu bestimmen, und zum Vergleichen der beiden Energiezustände des Magnetaktors basierend auf den Verläufen des selektierten Kurvenabschnitts und des erzeugten Kurvenabschnitts, um darauf basierend den Ankerhub zu ermitteln.

Zeichnungen

[0015] Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in der nachfolgenden Beschreibung und in den beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Letztere zeigen in schematisch gehaltenen Ansichten:

Fig. 1 den Verlauf einer Hysterese-Kennlinie eines Magnetkreises bzw. Magnetaktors, wobei der verkettete magnetische Fluss ψ in Abhängigkeit vom Strom I bei symmetrischer Ansteuerung des Magnetkreises aufgetragen ist,

Fig. 2 einen Teil der Kennlinie von Fig. 1,

Fig. 3A ein Diagramm mit ψ-Kennlinien von zwei Magnetkernmaterialien für drei unterschiedlich groß bemessene Luftspalte in Abhängigkeit vom Strom I,

Fig. 3B ein Diagramm mit Kennlinien von zwei Magnetkernmaterialien, wobei das magnetische Feld B in Abhängigkeit von H aufgetragen ist,

Fig. 4 den Verlauf einer physikalischen Kenngröße für einen in unterschiedlichen Materialausführungsvarianten ausgebildeten Magnetaktor in Abhängigkeit vom verketteten magnetischen Fluss ψ,

Fig. 5 ein Flussdiagramm mit den wesentlichen Verfahrensschritten des erfindungsgemäßen Verfahrens,

Fig. 6 ein Ansteuerdiagramm zur symmetrischen Ansteuerung eines Magnetaktors, wobei die Spannung bzw. der Strom in Abhängigkeit von der Zeit t aufgetragen ist,

Fig. 7A ein Ansteuerdiagramm zur einseitigen Ansteuerung eines Magnetaktors, und

Fig. 7B den Verlauf einer Hysterese-Kennlinie eines gemäß dem Ansteuerdiagramm von Fig. 7A angesteuerten Magnetaktors.

Beschreibung der Ausführungsbeispiele

[0016] Fig. 1 zeigt zur Veranschaulichung des Prinzips des erfindungsgemäßen Verfahrens den Verlauf der ψ-Kennlinie eines Magnetkreises als Hysterese-Schleife 10 in Abhängigkeit vom Strom I. Dabei ist auf der Abszisse der Strom I durch die Erregerspule des Magnetkreises aufgetragen, während auf der Ordinate der verkettete magnetische Fluss ψ aufgetragen ist. Der verkettete magnetische Fluss ψ wird durch Integration der in einer Messspule des Magnetkreises induzierten Spannung U_{ind} über die Zeit t, also durch das Integral $\int U_{ind} dt$ bestimmt. Der Erfindung liegt nun die Erkenntnis zugrunde, dass Bewegungen des Ankers relativ zum Luftspalt und somit die damit verknüpften Schaltvorgänge des Magnetkreises bzw. Aktors sich am Kurvenverlauf der Hystereseschleife 10 manifestieren. Derartige Ankerbewegungen sind durch Abfallen bzw. Anziehen des Ankers relativ zum Luftspalt des Aktors charakterisiert. So ist beispielsweise der mit Abfallen des Ankers aus dem Bereich des Luftspalts entsprechend verknüpfte Schaltvorgang des Aktors einem Kurvenabschnitt der Hysteresekurve 10 aufgeprägt und ist anhand einer Eindellung 11 im Verlauf des oberen rücklaufenden Kurvenzweigs 13 im ersten Quadranten des Diagramms ersichtlich; eine demgegenüber gegenläufige Bewegung des Ankers, also ein Anziehen des Ankers in Richtung des Luftspalts, manifestiert sich z.B. bei negativen Funktionswerten von ψ und I im Verlauf des oberen rücklaufenden Kurvenzweigs 13 im dritten Quadranten des Diagramms anhand eines mit geringer Steigung verlaufenden Kurvenstücks 14 in der Nähe zum Sättigungsbereich 15'. Aus Symmetriegründen sind im Verlauf des unteren vorlaufenden Kurvenzweigs 16 der Hystereseschleife 10 eine Ankerabfallbewegung und eine Ankeranziehbewegung ersichtlich. Durch das Abfallen des Ankers, also einer vom Luftspalt des Aktors wegführenden Ankerbewegung, die dann erfolgt, wenn die Stromstärke I ausgehend von dem Sättigungsbereich 15 bzw. 15' verringert wird, bis ein mit Bezugsziffer 17 bezeichneter Stromschwellenwert erreicht oder unterschritten wird, vergrößert sich der Luftspalt, wobei sich der verkettete magnetische Fluss ψ ändert. Durch ein Anziehen des Ankers, also eine luftspaltverkleinernde Ankerbewegung, die dann erfolgt, wenn die Stromstärke oder deren Betrag zum Sättigungsbereich 15 bzw. 15' hin erhöht wird, bis ein mit Bezugsziffer 19 bezeichneter Stromschwellenwert erreicht oder überschritten wird, verkleinert sich der Luftspalt, wobei sich ebenfalls der verkettete magnetische Fluss ψ ändert. Die Hystereseschleife 10 zeigt somit jeweils zwei Ankerabfallbewegungen und zwei Ankeranziehbewegungen, insgesamt also vier Schaltvorgänge, welche durch lokale ψ-Änderungen charakterisiert sind.

[0017] Fig. 2 zeigt den oberen bzw. rücklaufenden Kurvenzweig 13 der Hysteresekurve bzw. ψ-Kennlinie 10 des Magnetkreises bzw. Magnetaktors im ersten Quadranten des Diagramms von Fig. 1. Der Kurvenzweig 13 weist - bei Stromstärken unterhalb der Sättigung 15 - einen Kurvenabschnitt 20 auf, welcher vom Abfall des Ankers aus seiner Endstellung an einem Magnetkern hin zu einer Endstellung bzw. Ruhestellung weg vom Magnetkern geprägt ist. Dieser Kurvenabschnitt 20 erstreckt sich, wie anhand der charakteristischen Eindellung 11 ersichtlich ist, von einem Punkt $P2(I_2, \psi_2)$ der Hysteresekurve 10, welcher den Einsatz der Abfallbewegung des Ankers bei einem Strom I_2 und einem magnetischen Fluss ψ_2 markiert, bis hinunter zur I-Achse bei $\psi = 0$, also bis zu einem zur Koerzitivfeldstärke äquivalenten Koordinatenpunkt K, und repräsentiert einen Energiezustand E_1 des Magnetkreises bei aus dem Luftspalt abgefallener

Stellung des Ankers. Dabei ist dieser Energiezustand E_1 bestimmbar, indem die Fläche zwischen dem Verlauf des Kurvenabschnitts 20 und der ψ-Achse durch Integration innerhalb der den Kurvenabschnitt 20 begrenzenden Intervallgrenzen berechnet wird, wie im einzelnen nachfolgend noch erläutert wird.

[0018] In Fig. 2 ist zudem ein mittels einer Approximation berechneter bzw. konstruierter Kurvenabschnitt 22 dargestellt, der von dem Punkt P2 über den Punkt P1 bis hinunter zur I-Achse bei $\psi = 0$ verläuft und - anstelle der Eindellung 11 - den lokalen Kurvenverlauf der Hysterese für den hypothetischen Fall simuliert, dass der Anker am Magnetkern, d.h. in angezogener Endstellung, festgehalten bzw. fixiert wird, so dass er nicht vom Magnetkern abfallen kann; dieser Kurvenabschnitt 22 repräsentiert somit einen Energiezustand E_2 des Magnetkreises bzw. Magnetaktors bei angezogener Endstellung des Ankers. Auch dieser Energiezustand E_2 ist bestimmbar, indem die Fläche zwischen dem Verlauf dieses extrapolierten Kurvenabschnitts 22 und der ψ-Achse durch Integration innerhalb der den extrapolierten Kurvenabschnitt 22 begrenzenden Intervallgrenzen berechnet wird, wie im einzelnen nachfolgend noch erläutert wird. Da die Querschnittfläche des Luftspalts sowohl in abgefallener wie auch in angezogener Ankerstellung konstant bleibt, ist aus der Differenz der beiden Energiezustände $E_1 - E_2$ der Ankerhub unter Berücksichtigung der Querschnittfläche des Luftspalts ermittelbar. Um den Kurvenabschnitt 22 zwischen den Intervallgrenzen K und P2 mittels Extrapolation auszubilden, wird eine Funktion F erzeugt, die durch wenigstens ein Polynom gebildet wird. Dabei sind die Koeffizienten und die Ordnung des Polynoms bzw. der Polynome so gewählt, dass an den die Intervallgrenzen bildenden Übergangsstellen zur erfassten Hysteresekurve 10, d.h. an dem Punkt P2 und an dem Punkt K bei $\psi = 0$ auf der negativen I-Achse, jeweils ein glatter Übergang existiert. Unter einem glatten Übergang ist dabei zu verstehen, dass die Funktion an den Übergangsstellen bzw. Stützstellen bzw. Randpunkten zur erfassten Hysteresekurve stetige erste Ableitungen besitzt. Gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird das Approximationsintervall [K, P2] des erzeugten Kurvenabschnitts in zwei Teilintervalle zerlegt, wobei ein erstes Teilintervall [K, P1] mit einer darin erzeugten Funktion F1 den Bereich relativ kleiner Stromstärken von K bis P1(I_1, ψ_1) überdeckt, während ein zweites Teilintervall [P1, P2] sich zu höheren Stromstärken hin an das erste Teilintervall anschließt und sich mit einer darin erzeugten Funktion F2 von dem Punkt P1(I_1, ψ_1) bis zum Punkt P2(I_2, ψ_2) erstreckt. Die beiden Funktionen F1 und F2 sind Teilfunktionen der Funktion F. Die Lage des Knotens P1 zwischen den beiden Teilintervallen ergibt sich aus der Analyse des selektierten Kurvenabschnitts 20, denn im selektierten Kurvenabschnitt 20 markiert der Punkt beim Stromwert I1 die Ruhestellung des Ankers im abgefallenen Zustand, da der Anker bei P2 eine dort einsetzende Abfallbewegung ausführt, die von Oszillationen 27 aufgrund von Ankerprellvorgängen überlagert wird; diese Oszillationen 27 sind beim Stromwert I1 zumindest näherungsweise abgeklungen. Die Projektion dieses Punktes im Kurvenverlauf des selektierten Kurvenabschnitt 20, wo die Oszillationen 27 abgeklungen sind und mithin der Anker in seine Ruhestellung gelangt ist, auf die horizontale Koordinatenachse bestimmt somit die Lage des Knotens P1 zwischen den Teilintervallen F1 und F2.

[0019] Für die Teilfunktion F1 im Teilintervall [K, P1] wird vorzugsweise ein Polynom erster Ordnung, also ein Geradensegment mit konstanter Steigung gewählt, da in diesem Intervallbereich, also bei relativ kleinen Strömen im Verhältnis zum Sättigungsbereich, die das Ankerhubverhalten des Magnetaktors charakterisierende physikalische Kenngröße AKG, die als physikalische Hilfsgröße zur Extrapolation in diesem Teilintervall dient, in guter Näherung einen konstanten Verlauf aufweist, wie im übrigen das in Fig. 4 dargestellte Diagramm veranschaulicht, und mithin ein Maß für die Steigung $\Delta I/\Delta\psi$ des Geradensegments darstellt.

[0020] Für die Teilfunktion F2 im Teilintervall [P1, P2] wird ein Polynom gewählt, dessen Ordnung und Koeffizienten so bemessen werden, dass die jeweilige Steigung der Funktion F2 an den Teilintervallgrenzen P1, P2 mit den Steigungen dort übereinstimmt und dazwischen ein praktisch fließender Verlauf erzielt wird.

[0021] Der approximierte Funktionsverlauf für den extrapolierten Kurvenabschnitt 22 teilt sich somit in die Teilfunktionen F1 und F2 auf. Wegen der glatten Übergänge am Knotenpunkt P1 zwischen den beiden Teilintervallen und am Randpunkt P2 gilt für die ersten Ableitungen der Funktionen an der Stelle I1:

$$\frac{d}{dI}F1(I1) = \frac{d}{dI}F2(I1) \qquad \text{Gleichung (1)}$$

[0022] An der Stelle I2 gilt:

$$\frac{d}{dI}F2(I2) = \frac{d}{dI}f(I2) \qquad \text{Gleichung (2)}$$

[0023] Dabei ist f die Funktion der erfassten Hysteresekurve im Kurvenanschlussstück 24 bei Stromstärken $I \geq I2$ zum Sättigungsbereich 15 hin, wo sich der Anker des Magnetaktors noch in angezogener Position befindet. Außerdem gilt an der oberen Intervallgrenze P2(I2, ψ2) und an der unteren Intervallgrenze K(I_K, ψ=0):

$$F2\,(I2) = f\,(I2) \qquad \text{Gleichung (3)}$$

$$F1\,(I_K) = f\,(I_K) \qquad \text{Gleichung (4)}$$

[0024] Mit diesen vier Gleichungen werden die Koeffizienten der den Teilfunktionen F1 und F2 zugeordneten Polynome berechnet bzw. festgelegt, um den erzeugten Kurvenabschnitt 22 in die Anschlussstellen K und P2 der gemessenen Hysteresekurve 10 einzufügen bzw. anzupassen. Vorzugsweise ist die sich aus den Teilfunktionen F1 und F2 zusammensetzende Funktion F in den beiden Teilintervallen als kubische Spline-Funktion ausgebildet.

[0025] Um zunächst die Koeffizienten des Polynoms in dem ersten Teilintervall zu ermitteln, wird ein Iterationsprozess im ersten Teilintervall zwischen K und P1 initialisiert, wobei die durch die physikalische Kenngröße AKG vorgegebene Steigung in das Polynom eingesetzt wird und anschließend dieser Startwert solange variiert wird, bis sich im Zusammenwirken mit dem im zweiten Teilintervall wirkenden Polynom, eine Minimierung der Abweichungen in den Randpunkten K und P2 einstellt und dadurch ein kontinuierlicher Verlauf der erzeugenden Funktion F über beide Teilintervalle - ohne Diskontinuitäten an den Randpunkten - erzielen lässt.

[0026] Um nun die Energiedifferenz ΔE als Maß für den Ankerhub zu ermitteln, wird einerseits der Verlauf des selektierten Kurvenabschnitts 20 in den Grenzen des ersten Teilintervalls integriert und andererseits der Verlauf des erzeugten Kurvenabschnitts 22 in den Grenzen des ersten Teilintervalls integriert, wobei die jeweilige Integration über das Differential $d\psi$ erfolgt. Durch die Festlegung des ersten Teilintervalls als Integrationsbereich für die zwei Integrationen bleiben aufgrund von Ankerprellbewegungen verursachte Oszillationen im zweiten Teilintervall des selektierten Kurvenabschnitts 20 bei der Berechnung der Integrale außer Betracht und können somit nicht die Berechnung verfälschen. Zum Ausführen der Integrationen wird sowohl für den selektierten Kurvenabschnitt 20 wie auch für den erzeugten Kurvenabschnitt 22 in einem vorherigen Schritt jeweils eine Koordinatentransformation bzw. Koordinatenverschiebung so durchgeführt, dass die Kurvenabschnitte 20 und 22 durch den Koordinatennullpunkt durchgehen. Danach werden die beiden Integrationen ausgeführt, um die beiden Energiezustände zu berechnen, worauf die Differenz zwischen den beiden Integrationsresultaten gebildet wird, die als Energiedifferenz ΔE ein Maß für den Ankerhub darstellt. Um dann den Ankerhub zu ermitteln, wird zusätzlich der Luftspaltquerschnitt des Magnetaktors berücksichtigt.

[0027] Generell wird der Ankerhub Δh gemäß nachfolgender Gleichung berechnet:

$$\Delta h = \frac{2 \cdot \Delta E \cdot n^2 \cdot \mu_0}{\psi^2 \cdot \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right)} \qquad \text{Gleichung (I),}$$

wobei mit ΔE die magnetische Energiedifferenz zwischen den mit dem selektierten Kurvenabschnitt 20 und dem erzeugten Kurvenabschnitt 22 korrespondierenden Energiezuständen E_1 und E_2, mit n die Windungszahl der Spule des Magnetaktors, mit μ_0 die magnetische Permeabilität, mit ψ der verkettete magnetische Fluss und mit A1 und A_2 Querschnittsflächen des Luftspalts bezeichnet sind. Die magnetische Permeabilität μ_0 des Vakuums ist mit einem Wert von $1.26 \cdot 10^{-6}$ $VsA^{-1}m^{-1}$ definiert.

[0028] Die Herleitung der obigen Gleichung sei beispielhaft anhand eines Magnetaktors erläutert, welcher als Topfmagnet ausgebildet ist, dessen Luftspalt zwei Luftspaltquerschnittsflächen A_1 und A_2 aufweist. Die magnetische Energiedichte ergibt sich gemäß der nachfolgenden Gleichung:

$$E \propto \int H \cdot dB \qquad \text{Gleichung (II),}$$

[0029] Dabei ist mit H die magnetische Feldstärke bezeichnet, während mit B das Magnetfeld bezeichnet ist. Mit $B = \mu_0 H$ und $B = \psi / (n\,A)$ ergibt sich die nachfolgende Gleichung für die magnetische Energie E im Luftspalt:

$$E = \frac{1}{2} \cdot \frac{\psi^2}{n^2 \cdot \mu_0} \cdot \left(\frac{h_1}{A_1} + \frac{h_2}{A_2} \right) \qquad \text{Gleichung (III),}$$

[0030] Dabei bezeichnen h_1 und h_2 die unterschiedlichen Höhen des Luftspalts in Abhängigkeit von der Ankerendstellung.

[0031] Wird der Anker um einen Ankerhub Δh zwischen seinen Endstellungen bewegt, so ergibt sich nachfolgende Gleichung:

$$E = \frac{1}{2} \cdot \frac{\psi^2}{n^2 \cdot \mu_0} \cdot \left(\frac{h_1 + \Delta h}{A_1} + \frac{h_2 + \Delta h}{A_2} \right) \qquad \text{Gleichung (IV)}$$

[0032] Für die Energiedifferenz ergibt sich mithin gemäß nachfolgender Gleichung:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot \frac{\psi^2}{n^2 \cdot \mu_0} \cdot \left(\frac{h_1 + \Delta h}{A_1} + \frac{h_2 + \Delta h}{A_2} - \frac{h_1}{A_1} - \frac{h_2}{A_2} \right) \qquad \text{Gleichung (V)}$$

[0033] Anders formuliert ergibt sich daraus die nachfolgende Gleichung:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot \frac{\psi^2}{n^2 \cdot \mu_0} \cdot \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) \cdot \Delta h \qquad \text{Gleichung (VI)}$$

[0034] Die Umstellung der Gleichung (VI) ergibt dann die obige Gleichung (I).

[0035] Die der Ermittlung des Ankerhubs zugrundeliegenden Integrationen werden durchgeführt, indem für den selektierten Kurvenabschnitt 20 und den erzeugten Kurvenabschnitt 22 jeweils das Integral $\int I \cdot d\psi$ im ersten Teilintervall berechnet wird, wobei sich das Integral von $\psi = 0$ bis zum ψ-Wert im Punkt P1 erstreckt. Der Integrand I bezeichnet dabei den Stromverlauf der Funktion im ersten Teilintervall, während mit $d\psi$ das Differential bezeichnet ist.

[0036] Anhand Fig. 3A, 3B und 4 sind die physikalischen Grundlagen veranschaulicht, auf denen das erfindungsgemäße Verfahren beruht.

[0037] Fig. 3A zeigt die Kennlinienverläufe für zwei unterschiedliche Magnetkernmaterialien eines Magnetkreises bzw. Magnetaktors mit jeweils verschieden groß bemessenen Luftspalten d1, d2 und d3, wobei der verkettete magnetische Fluss ψ als Funktion des Stroms I durch den Magnetkreis aufgetragen ist. Das erste Magnetkernmaterial ist anhand von gestrichelten Kurven dargestellt, während das zweite Magnetkernmaterial anhand von durchgezogenen Kurven dargestellt ist. Dabei gilt für die verschieden groß bemessenen Luftspalte im jeweiligen Magnetkreis: d1 > d2 > d3. Aufgrund der ψ-Kennlinien ist ersichtlich, dass, je größer der jeweilige Luftspalt ist, desto kleiner der verkettete magnetische Fluss ψ bei gleichem Strom I im Magnetkreis ist.

[0038] Fig. 3B zeigt ein Diagramm, bei dem für die zwei unterschiedlichen Magnetkernmaterialien des jeweiligen Magnetkreises bzw. Magnetaktors von Fig. 3A das magnetische Feld B in Abhängigkeit von der magnetischen Feldstärke H aufgetragen ist, wobei das erste Magnetkernmaterial anhand einer gestrichelten Kurve dargestellt ist, während das zweite Magnetkernmaterial anhand einer durchgezogenen Kurve dargestellt ist. Danach weist das erste Magnetkernmaterial mit zunehmendem H einen niedrigeren B-Wert und mithin eine geringere Energiedichte als das zweite Magnetkernmaterial auf. Mithin ist aus Fig. 3A und Fig. 3B ersichtlich, dass sich die unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften der beiden Magnetkernmaterialien energetisch in den beiden dargestellten Kennlinien manifestieren.

[0039] Fig. 4 zeigt den Verlauf der physikalischen Kenngröße AKG in Abhängigkeit vom verketteten magnetischen Fluss ψ für einen als Magnetventil mit Anker ausgebildeten Magnetaktor bzw. Magnetkreis in unterschiedlichen Ausführungsvarianten, welche zwei unterschiedliche Magnetkernmaterialien und zwei durch unterschiedlich große Luftspalte festgelegte Ankerhübe umfassen. Auf der Ordinate ist die physikalische Kenngröße AKG in der Einheit $A \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$ aufgetragen. Auf der Abszisse ist der verkettete magnetische Fluss ψ in der Einheit V•s aufgetragen. Die AKG-Kennlinien für den mit einem ersten Magnetkernmaterial ausgebildeten Magnetaktor sind anhand von zwei gestrichelten Kurven 28, 28' dargestellt, während die AKG-Kennlinien für den mit einem zweiten Magnetkernmaterial ausgebildeten Magnetaktor anhand von zwei durchgezogenen Kurven 29, 29' dargestellt sind. Die beiden unteren Kennlinien 28, 29 unterscheiden sich von den beiden oberen Kennlinien 28', 29' dadurch, dass bei den beiden oberen Kennlinien 28', 29' der Luftspalt in abgefallener Ankerstellung größer bemessen ist als bei den beiden unteren Kennlinien 28, 29. Die physikalische Kenngröße AKG ist durch die Beziehung $AKG = \Delta I / \psi$ definiert, wobei die Stromstärkendifferenz ΔI festgelegt ist durch die Differenz zwischen dem Strom I' durch den Magnetaktor in aus dem Luftspalt abgefallener Stellung des Ankers und dem Strom I" durch den Magnetaktor in einer Ankerstellung, bei welcher der Anker im Luftspalt fixiert ist, somit für

die Stromstärkendifferenz $\Delta I = I' - I''$ gilt. Zur Gewinnung der einzelnen AKG-Kennlinien wird jeweils einerseits die Hystereseschleife des Magnetaktors mit frei beweglichem Anker und andererseits die Hystereseschleife des Magnetaktors mit im Luftspalt fixiertem Anker gemessen und aufgezeichnet bzw. gespeichert, worauf in der ersten Hystereseschleife ein Kurvenbereich selektiert wird, der typischerweise durch ein Abfallen des Ankers aus dem Luftspalt charakterisiert ist, und die diesem Kurvenbereich zugeordneten und als Wertepaare abgespeicherten Messwerte $W_1(\psi(i), I'(i))_i = {}_{1...N}$ aus der Messreihe extrahiert werden, um mit Messwerten $W_2(\psi(i), I''(i))_i = {}_{1...N}$ aus der zweiten gemessenen Hystereseschleife verglichen zu werden, wobei die Messwerte $W_2(\psi(i), I''(i))_i = {}_{1...N}$ denjenigen Kurvenbereich der zweiten Hystereseschleife repräsentieren, welcher in demselben Quadranten und bei identischen ψ-Werten wie der Kurvenbereich der ersten Hystereseschleife liegt (i bezeichnet die von 1 bis N laufende Laufvariable); beim Vergleichen erfolgt eine Differenzbildung derart, dass für jedes $\psi(i)$ die jeweilige Differenz ΔI_i aus den Werten $I'(i)$ und $I''(i)$ der beiden einander zugeordneten Wertetabellen W_1 und W_2 gebildet wird, so dass die Werte $\Delta I_i = I'(i) - I''(i)$ für i = 1...N ermittelt werden, die in einer Wertetabelle $D(\psi(i), \Delta I(i))_i = {}_{1...N}$ abgelegt werden, um daraus die das Ankerhubverhalten eines Magnetaktors charakterisierende physikalische Kenngröße AKG zu ermitteln, die dann als Kennlinienfeld $AKG(i) = \Delta I(i) / \psi(i)$ für alle i=1 ...N bereitsteht. Aus dem Verlauf der vier AKG-Kennlinien 28, 28', 29, 29' in Fig. 4 ist ersichtlich, dass der Ankerhub auch bei unterschiedlichen Magnetkernmaterialien durch eine gleiche Kenngröße AKG abgebildet wird. Ferner verläuft die Kenngröße AKG bei nicht zu hohen magnetischen Flüssen ψ für unterschiedliche Magnetkernmaterialien und gleiche Luftspaltdimensionen annähernd konstant, wobei erst bei relativ hohen magnetischen Flüssen ψ ein allmähliches Absinken der Kenngröße AKG erfolgt.

[0040] Fig. 5 zeigt ein Flussdiagramm mit den wesentlichen Verfahrensschritten des erfindungsgemäßen Verfahrens 100. In einem ersten Schritt 101 wird die Hystereseschleife, d.h. die ψ-Kennlinie des Magnetaktors gemessen, indem der Strom durchgefahren und dabei zu jedem eingestellten Stromwert jeweils die in einer Messspule induzierte Spannung U_{ind} detektiert wird, um anhand des Integrals $\int U_{ind} dt$ den jeweils eingestellten Stromwerten zugeordnete ψ-Werte zu bestimmen und die dabei insgesamt ermittelten Wertepaare (I, ψ) in einem Speicherfeld abzulegen. Alternativ kann die induzierte Spannung auch aus der Erregerspule mit $U_{ind} = U_{Err} - R \bullet I$ gebildet werden, wobei U_{Err} die Erregerspannung bezeichnet. In einem daran anschließenden Schritt 102 wird aus der derart erfassten Hystereseschleife ein Kurvenabschnitt selektiert, der durch einen Übergang des Ankers geprägt ist, vorzugsweise durch eine Abfallbewegung des Ankers aus dem Luftspalt, wobei die im Intervall des selektierten Kurvenabschnitts liegenden Wertepaare (I, ψ) extrahiert werden. In einem weiteren Schritt 103 wird die magnetische Energie E_1 des Magnetaktors anhand des Verlaufs des selektierten Kurvenabschnitts berechnet. In einem daran anschließenden Schritt 104 wird in dem Intervall des selektierten Kurvenabschnitts eine Funktion erzeugt, die den Magnetaktor in einer Ankerstellung simuliert, in welcher der Anker in seiner ersten Ausgangsstellung fixiert bleibt, also vorzugsweise am Magnetkern fixiert bleibt. Dazu wird gemäß dem bevorzugten Ausführungsbeispiel ein Polynom, vorzugsweise eine kubische Spline-Funktion, in dem Intervall gebildet. In einem weiteren Schritt 105 wird anhand des Verlaufs der erzeugten Funktion die magnetische Energie E_2 des Magnetaktors berechnet. In einem unmittelbar daran anschließenden Schritt 106 wird die Differenz der beiden Energiezustände $\Delta E = E_1 - E_2$ bestimmt, die als ein Maß für den Ankerhub dient. In einem Schritt 107 wird schließlich der Ankerhub mittels der im vorherigen Schritt 106 bestimmten Energiedifferenz und der Querschnittsfläche des Luftspalts des Magnetaktors ermittelt.

[0041] Fig. 6 zeigt ein Diagramm 30 mit einem Spannungsprofil 31 und einem Stromprofil 32 zur symmetrischen Ansteuerung eines Magnetaktors mittels eines vorzugsweise als elektronische Steuereinheit ausgebildeten Signalgenerators, wobei die Signalamplitude A der an der Spule des Magnetaktors anliegenden Spannung U und des durch die Spule fließenden Stroms I als Funktion der Zeit t dargestellt ist. Die Spannung ist beispielhaft als Rechtecksignal mit einer positiven Signalhöhe $+U_{ECU}$ und einer negativen Signalhöhe $-U_{ECU}$ ausgebildet (ECU: electronic control unit), während sich für den Strom I ein rampenförmiger Verlauf einstellt. Aufgrund des annähernd exponentiellen Anstiegs bzw. Abfalls der Stromrampe während des positiven bzw. negativen Spannungssignals ergibt sich jeweils ein Konstantstrombereich 32', der zur Bestimmung des Spulenwiderstands R dient, welcher für die Berechnung von U_{ind} ohne Messspule verwendet wird. Um nun den Ankerhub eines als Einspritzventil bzw. Injektor ausgebildeten Magnetaktors zu bestimmen, ohne dabei die Einspritzzyklen zu stören, erfolgt die Ansteuerung eines derartigen Magnetaktors gemäß dem in Fig. 6 dargestellten Diagramm kurz vor dem Starten des zugeordneten Verbrennungsmotors und zwar in der Zeitspanne zwischen dem Einschalten der Zündung und dem Start des Verbrennungsmotors. Dadurch wird sichergestellt, dass während der Messung bzw. Erfassung der Hysterese des Magnetaktors und der nachfolgenden Bestimmung des Ankerhubs keine unerwünschten Effekte bzw. messtechnischen Artefakte auftreten können, indem während der Messphase keine Kraftstoffeinspritzung erfolgt und das Einspritzventil praktisch drucklos ist. Die Ankerbewegung potentiell beeinflussende Störfaktoren werden mithin eliminiert. In Diagnosegeräten ist auch eine I(t)-Vorgabe möglich; in diesem Fall ergibt sich dann U(t) aus I(t).

[0042] Fig. 7A zeigt ein Diagramm 40 mit einem Spannungsprofil 41 und einem Stromprofil 42 zur einseitigen Ansteuerung eines Magnetaktors mittels eines vorzugsweise als elektronische Steuereinheit ausgebildeten Signalgenerators, wobei auf der Ordinate die Signalamplitude A der Spannung und des Stroms aufgetragen ist, während auf der Abszisse die Zeit t dargestellt ist. Diese Ansteuerung unterscheidet sich von der in Fig. 6 dargestellten Ansteuerung darin, dass

lediglich positive Rechteckimpulse mit einer Signalhöhe $+U_{ECU}$ für die Spannung U und positive Stromrampen für den Strom I vorgesehen sind. Die Bestimmung des Spulenwiderstands R des Magnetaktors erfolgt im Konstantstrombereich 42'. Auch diese abgewandelte Ausführungsform der Ansteuerung ist für die Bestimmung des Ankerhubs bei einem als Einspritzventil bzw. Injektor ausgebildeten Magnetaktor geeignet. Die bei einseitiger Ansteuerung als Hysteresekurve erfasste ψ-Kennlinie in Abhängigkeit vom Strom I ist ausschließlich auf den ersten Quadranten beschränkt und in Fig. 7B dargestellt. Da die Bestimmung der ψ-Werte durch zeitliche Integration der induzierten Spannung U_{ind} erfolgt, bleibt bei einseitiger Ansteuerung mit positiven Spannung- und Stromsignalen die Integrationskonstante dieser Integration unbestimmt, so dass die Kurve sowohl für den vorlaufenden wie auch den rücklaufenden Zweig durch den Koordinatennullpunkt geht, in Realität jedoch um den Remanenzmagnetisierungswert verschoben die Ordinate schneidet. Der vorlaufende Zweig 16 ergibt sich durch Erhöhen des Stroms bis in den Sättigungsbereich 15, wobei vor dem Sättigungsbereich 15 der Stromschwellenwert liegt, bei dem der Ankeranzug erfolgt, während sich der rücklaufende Zweig ausgehend vom Sättigungsbereich 15 durch Reduktion des Stroms ergibt, wobei der Ankerabfall bei einem Stromschwellenwert unterhalb des Sättigungsbereichs erfolgt. Der extrapolierte bzw. konstruierte Kurvenabschnitt 22 ist für den selektierten Kurvenabschnitt berechnet.

[0043] Die zum Durchführen des erfindungsgemäßen Verfahrens bestimmte Vorrichtung umfasst eine Signalerzeugungseinrichtung zum Ansteuern des Magnetaktors und eine Detektionseinrichtung zum Bestimmen einer Hysteresekurve 10 des angesteuerten Magnetaktors sowie eine Rechen- und Auswerteeinrichtung, wobei die Rechen- und Auswerteeinrichtung ausgebildet ist zum Selektieren eines von einem Übergang des Ankers aus einer ersten stationären Endstellung in eine zweite stationäre Endstellung geprägten Kurvenabschnitts 20 in der magnetischen Hysteresekurve 10, zum Bestimmen des magnetischen Energiezustands des Magnetaktors in der zweiten stationären Endstellung des Ankers anhand des Verlaufs des selektierten Kurvenabschnitts 20, zum Erzeugen eines Kurvenabschnitts 22 im Intervall des selektierten Kurvenabschnitts 20, wobei der erzeugte Kurvenabschnitt 22 den Magnetaktor mit dem in seiner ersten Endstellung fixierten Anker simuliert, um einen dazu korrespondierenden magnetischen Energiezustand des Magnetaktors zu bestimmen, und zum Vergleichen der beiden Energiezustände des Magnetaktors basierend auf den Verläufen des selektierten Kurvenabschnitts 20 und des erzeugten Kurvenabschnitts 22, um darauf basierend den Ankerhub zu ermitteln. Die Detektionseinrichtung ist zweckmäßigerweise als Strom-/Spannungsmessgerät ausgebildet. Vorzugsweise weist die Rechen- und Auswerteeinrichtung einen Prozessor mit wenigstens einem Speicher auf, in welchem einerseits das erfindungsgemäße Verfahren als Computerprogramm abgelegt ist und andererseits Messdaten und gerechnete Daten zwischengespeichert sind. Alternativ kann die Rechen- und Auswerteeinrichtung als Rechner ausgebildet sein.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Ermitteln des Ankerhubs eines wenigstens einen Luftspalt und einen Anker aufweisenden Magnetaktors mit folgenden Verfahrensschritten:

   - Bestimmen einer magnetischen Hysteresekurve (10) des Magnetaktors,
   - Selektieren eines von einem Übergang des Ankers aus einer ersten stationären Endstellung in eine zweite stationäre Endstellung geprägten Kurvenabschnitts (20) in der magnetischen Hysteresekurve (10),
   - Bestimmen des magnetischen Energiezustands des Magnetaktors in der zweiten stationären Endstellung des Ankers anhand des Verlaufs des selektierten Kurvenabschnitts (20),
   - Erzeugen eines Kurvenabschnitts (22) über das Intervall des selektierten Kurvenabschnitts (20), wobei der erzeugte Kurvenabschnitt (22) den Magnetaktor mit dem in seiner ersten Endstellung fixierten Anker simuliert, um einen dazu korrespondierenden magnetischen Energiezustand des Magnetaktors zu bestimmen,
   - Vergleichen der beiden Energiezustände des Magnetaktors basierend auf den Verläufen des selektierten Kurvenabschnitts (20) und des erzeugten Kurvenabschnitts (22), um darauf basierend den Ankerhub zu ermitteln.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** zum Vergleichen der beiden Energiezustände deren Differenz gebildet wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Erzeugung des Kurvenabschnitts (22) mittels wenigstens eines Polynoms erfolgt, wobei die Koeffizienten und die Ordnung des Polynoms so gewählt werden, dass an durch Intervallgrenzen des selektierten Kurvenabschnitts (20) vorgegebenen Anschlussstellen (K, P2) der magnetischen Hysteresekurve (10) jeweils ein glatter Übergang erzielt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Intervall für das wenigstens eine Polynom in wenigstens zwei Teilintervalle zerlegt wird, wobei die Lage eines Knotens (P1) zwischen den Teilintervallen durch

Projektion eines Punktes des selektierten Kurvenabschnitts (20) auf eine Koordinatenachse bestimmt wird, wobei der Punkt etwa mit einem Ereignis korrespondiert, wo der Anker in seine zweite stationäre Endstellung gelangt.

5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Verlauf des mittels wenigstens eines Polynoms erzeugten Kurvenabschnitts (22) im ersten Teilintervall eine konstante Steigung aufweist, welche mittels einer das Ankerhubverhalten des Magnetaktors charakterisierenden und durch den Quotienten $\Delta I/\psi$ definierten physikalischen Kenngröße festgelegt wird, wobei ΔI eine Stromstärkendifferenz bezeichnet, die durch die Differenz definiert ist zwischen einem Strom I' durch den Magnetaktor bei aus der ersten stationären Endstellung abgefallenem Anker und einem Strom I" durch den Magnetaktor bei in der ersten stationären Endstellung fixiertem Anker, während mit ψ ein der Stromstärkendifferenz ΔI zugeordneter verketteter magnetischer Fluss bezeichnet ist.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** das wenigstens eine Polynom im durch die Intervallgrenzen des selektierten Kurvenabschnitts (20) vorgegebenen Extrapolationsintervall als kubische Spline-Funktion ausgebildet wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Energiezustand des jeweiligen Kurvenabschnitts (20, 22) bestimmt wird, indem eine Integration über den Verlauf des jeweiligen Kurvenbereichs (20, 22) innerhalb der Intervallgrenzen des ersten Teilintervalls durchgeführt wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** zum Bestimmen der magnetischen Hysteresekurve (10) des Magnetaktors der verkettete magnetische Fluss ψ in Abhängigkeit vom Strom I durch eine Spule des Magnetaktors erfasst wird.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein Kurvenabschnitt (20) selektiert wird, der durch ein Abfallen des Ankers aus seiner ersten stationären Endstellung in seine zweite stationäre Endstellunggeprägt ist.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** zum Ermitteln des Ankerhubs die gesamte Querschnittsfläche des wenigstens einen Luftspalts berücksichtigt wird, indem der Ankerhub Δh gemäß nachfolgender Gleichung berechnet wird:

$$\Delta h = \frac{2 \cdot \Delta E \cdot n^2 \cdot \mu_0}{\psi^2 \cdot \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right)},$$

wobei mit ΔE die magnetische Energiedifferenz zwischen den mit dem selektierten Kurvenabschnitt (20) und dem erzeugten Kurvenabschnitt (22) korrespondierenden Energiezuständen, mit n die Windungszahl der Spule des Magnetaktors, mit μ_0 die magnetische Permeabilität des Vakuums, mit ψ der verkettete magnetische Fluss und mit A_1 und A_2 Querschnittsflächen des Luftspalts bezeichnet sind.

11. Vorrichtung zum Durchführen des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 10, umfassend eine Signalerzeugungseinrichtung zum Ansteuern des Magnetaktors und eine Detektionseinrichtung zum Bestimmen einer Hysteresekurve (10) des angesteuerten Magnetaktors sowie eine Rechen- und Auswerteeinrichtung, wobei die Auswerteeinrichtung ausgebildet ist zum Selektieren eines von einem Übergang des Ankers aus einer ersten stationären Endstellung in eine zweite stationäre Endstellung geprägten Kurvenabschnitts (20) in der magnetischen Hysteresekurve (10), zum Bestimmen des magnetischen Energiezustands des Magnetaktors in der zweiten stationären Endstellung des Ankers anhand des Verlaufs des selektierten Kurvenabschnitts (20), zum Erzeugen eines Kurvenabschnitts (22) über das Intervall des selektierten Kurvenabschnitts (20), wobei der erzeugte Kurvenabschnitt (22) den Magnetaktor mit dem in seiner ersten Endstellung fixierten Anker simuliert, um einen dazu korrespondierenden magnetischen Energiezustand des Magnetaktors zu bestimmen, und zum Vergleichen der beiden Energiezustände des Magnetaktors basierend auf den Verläufen des selektierten Kurvenabschnitts (20) und des erzeugten Kurvenabschnitts (22), um darauf basierend den Ankerhub zu ermitteln.

Claims

1. Method for ascertaining the armature stroke of a magnetic actuator which has at least one air gap and one armature, comprising the following method steps:

   - determining a magnetic hysteresis curve (10) of the magnetic actuator,
   - selecting a curve section (20), which is **characterized by** a transition of the armature from a first stationary end position to a second stationary end position, in the magnetic hysteresis curve (10),
   - determining the magnetic energy state of the magnetic actuator in the second stationary end position of the armature on the basis of the profile of the selected curve section (20),
   - generating a curve section (22) over the interval of the selected curve section (20), wherein the generated curve section (22) simulates the magnetic actuator with the armature fixed in its first end position in order to determine a corresponding magnetic energy state of the magnetic actuator,
   - comparing the two energy states of the magnetic actuator based on the profiles of the selected curve section (20) and of the generated curve section (22) in order to ascertain the armature stroke based thereon.

2. Method according to Claim 1, **characterized in that**, for the purpose of comparing the two energy states, the difference between them is calculated.

3. Method according to Claim 1 or 2, **characterized in that** the curve section (22) is generated by means of at least one polynomial, wherein the coefficients and the order of the polynomial are selected such that a smooth transition is achieved at each of the connection sections (K, P2) of the magnetic hysteresis curve (10) which are prespecified by interval limits of the selected curve section (20).

4. Method according to Claim 3, **characterized in that** the interval for the at least one polynomial is broken down into at least two partial intervals, wherein the position of a node (P1) between the partial intervals is determined by projection of a point of the selected curve section (20) onto a coordinate axis, wherein the point corresponds approximately to an event where the armature reaches its second stationary end position.

5. Method according to Claim 4, **characterized in that** the profile of the curve section (22) which is generated by means of at least one polynomial has a constant gradient in the first partial interval, which constant gradient is defined by means of a physical characteristic variable which characterizes the armature stroke behaviour of the magnetic actuator and is defined by the quotient $\Delta I/\psi$, where ΔI denotes a current intensity difference which is defined by the difference between a current I' through the magnetic actuator when the armature has dropped out from the first stationary end position and a current I'' through the magnetic actuator when the armature is fixed in the first stationary end position, while ψ denotes an interlinked magnetic flux which is associated with the current intensity difference ΔI.

6. Method according to one of Claims 3 to 5, **characterized in that** the at least one polynomial is formed in the extrapolation interval, which is prespecified by the interval limits of the selected curve section (20), as a cubic spline function.

7. Method according to one of Claims 4 to 6, **characterized in that** the energy state of the respective curve section (20, 22) is determined by way of an integration being carried out over the profile of the respective curve region (20, 22) within the interval limits of the first partial interval.

8. Method according to one of Claims 1 to 7, **characterized in that**, for the purpose of determining the magnetic hysteresis curve (10) of the magnetic actuator, the interlinked magnetic flux ψ is detected depending on the current I through a coil of the magnetic actuator.

9. Method according to one of Claims 1 to 8, **characterized in that** a curve section (20) is selected which is **characterized by** a drop-out of the armature from its first stationary end position to its second stationary end position.

10. Method according to one of Claims 1 to 9, **characterized in that**, for the purpose of ascertaining the armature stroke, the entire cross-sectional area of the at least one air gap is taken into account by way of the armature stroke Δh being calculated in accordance with the following equation

$$\Delta h = \frac{2 \cdot \Delta E \cdot n^2 \cdot \mu_0}{\psi^2 \cdot \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2}\right)},$$

where ΔE denotes the magnetic energy difference between the energy states corresponding to the selected curve section (20) and the generated curve section (22), where n denotes the number of turns of the coil of the magnetic actuator, where μ_0 denotes the magnetic permeability of the vacuum, where ψ denotes the interlinked magnetic flux, and where A_1 and A_2 denote cross-sectional areas of the air gap.

11. Apparatus for carrying out the method according to one of Claims 1 to 10, comprising a signal-generating device for actuating the magnetic actuator and comprising a detection device for determining a hysteresis curve (10) of the actuated magnetic actuator and also comprising a calculation and evaluation device, wherein the evaluation device is designed for selecting a curve section (20), which is **characterized by** a transition of the armature from a first stationary end position to a second stationary end position, in the magnetic hysteresis curve (10), for determining the magnetic energy state of the magnetic actuator in the second stationary end position of the armature on the basis of the profile of the selected curve section (20), for generating a curve section (22) over the interval of the selected curve section (20), wherein the generated curve section (22) simulates the magnetic actuator with the armature fixed in its first end position in order to determine a corresponding magnetic energy state of the magnetic actuator, and for comparing the two energy states of the magnetic actuator based on the profiles of the selected curve section (20) and of the generated curve section (22) in order to determine the armature stroke based thereon.

Revendications

1. Procédé d'identification de la course d'induit d'un actionneur magnétique qui possède au moins un entrefer et un induit, comprenant les étapes de procédé suivantes :

- détermination d'une courbe d'hystérésis (10) magnétique de l'actionneur magnétique,
- sélection d'une portion de courbe (20) dans la courbe d'hystérésis (10) magnétique marquée par une transition de l'induit d'une première position d'extrémité fixe en une deuxième position d'extrémité fixe,
- détermination de l'état d'énergie magnétique de l'actionneur magnétique dans la deuxième position d'extrémité fixe de l'induit à l'aide du tracé de la portion de courbe (20) sélectionnée,
- génération d'une portion de courbe (22) sur l'intervalle de la portion de courbe (20) sélectionnée, la portion de courbe (22) générée simulant l'actionneur magnétique avec l'induit immobilisé dans sa première position d'extrémité en vue de déterminer un état d'énergie magnétique correspondant à cela de l'actionneur magnétique,
- comparaison des deux états d'énergie de l'actionneur magnétique en se basant sur les tracés de la portion de courbe (20) sélectionnée et de la portion de courbe (22) générée afin d'identifier la course d'induit en s'appuyant sur ceux-ci.

2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** la différence des deux états d'énergie est formée en vue de les comparer.

3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** la génération de la portion de courbe (22) est effectuée au moyen d'au moins un polynôme, les coefficients et l'ordre du polynôme étant choisis de telle sorte qu'une transition lisse est à chaque fois obtenue au niveau de points de raccordement (K, P2) de la courbe d'hystérésis (10) magnétique prédéfinis par des limites d'intervalle de la portion de courbe (20) sélectionnée.

4. Procédé selon la revendication 3, **caractérisé en ce que** l'intervalle pour l'au moins un polynôme est décomposé en au moins deux intervalles partiels, la position d'un noeud (P1) entre les intervalles partiels étant déterminée par la projection d'un point de la portion de courbe (20) sélectionnée sur un axe de coordonnée, le point correspondant approximativement à un événement où l'induit arrive dans sa deuxième position d'extrémité fixe.

5. Procédé selon la revendication 4, **caractérisé en ce que** le tracé de la portion de courbe (22) générée au moyen d'au moins un polynôme présente une pente constante dans un premier intervalle partiel, laquelle est fixée au moyen d'une grandeur caractéristique physique caractérisant le comportement de courbe d'induit de l'actionneur magnétique et définie par le quotient $\Delta I/\psi$, ΔI désignant une différence d'intensités de courant qui est définie par la différence entre un courant I' à travers l'actionneur magnétique lorsque l'induit a chuté hors de la première position d'extrémité fixe et un courant I'' à travers l'actionneur magnétique lorsque l'induit est immobilisé dans la première

position d'extrémité fixe, alors que ψ désigne un flux magnétique composé associé à la différence d'intensités de courant AI.

6. Procédé selon l'une des revendications 3 à 5, **caractérisé en ce que** l'au moins un polynôme, dans l'intervalle d'extrapolation prédéfini par les limites d'intervalle de la portion de courbe (20) sélectionnée, est réalisé sous la forme d'une fonction spline cubique.

7. Procédé selon l'une des revendications 4 à 6, **caractérisé en ce que** l'état d'énergie de la portion de courbe (20, 22) respective est déterminé en effectuant une intégration sur le tracé de la plage de courbe (20, 22) respective à l'intérieur des limites d'intervalle du premier intervalle partiel.

8. Procédé selon l'une des revendications 1 à 7, **caractérisé en ce que** la détermination de la courbe d'hystérésis (10) magnétique de l'actionneur magnétique est effectuée en détectant le flux magnétique composé ψ en fonction du courant I à travers une bobine de l'actionneur magnétique.

9. Procédé selon l'une des revendications 1 à 8, **caractérisé en ce qu'**une portion de courbe (20) est sélectionnée, laquelle est marquée par une chute de l'induit de sa première position d'extrémité fixe dans sa deuxième position d'extrémité fixe.

10. Procédé selon l'une des revendications 1 à 9, **caractérisé en ce que** l'identification de la course d'induit est effectuée en prenant en compte la surface de section transversale totale de l'au moins un entrefer par un calcul de la course d'induit Δh conformément à l'équation suivante :

$$\Delta h = \frac{2 \cdot \Delta E \cdot n^2 \cdot \mu_0}{\Psi^2 \cdot \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2}\right)},$$

ΔE désignant la différence d'énergie magnétique entre les états d'énergie correspondant à la portion de courbe (20) désignant sélectionnée et à la portion de courbe (22) générée, n désignant le nombre de spires de la bobine de l'actionneur magnétique, μ_0 désignant la perméabilité magnétique du vide, ψ désignant le flux magnétique composé, et A_1 et A_2 désignant les surfaces de section transversale de l'entrefer.

11. Arrangement pour mettre en oeuvre le procédé selon l'une des revendications 1 à 10, comprenant un dispositif de génération de signal destiné à exciter l'actionneur magnétique et un dispositif de détection destiné à déterminer une courbe d'hystérésis (10) de l'actionneur magnétique excité ainsi qu'un dispositif de calcul et d'interprétation, le dispositif d'interprétation étant configuré pour sélectionner une portion de courbe (20) dans la courbe d'hystérésis (10) magnétique marquée par une transition de l'induit d'une première position d'extrémité fixe en une deuxième position d'extrémité fixe, pour déterminer l'état d'énergie magnétique de l'actionneur magnétique dans la deuxième position d'extrémité fixe de l'induit à l'aide du tracé de la portion de courbe (20) sélectionnée, pour générer une portion de courbe (22) sur l'intervalle de la portion de courbe (20) sélectionnée, la portion de courbe (22) générée simulant l'actionneur magnétique avec l'induit immobilisé dans sa première position d'extrémité en vue de déterminer un état d'énergie magnétique correspondant à cela de l'actionneur magnétique, et pour comparer les deux états d'énergie de l'actionneur magnétique en se basant sur les tracés de la portion de courbe (20) sélectionnée et de la portion de courbe (22) générée afin d'identifier la course d'induit en s'appuyant sur ceux-ci.

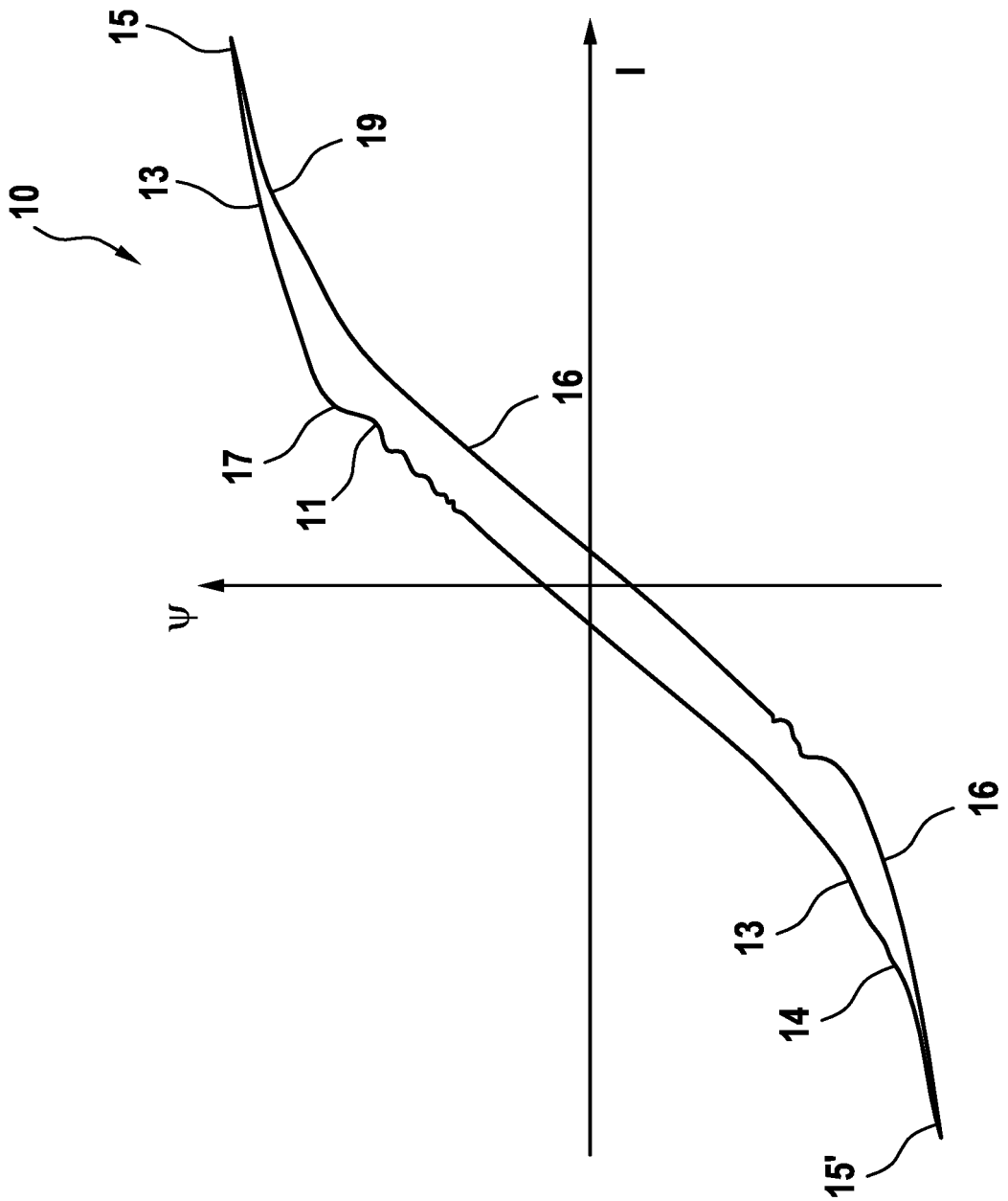


Fig. 1

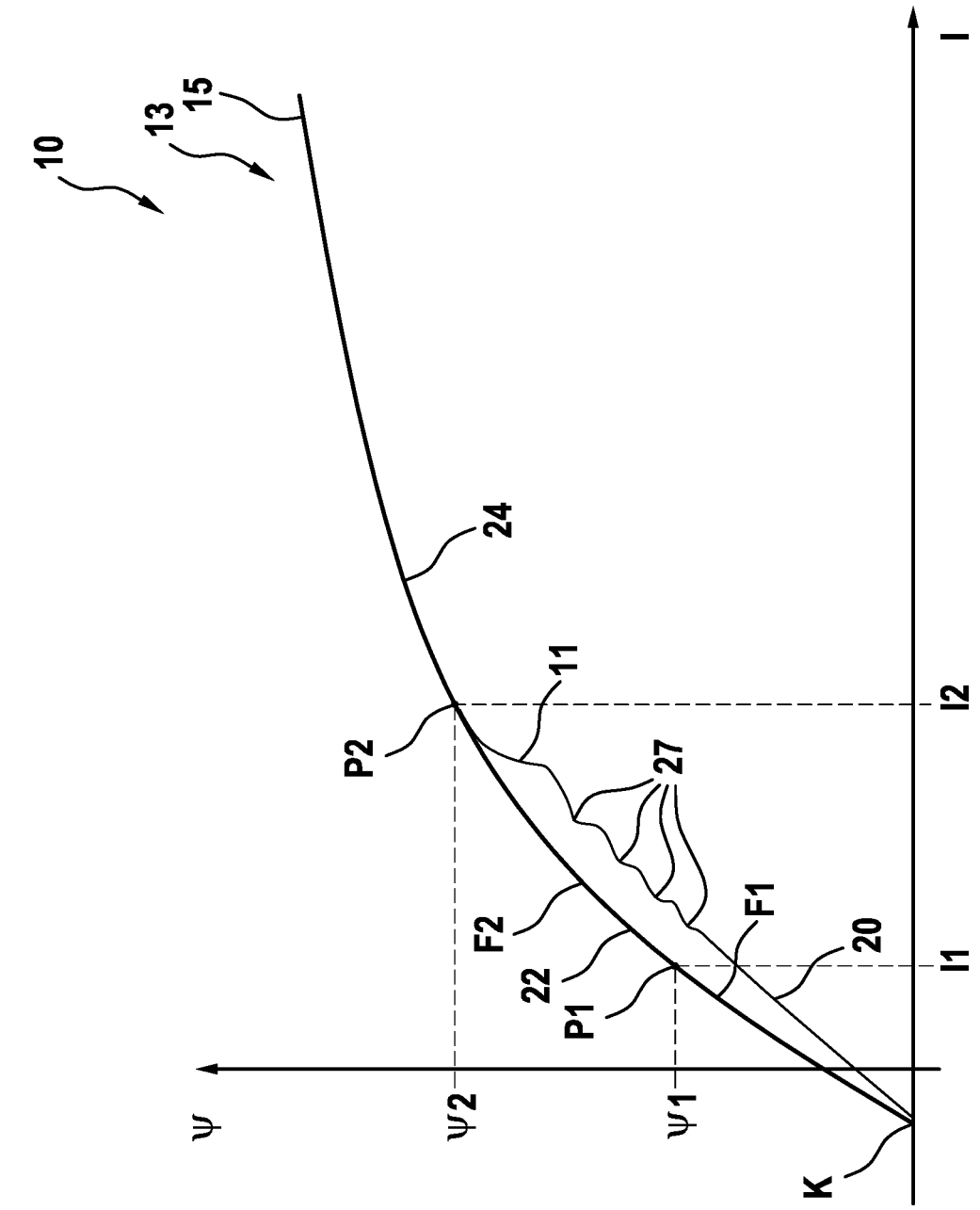


Fig. 2

Fig. 3A

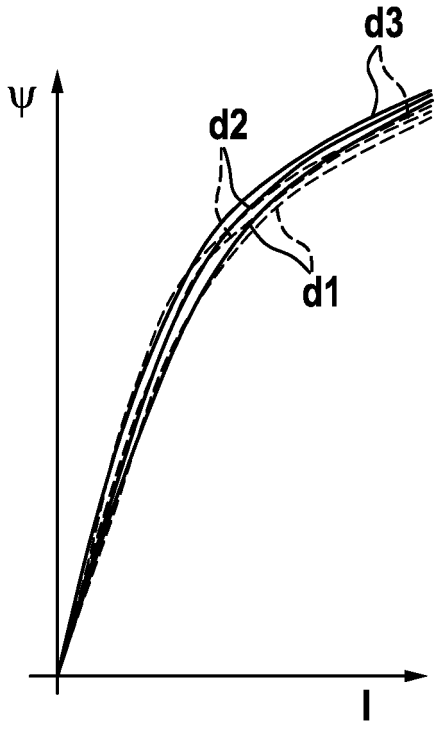
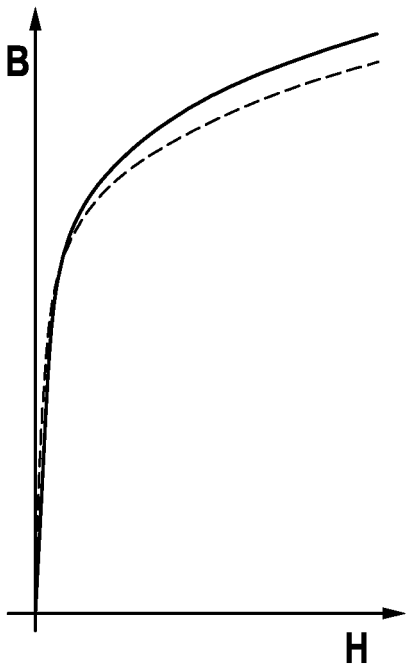


Fig. 3B



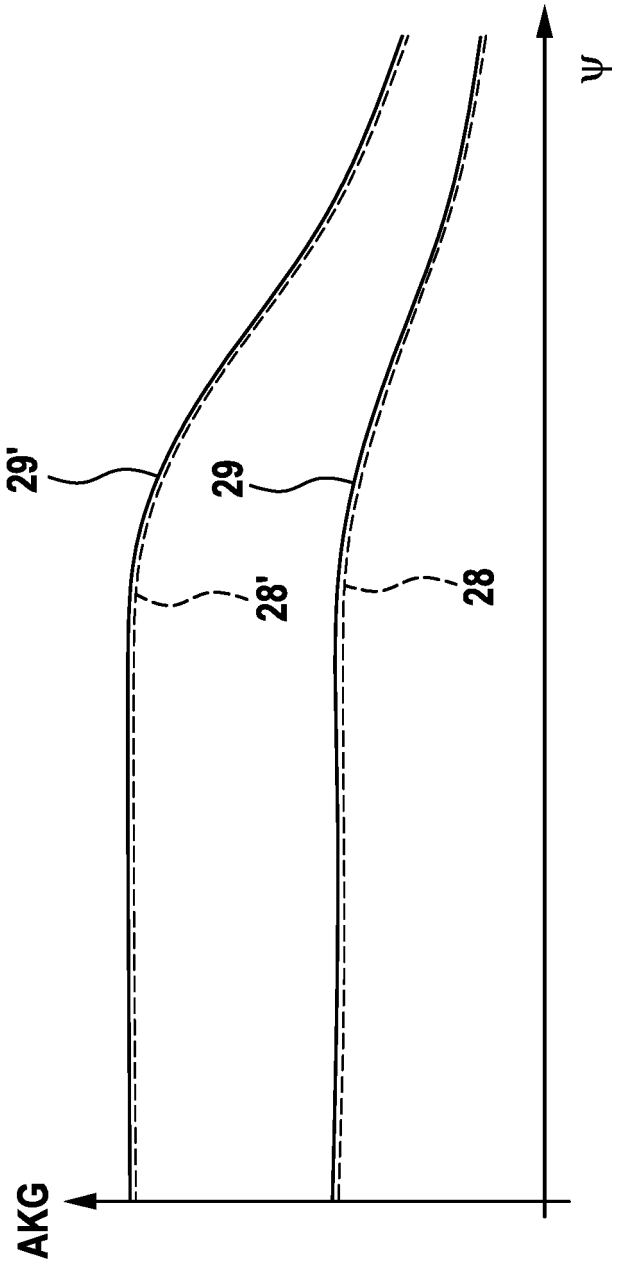


Fig. 4

Fig. 5

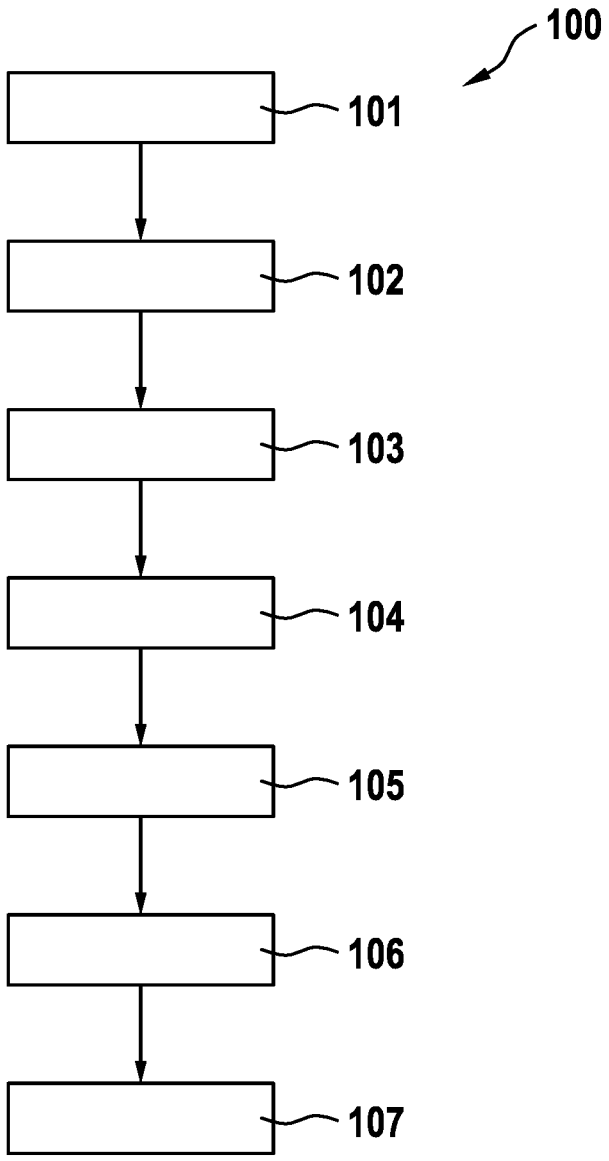
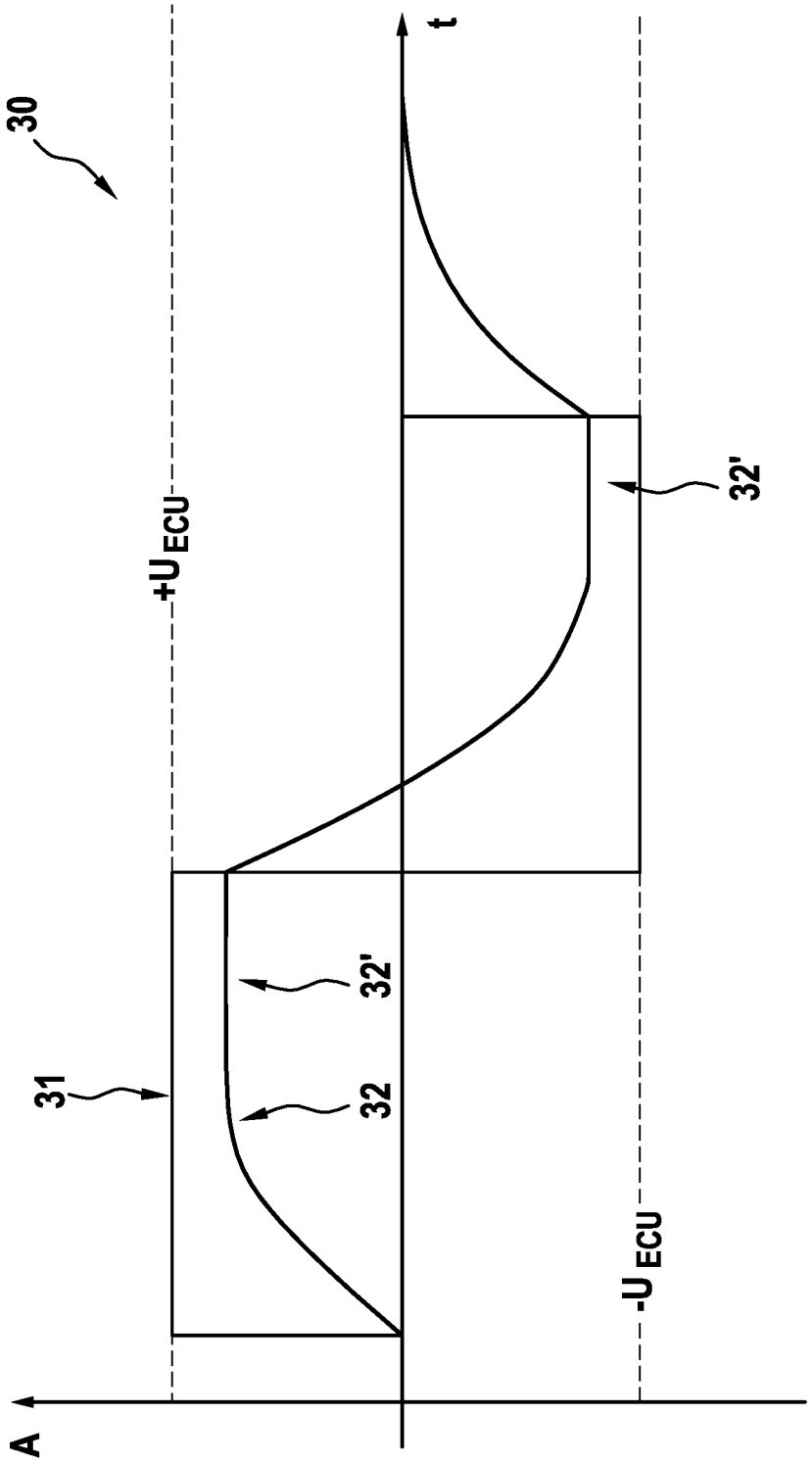


Fig. 6



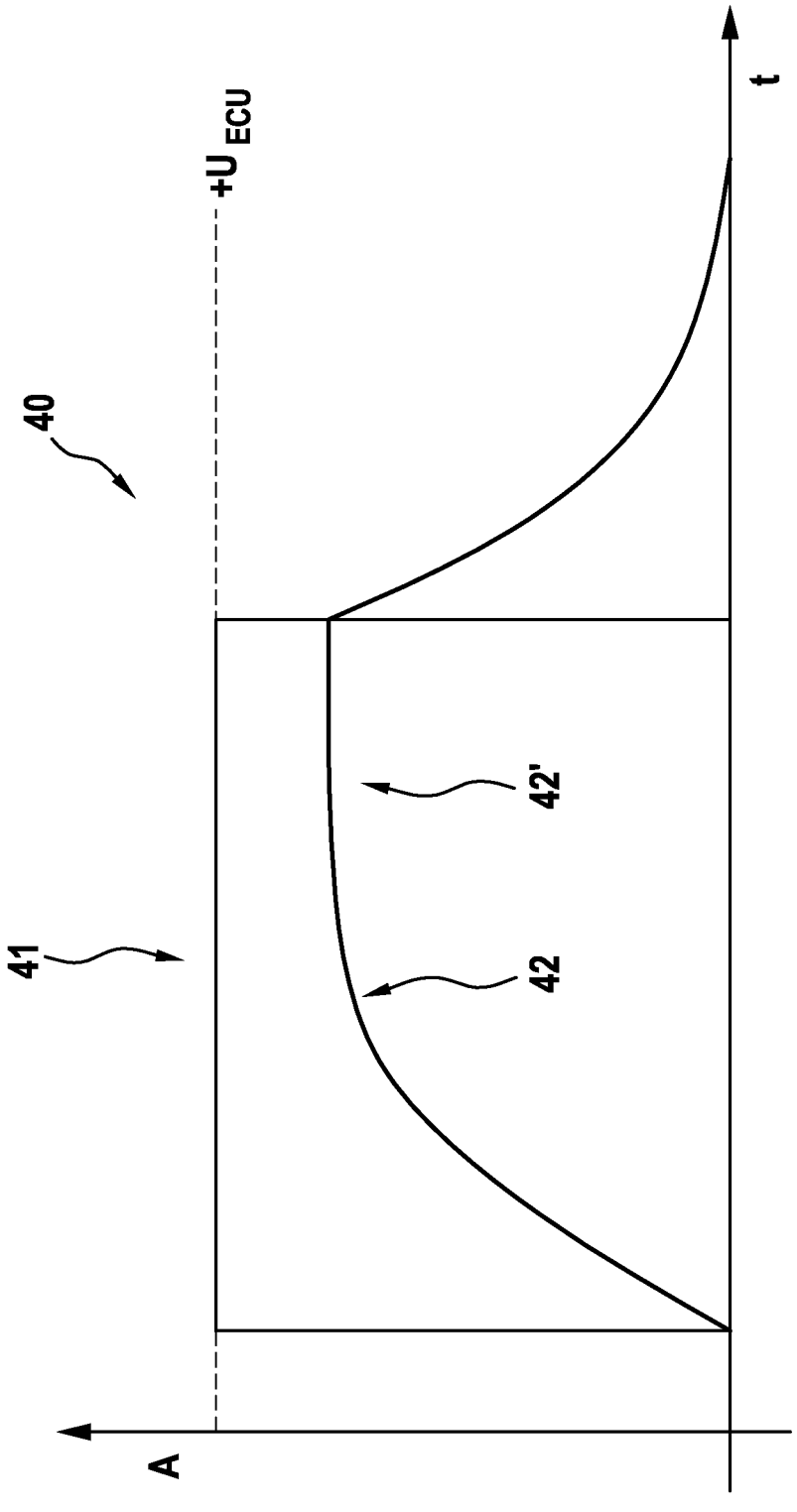


Fig. 7A

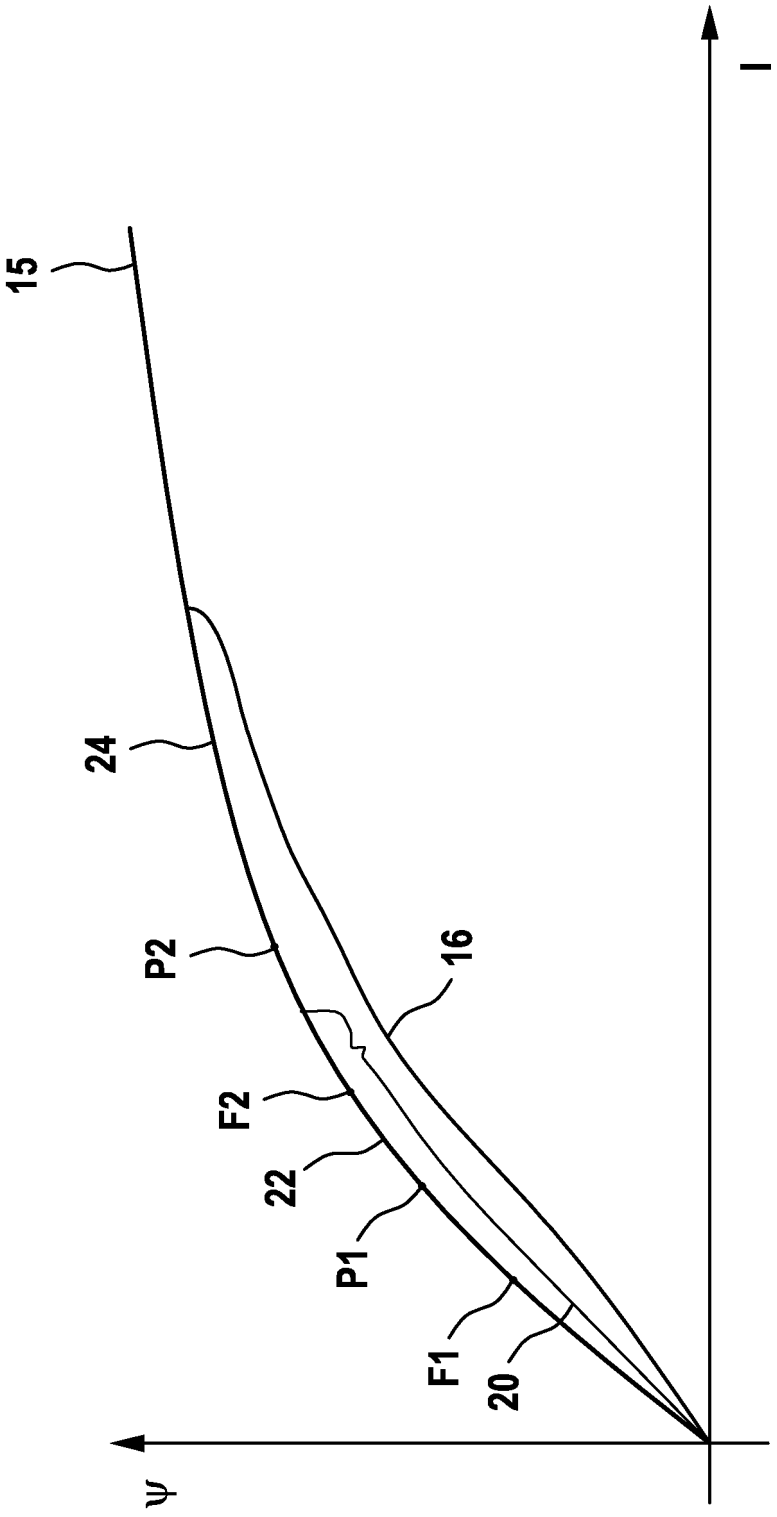


Fig. 7B

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- DE 102010063009 A1 **[0003]**
- DE 102011075935 A1 **[0003]**