

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
6. Oktober 2011 (06.10.2011)

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2011/120764 A1

- (51) Internationale Patentklassifikation:
F16C 32/04 (2006.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2011/053423
- (22) Internationales Anmeldedatum:
8. März 2011 (08.03.2011)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:
10 2010 013 682.4 1. April 2010 (01.04.2010) DE
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT [DE/DE]; Wittelsbacherplatz 2, 80333 München (DE).
- (72) Erfinder; und
- (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): GLÜCK, Tobias [DE/AT]; Höglmüllergasse 4b, A-1050 Wien (AT). TUMP, Christian [DE/DE]; Heimeranstr. 52, 80339 München (DE). BACHMAIER, Georg [DE/DE]; Kohlstraße 2, 80469 München (DE). BERGMANN, Dominik [DE/DE]; Holzkirchner Straße 21, 83679 Sachsenkam (DE). KEMMETMÜLLER, Wolfgang [AT/AT]; Wagramerstr. 4/210, A-1220 Wien (AT). KUGL, Andreas [AT/AT]; Hetzgasse 45, A-1030 Wien (AT).
- (74) Gemeinsamer Vertreter: SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT; Postfach 22 16 34, 80506 München (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- Veröffentlicht:
- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)
 - vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eingehen (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe h)

(54) Title: METHOD FOR ADAPTING AN ELECTRICAL RESISTANCE VALUE OF A MAGNETIC BEARING AND FOR DETERMINING THE POSITION OF AN OBJECT MOUNTED IN A MAGNETIC BEARING IN A SENSORLESS MANNER

(54) Bezeichnung : VERFAHREN ZUR ADAPTION EINES ELEKTRISCHEN WIDERSTANDSWERTES EINES MAGNETLAGERS UND ZUR SENSORLOSEN POSITIONSERMITTLUNG EINES IM MAGNETLAGER GELAGERTEN OBJEKTS

$$\Delta \hat{L} = \hat{L}_{2,S}^{LS} - \hat{L}_{1,S}^{LS} \quad (I)$$

(57) Abstract: The invention relates to sensorless position determination for magnetic mounting. Magnetic mounting is used to mount an object with the aid of a magnetic field which is generally produced by an electromagnet. The position of the object relative to the bearing is of interest for controlling the bearing. The object position can be determined by estimating the inductance. The inductance is estimated with the aid of a least-squares method, wherein the electrical resistance of the bearing should be taken into account. The resistance is subject to certain variations, for example on account of temperature fluctuations. However, an incorrect resistance value is reflected in the estimated inductance error (I). A method which can be used to adapt the resistance is therefore proposed. The electrical resistance can be estimated by controlling the inductance error ΔE to zero. In this case, the resistance adaption consists of a low-pass filter and an I controller.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft die sensorlose Lagebestimmung für eine Magnetlagerung. Eine magnetische Lagerung dient zur Lagerung eines Objektes mit Hilfe eines Magnetfeldes, welches im Allgemeinen durch einen Elektromagneten erzeugt ist. Zur Regelung des Lagers ist die Position des Objekts relativ zum Lager von Interesse. Anhand einer Induktivitätsschätzung lässt sich die Objektposition bestimmen. Die Induktivitätsschätzung wird mit Hilfe eines Least-Squares-Verfahrens ausgeführt, wobei der elektrische Widerstand des Lagers zu berücksichtigen ist. Der Widerstand unterliegt bspw. aufgrund von Temperaturschwankungen gewissen Variationen. Ein inkorrekt er Widerstandswert schlägt sich jedoch im geschätzten Induktivitätsfehler (I) nieder. Es wird daher ein Verfahren vorgeschlagen, mit dem der Widerstand adaptiert werden kann. Der elektrische Widerstand kann geschätzt werden, indem der Induktivitätsfehler ΔE zu Null geregelt wird. Die Widerstandsadaption besteht dabei aus einem Tiefpassfilter und einem I-Regler.

WO 2011/120764 A1

VERFAHREN ZUR ADAPTION EINES ELEKTRISCHEN WIDERSTANDSWERTES EINES MAGNETLAGERS
UND ZUR SENSORLOSEN POSITIONSERMITTLUNG EINES IM MAGNETLAGER GELAGERTEN OBJEKTS

5

Die Erfindung betrifft die sensorlose Lagebestimmung für eine
Magnetlagerung. Eine solche magnetische Lagerung dient zur
10 Lagerung eines Objektes, beispielsweise eines Rotors, mit Hil-
fe eines Magnetfeldes, welches im Allgemeinen durch mindes-
tens einen Elektromagneten erzeugt ist.

Der wesentliche Vorteil einer magnetischen Lagerung gegenüber
15 einer klassischen Lagerung, beispielsweise mit einem Kugella-
ger, besteht in der weitestgehenden Reibungslosigkeit. Dies
stellt insbesondere im Hinblick auf den Verschleiß einen Vor-
teil dar. Andererseits wird erst hierdurch eine Lagerung von
sehr schnell drehenden Rotoren ermöglicht. Eine Schwierigkeit
20 bei elektromagnetischen Lagerungen besteht darin, dass eine
elektronische Regelung der Position des zu lagernden Objektes
unabdingbar ist. Dazu ist prinzipiell die Bestimmung der Po-
sition des Objektes relativ zum Elektromagneten notwendig.
Zusätzlich kann die direkte Bestimmung der Geschwindigkeit,
25 mit der eine Lageänderung vollzogen wird, erfolgen. Klassi-
scherweise erfolgt die Bestimmung der Position direkt mit ei-
nem Positionssensor. Allerdings ist der Einsatz eines Positi-
onssensors mit gewissen Nachteilen verbunden. Hierbei sind
insbesondere zu nennen, dass ein Positionssensor zusätzliche
30 Kosten aufwirft, für den Einbau des Sensors ein gewisser Bau-
raum erforderlich ist und der Sensor, falls er ausfällt, für
einen Ausfall des gesamten Magnetlagersystems verantwortlich
sein kann.

35 Aus diesem Grund wurde in den letzten Jahren eine Vielzahl
von sogenannten sensorlosen bzw. positionssensorlosen Verfah-
ren zur Regelung eines Magnetlagers vorgeschlagen. Diese Ver-
fahren verzichten auf den Einsatz eines Positionssensors und

versuchen stattdessen, basierend auf der Messung des Stroms und der Spannung des Elektromagneten auf die Position und eventuell auf die Geschwindigkeit des zu lagernden Objektes zurückzuschließen. Dabei wird der Positionssensor entweder
5 durch eine Auswerteelektronik oder durch einen Schätz- oder Beobachtungsalgorithmus ersetzt. Dieser führt eine Schätzung der aktuellen Position durch, sowie eventuell eine Schätzung der aktuellen Geschwindigkeit, jeweils bezogen auf das zu lagernde Objekt.

10

Bei der Betrachtung herkömmlicher Magnetlager übt ein Elektromagnet eine anziehende Kraft auf einen schwebenden Körper aus. Dieser Anziehungskraft wirken Störkräfte z.B. die Gewichtskraft des schwebenden Körpers entgegen. Es entsteht in
15 einem bestimmten Abstand ein Kräftegleichgewicht. Bei festgehaltenem Strom steigt die Anziehungskraft, wenn sich der Körper dem Elektromagneten nähert. Sie verringert sich, falls sich der Körper dem Elektromagneten entfernt. Das Magnetlager ist aufgrund der physikalischen Eigenschaften instabil und
20 muss deshalb geregelt werden. Die Informationen über das Bewegungsverhalten des schwebenden Körpers bezieht beispielsweise ein Regler von einem Positionssensor. Liegt ein sensorloses Magnetlager vor, so wird auf eine externe Sensorik verzichtet. Da auch beim sensorlosen Magnetlager eine Regelung
25 notwendig ist, wird hierzu die notwendige Positionsinformation durch die luftspaltabhängigen Eigenschaften der Elektromagnete gewonnen.

Das Grundprinzip der sensorlosen Positionsbestimmung eines
30 Magnetlagers mit Hilfe der Messung von Spannung und Strom kann anhand der Figur 1 betrachtet werden. Figur 1 zeigt eine Prinzipskizze eines Magnetlagers 10. Es wird ein unidirektionales Lager mit einem Elektromagneten 200 betrachtet. Ein Pol 210 des Elektromagneten 200 bildet zusammen mit dem zu lagernden Objekt 100 einen Luftspalt 20, dessen Länge l sich
35 als Funktion der Position r des Objektes 100 verändert. Zur Berechnung des magnetischen Widerstandes R_m des Luftspaltes 20 dient die Formel

$$R_m = \frac{1}{\mu_0 A} \quad (1)$$

mit der Länge $l=l_0-r$, der nominellen Länge l_0 sowie der effektiven Fläche A des Luftspaltes und der Permeabilität μ_0 der Luft.

5

Vernachlässigt man in weiterer Folge die magnetischen Widerstände des Eisenkerns des Elektromagneten 200 sowie des Objektes 100, so errechnet sich die Induktivität L des Magnetlagers 10 in der Form der Gleichung

$$L(r) = \frac{M^2}{R_m} = \frac{M^2 \mu_0 A}{l_0 - r} \quad (2)$$

mit der Anzahl M der Wicklungen des Elektromagneten 200. Es wird deutlich, dass die Induktivität des Systems indirekt proportional zum Abstand des Objektes 100 von den Polen des Elektromagneten 200 abhängt. Diese wesentliche Eigenschaft stellt die Grundlage für viele Schätz- und Beobachtungsalgorithmen zur Bestimmung der Position des Objektes 100 dar. In diesem Zusammenhang sind die Druckschriften [2, 3, 4] aus dem Stand der Technik zu nennen.

Zum sensorlosen Betrieb eines magnetischen Schwebesystems existiert eine Vielzahl von Hilfsmitteln, deren wesentliche Ansätze sowie Vor- oder Nachteile bspw. in DE 10 2008 064 380 A1 aufgezählt und analysiert werden. Dort werden beobachterbasierte Verfahren, Parameterschätzverfahren sowie verschiedene Gruppen von Verfahren zur Induktivitätsbestimmung diskutiert. Bei letzteren Verfahren wird ausgenutzt, dass die Induktivität des Magnetlagers von der Position des Objektes abhängt. Eine Messung der Induktivität lässt also eine Bestimmung der Objektposition zu.

30

Die DE 10 2008 064 380 A1 selbst, auf der die vorliegende Anmeldung aufbaut, schlägt schließlich ein Verfahren zur sensorlosen Zustandsschätzung von Magnetschwebesysteme vor, bei dem durch Auswertung des Stroms und der Spannung die Position zu bestimmen ist. In dem dort beschriebenen Verfahren kann

35

jedoch eine Ungenauigkeit auftreten, da der elektrische Widerstand des Magnetlagers, der in die Bestimmung der Induktivität eingehen muss, nicht ausreichend berücksichtigt wird.

5 Der Erfindung liegt somit die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Adaption eines Widerstandswertes eines Elektromagneten eines Magnetlagers bereit zu stellen. Darüber hinaus ist es eine Aufgabe der Erfindung, ein verbessertes Verfahren zur sensorlosen Positionsermittlung eines in einem magnetischen
10 Lager gelagerten Objekts unter Berücksichtigung des adaptierten Widerstandswertes anzugeben.

Diese Aufgaben werden durch die in den unabhängigen Ansprüchen angegebenen Erfindungen gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.
15

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Adaption eines Wertes eines elektrischen Widerstandes eines Magnetlagers weist die folgenden Schritte auf:

- 20 - Ansteuerung mindestens eines Elektromagneten des Magnetlagers mittels einer pulsweitenmodulierten (PWM) Spannung, wobei der zeitliche Verlauf der pulsweitenmodulierten Spannung zumindest eine erste Phase ($j=1$), insbesondere eine Aufladephase, und zumindest eine zweite Phase ($j=2$), insbesondere eine Entladephase, aufweist,
- 25 - Messung und Auswertung von Strom i und Spannung u des Elektromagneten zur Ermittlung eines ersten und eines zweiten Induktivitätswertes \hat{L}_1^{LS} , \hat{L}_2^{LS} in der ersten Phase ($j=1$) und in der zweiten Phase ($j=2$),
- 30 - Schätzung, insbesondere Least-Squares-Schätzung, des ersten Induktivitätswertes \hat{L}_1^{LS} für die erste Phase ($j=1$) und des zweiten Induktivitätswertes \hat{L}_2^{LS} für die zweite Phase ($j=2$), wobei bei der Schätzung der Induktivitätswerte \hat{L}_1^{LS} , \hat{L}_2^{LS} der elektrische Widerstand R_n des magnetischen Lagers, insbesondere des Elektromagneten des magnetischen Lagers, berücksichtigt wird,
- 35 - Bestimmung des Induktivitätsfehlers $\Delta\hat{L} = \hat{L}_2^{LS} - \hat{L}_1^{LS}$ und

- Adaption des elektrischen Widerstands dadurch, dass der Induktivitätsfehler $\Delta\hat{L}$ zu Null geregelt wird.

Die Widerstandsadaption besteht dabei aus einem Tiefpassfilter und einem I-Regler.

Der Induktivitätsfehler $\Delta\hat{L}$ wird mit Hilfe eines I-Reglers $\frac{d}{dt} \hat{R} = -\frac{1}{T_{RA}} \Delta\bar{L}$ zu Null geregelt und ggf. vorher mit Hilfe einer Tiefpassfilterung $\frac{d}{dt} \Delta\bar{L} = -\frac{1}{T_{LF}} (\Delta\bar{L} - \Delta\hat{L})$ gefiltert.

10

Das erfindungsgemäße Verfahren zur sensorlosen Positionsermittlung eines in einem magnetischen Lager gelagerten Objekts relativ zu dem magnetischen Lager, insbesondere relativ zu einem Elektromagneten des magnetischen Lagers, weist die folgenden Schritte auf:

15

- Ansteuerung mindestens eines Elektromagneten des Magnetlagers mittels einer pulsweitenmodulierten (PWM) Spannung, wobei der zeitliche Verlauf der pulsweitenmodulierten Spannung zumindest eine erste Phase ($j=1$), insbesondere eine Aufladephase, und zumindest eine zweite Phase ($j=2$), insbesondere eine Entladephase, aufweist,
- Messung und Auswertung von Strom i und Spannung u des Elektromagneten zur Ermittlung eines ersten und eines zweiten Induktivitätswertes \hat{L}_1^{LS} , \hat{L}_2^{LS} in der ersten Phase ($j=1$) und in der zweiten Phase ($j=2$),
- Schätzung, insbesondere Least-Squares-Schätzung, des ersten Induktivitätswertes \hat{L}_1^{LS} für die erste Phase ($j=1$) und des zweiten Induktivitätswertes \hat{L}_2^{LS} für die zweite Phase ($j=2$), wobei bei der Schätzung der Induktivitätswerte \hat{L}_1^{LS} , \hat{L}_2^{LS} der elektrische Widerstand R_n des magnetischen Lagers, insbesondere des Elektromagneten des magnetischen Lagers, berücksichtigt wird,
- Berechnung der Position des Objekts relativ zum magnetischen Lager anhand der geschätzten Induktivitätswerte \hat{L}_1^{LS} , \hat{L}_2^{LS} .

35

Dabei wird der elektrische Widerstand R_n mit dem oben beschriebenen, erfindungsgemäßen Verfahren zur Widerstandsadaptation ermittelt.

5 Zur Berechnung der Position des Objekts wird eine aus den geschätzten Induktivitätswerten \hat{L}_1^{LS} , \hat{L}_2^{LS} gemittelte Induktivität \bar{L} verwendet.

10 Ggf. wird eine Geschwindigkeit des Objekts ebenfalls aus den geschätzten Induktivitätswerten \hat{L}_1^{LS} , \hat{L}_2^{LS} berechnet.

In der ersten Phase ($j=1$) wird an N_1 Messpunkten und in der zweiten Phase ($j=2$) wird an N_2 Messpunkten der Strom $i_{k_j,j}$ (mit $k_j = 0, \dots, N_j - 1$) gemessen.

15

Für die erste Phase ($j=1$) und für die zweite Phase ($j=2$) wird jeweils aus den an den N_j Messpunkten gemessenen Stromwerten $i_{k_j,j}$ (mit $k_j = 0, \dots, N_j - 1$) ein Strommittelwert \bar{i}_j gebildet.

20

Für die erste Phase ($j=1$) und für die zweite Phase ($j=2$) wird, insbesondere mittels eines Least-Squares-Verfahrens, jeweils eine Stromanfangsbedingung $\hat{i}_{0,j}$ und eine Stromendbedingungen $\hat{i}_{N_j-1,j}$ ermittelt. Aus diesen Bedingungen werden Stromhübe $\Delta i_j = \hat{i}_{N_j-1,j} - \hat{i}_{0,j}$ der ersten Phase ($j=1$) und der
 25 zweiten Phase ($j=2$) bestimmt, wobei die Stromhübe Δi_j in die Schätzung der Induktivitätswerte \hat{L}_1^{LS} , \hat{L}_2^{LS} eingehen.

30

Zur Berechnung des Mittelwertes \bar{L} der Induktivität, aus dem schließlich die Position und/oder die Geschwindigkeit des Objekts berechnet wird, werden verwendet

- die aus den Stromanfangs- und Stromendbedingungen ermittelten Stromhübe $\Delta i_j = \hat{i}_{N_j-1,j} - \hat{i}_{0,j}$,

- die Anzahl der Messpunkte N_1 , N_2 ,

- die Strommittelwerte \bar{i}_j der ersten ($j=1$) und der zweiten

35

Phase ($j=2$) und

- die Differenz der geschätzten Induktivitätswerte \hat{L}_1^{LS} , \hat{L}_2^{LS} der ersten ($j=1$) und der zweiten Phase ($j=2$).

Die in dieser Erfindung betrachtete Positionsschätzung beruht auf der Identifikation des aktuellen Induktivitätswertes $L(r)$ mit dessen Hilfe auf die aktuelle Position r des zu lagernden Objektes rückgerechnet werden kann. Im Gegensatz zu in der
5 Literatur bekannten Verfahren zur Schätzung der Induktivität wird in dieser Erfindung kein zusätzliches Messsignal, wie beispielsweise ein sinusförmiges, in die Ansteuerung der Spule eingespeist, sondern es wird direkt die Ansteuerung mit
10 einer pulsweitenmodulierten Spannung durchgeführt.

Der Vorteil besteht darin, dass keine zusätzliche Hardware zur Erzeugung und zur Erfassung des zusätzlichen Messsignals notwendig ist. Die in der Literatur bekannten Verfahren
15 [2,3], welche auf einer Auswertung der pulsweitenmodulierten Spannung beruhen, weisen den Nachteil auf, dass eine Änderung der Pulsweite zu einer wesentlichen Verfälschung des identifizierten Induktivitätswertes und damit der identifizierten Position führen. In der vorliegenden Erfindung wird diese
20 Problematik durch eine entsprechende Auswertung der Messsignale umgangen.

Die meisten Schätzverfahren zur Bestimmung der Induktivität verwenden eine aufwändige analoge Vorverarbeitungselektronik
25 [1]. Anhand der Erfindung erfolgt vorteilhaft die gesamte Verarbeitung der Messsignale digital. Um die in der Verarbeitung benötigten geringen Abtastzeiten bzw. hohen Abtastraten zu ermöglichen, ist, wie in der Beschreibung der Erfindung
30 gezeigt wird, die Entwicklung entsprechender Algorithmen unumgänglich.

Der in dieser Erfindung entwickelte Schätzalgorithmus besteht im Wesentlichen aus einem Least-Squares Schätzer zur Bestimmung der Induktivität in den einzelnen PWM-Phasen, d.h. in
35 der Auflade- und der Entladephase. Wie im Folgenden gezeigt wird, kann dieser Least-Squares Schätzer wiederum in zwei Teilaufgaben unterteilt werden, was zu einer äußerst effizienten Implementierung führt.

Weiterhin kann eine modellbasierte Berechnung der Position und/oder Geschwindigkeit des zu lagernden Objektes angewandt werden.

5

Im Folgenden werden anhand der begleitenden schematischen Figuren Ausgestaltungen der Erfindung beschrieben.

Figur 1 zeigt eine Prinzipskizze eines Magnetlagers,

10

Figur 2 zeigt ein elektrisches Ersatzschaltbild eines magnetischen Schwebesystems und ein zugehöriges Diagramm mit Auf- und Entladevorgang der Spule,

15

Figur 3 zeigt den Auf- und Entladevorgang des Spulenstroms i bei pulsweitenmodulierter Spannungseinspeisung PWM.

Um die Magnetkraft auf das in der Figur 1 dargestellte Objekt 100 zu berechnen, definiert man die magnetische Ko-Energie

$$W_m = \frac{1}{2} L(r) i^2 \quad (3)$$

mit dem Strom i durch den ebenfalls in der Figur 1 dargestellten Elektromagneten. Man erhält damit direkt den folgenden Ausdruck für die Magnetkraft f_m

$$25 \quad f_m = - \frac{\partial W_m}{\partial r}. \quad (4)$$

Um die in dieser Erfindung gelöste Aufgabenstellung nochmals kurz darzustellen, ist in Figur 2 das elektrische Ersatzschaltbild eines einfachen Magnetlagers dargestellt.

30

Darin bezeichnet R den effektiven elektrischen Widerstand der Spule und der Zuleitungen und u_{PWM} ist die angelegte pulsweitenmodulierte Spannung.

Schreibt man das Induktionsgesetz für dieses System an, so erhält man

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L(r)} \left(-R \cdot i - \frac{\partial L(r)}{\partial r} w + u_{\text{PWM}} \right), i(0) = i_0, \quad (5)$$

wobei $w = \dot{r}$ die Geschwindigkeit des zu lagernden Objektes ist.

Das Anlegen einer pulsweitenmodulierten Spannung bewirkt, dass der Strom i in einer ersten Phase der PWM, der sogenannten Aufladephase, in einem Zeitraum $0 \leq t \leq \chi T_{\text{PWM}}$ ansteigt und in einer daran anschließenden zweiten Phase der PWM, der sogenannten Entladephase, in einem Zeitraum $\chi T_{\text{PWM}} \leq t \leq T_{\text{PWM}}$ abfällt. Dabei werden mit T_{PWM} die die beiden Phasen umfassende Periodendauer der pulsweitenmodulierten Spannung und mit $0 \leq \chi \leq 1$ das Tastverhältnis bezeichnet. χ gibt demzufolge das Verhältnis der Zeitdauern der ersten und der zweiten Phase an. Damit ergibt sich in etwa ein Stromverlauf wie er in der rechten Seite von Figur 2 dargestellt ist.

Betrachtet man nochmals das Induktionsgesetz (5), so erkennt man, dass die Amplitude bzw. die Steigungen des Stromverlaufs einerseits durch die Induktivität $L(r)$, dies ist der primäre Messeffekt, andererseits jedoch auch durch den elektrischen Widerstand R , die Geschwindigkeit w des Objekts 100 sowie die Amplitude und das Tastverhältnis der Versorgungsspannung u beeinflusst wird.

Die Aufgabe der Positionsschätzung ist es nun, im ersten Schritt aus den Messungen des Stroms und der Spannung einen Wert der Induktivität zu schätzen und daraus die Position r zu bestimmen. Die besondere Schwierigkeit besteht darin, dies möglichst unabhängig von den anderen Einflussfaktoren zu realisieren.

Least-Squares-Schätzer / Schätzer nach dem Prinzip der Summe der kleinsten Fehlerquadrate

Die Induktivitätsschätzung beruht auf dem Induktionsgesetz der Elektrodynamik, welches mit Hilfe einer äquidistanten Zeitdiskretisierung wie in Figur 3 veranschaulicht so aufbereitet wird, dass ein lineares Least-Squares-Verfahren zur
5 rekursiven Bestimmung der Induktivität angewandt werden kann.

Die Figur 3 zeigt den zeitlichen Verlauf des Stromes i in der ersten und in der zweiten Phase. Die Strommessung wird in der Aufladephase bzw. in der ersten Phase ($j=1$) an N_1 diskreten
10 Messpunkten k_1 vorgenommen, d.h. es ergeben sich N_1 Messwerte $i_{k_1,1}$ (mit $k_1 = 0, \dots, N_1 - 1$) für den Strom. Dementsprechend werden in der Entladephase bzw. in der zweiten Phase ($j=2$) an N_2 diskreten Messpunkten N_2 Strommessungen vorgenommen und es ergeben sich N_2 Messwerte $i_{k_2,2}$ (mit $k_2 = 0, \dots, N_2 - 1$) für den
15 Strom. Entsprechendes gilt für die Spannungsmessung.

Zur Induktivitätsschätzung wird jeweils eine Least-Squares-Schätzung für die Auf- und die Entladephase vorgenommen und es werden somit zwei Einzelinduktivitäten \hat{L}_j^{LS} und zwei Strom-
20 anfangsbedingungen $\hat{i}_{0,j}$ pro PWM-Periode gewonnen. Dabei gilt sowohl hier als auch im Folgenden jeweils $j \in \{1,2\}$, wobei $j=1$ die erste Phase (Aufladephase) und $j=2$ die zweite Phase (Entladephase) bezeichnet.

25 Außerdem wird mit einer weiteren Least-Squares-Schätzung ebenso die Stromendbedingung $\hat{i}_{N_j-1,j}$ der Teilstromverläufe bestimmt, welche in der späteren modellbasierten Ermittlung der Position und Geschwindigkeit verwendet werden.

30 Die Begriffe "Stromanfangsbedingung" bzw. "Stromendbedingung" bezeichnen also den Stromwert zu Anfang bzw. am Ende einer jeweiligen Phase ($j=1$ oder $j=2$), d.h. für $k_j=0$ bzw. $k_j=N_j-1$.

Das Least-Squares-Verfahren kann in Form eines Multiratenverfahrens aufgebaut werden, so dass mit einer kleinen Abtastzeit T_s die zu bestimmenden Einträge der so genannten Regressoren berechnet werden und anschließend die eigentliche Reg-

35

ression, d.h. die Bestimmung der Teilinduktivitäten und der Anfangs- und Endbedingungen des Stroms, mit einer wesentlich größeren Abtastzeit T_r , welche im Allgemeinen ein ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer der PWM ist, vorgenommen werden kann.

Schätzung der Induktivität und Stromanfangsbedingung

Schreibt man das Induktionsgesetz

$$10 \quad \dot{\psi}(t) = u(t) - Ri(t), \quad \psi(0) = \psi_0 \tag{6}$$

für einen konstanten elektrischen Widerstand R an und integriert über die Zeit $\Delta t = t - t_0$, so erhält man

$$\int_{t_0}^t \dot{\psi}(\tau) d\tau = \psi(t) - \psi(t_0) = \int_{t_0}^t u(\tau) - Ri(\tau) d\tau. \tag{7}$$

Berücksichtigt man weiter die Abhängigkeit der Induktivität $L(r)$ von der Position r des Objekts im Zusammenhang zwischen der Flussverkettung $\psi(t)$ und dem Strom $i(t)$,

$$\psi(t) = L(r(t)) \cdot i(t), \tag{8}$$

dann lässt sich Gleichung (7) in der Form

$$L(r(t)) \cdot i(t) - L(r(t_0)) \cdot i(t_0) = \int_{t_0}^t u(\tau) - R \cdot i(\tau) d\tau, \tag{9}$$

schreiben und nach dem Strom $i(t)$ aufgelöst erhält man

$$i(t) = \frac{L(r(t_0))}{L(r(t))} i(t_0) + \frac{1}{L(r(t))} \int_{t_0}^t u(\tau) - R \cdot i(\tau) d\tau. \tag{10}$$

Nimmt man vorerst an, dass die Änderungen der Induktivität $L(r)$ über eine PWM-Periode vernachlässigbar sind, d.h.

$L(r(t)) = L(r(t_0))$, und diskretisiert das Integral $\dot{\psi}(t)$ bspw. als

Untersumme mit der äquidistanten Integrationsschrittweite T_s (andere Diskretisierungsverfahren sind natürlich ebenso möglich), so erhält man für die erste und zweite Phase ($j=1,2$) für N_j Messungen von Spannung $u_{k_j,j}$ und Strom $i_{k_j,j}$ das diskretisierte Integral (vgl. Figur 3):

$$30 \quad \begin{aligned} \tilde{\psi}_{0j} &= 0 && \text{für } k_j = 0 \text{ und } j \in \{1,2\} \\ \tilde{\psi}_{k_j} &= \sum_{m_j=1}^{k_j} (u_{m_j-1} - R \cdot i_{m_j-1}) T_s && \text{für } k_j = 1, \dots, N_j - 1 \text{ und } j \in \{1,2\} \end{aligned}$$

Unter der Annahme, dass die Induktivität für die Zeit einer steigenden Flanke (erste Phase) und einer fallenden Flanke (zweite Phase) einer PWM-Periodendauer konstant bleibt, ergibt sich der Zusammenhang

$$5 \quad i_{k_j} = L_j^{-1}(\psi_{0_j} + \tilde{\psi}_{k_j}) = i_{0_j} + L_j^{-1}\tilde{\psi}_{k_j} \quad \text{für } k_j = 0, \dots, N_j - 1 \text{ und } j \in \{1,2\} \quad (11)$$

nach Gleichung (10) zwischen dem Spulenstrom und der Flussverkettung mit der Stromanfangsbedingung $i_{0_j} = L_{0_j}^{-1}\psi_{0_j}$.

10 Wird die Untersumme zusätzlich auf die Schrittweite T_s normiert, so dass $\tilde{\psi}_j = \tilde{\psi}_j / T_s$ gilt, ergibt sich die normierte Induktivität $\tilde{L}_j^{-1} = L_j^{-1}T_s$ als formaler Parameter und Gleichung (10)

lässt sich in Vektorschreibweise wie folgt darstellen:

$$i_{k_j} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ \tilde{\psi}_{k_j} \end{bmatrix}}_{S_{k_j}} \underbrace{\begin{bmatrix} i_{0_j} \\ \tilde{L}_j^{-1} \end{bmatrix}}_{\theta_j} \quad \text{für } k_j = 1, \dots, N_j - 1 \text{ und } j \in \{1,2\} \quad (12)$$

Für N_j Messungen erhält man demnach

$$15 \quad \underbrace{\begin{bmatrix} i_{0_j} \\ i_{1_j} \\ \vdots \\ i_{N_j-1} \end{bmatrix}}_{y_j} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & \tilde{\psi}_{0_j} \\ 1 & \tilde{\psi}_{1_j} \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \tilde{\psi}_{N_j-1} \end{bmatrix}}_{S_j} \underbrace{\begin{bmatrix} i_{0_j} \\ \tilde{L}_j^{-1} \end{bmatrix}}_{\theta_j}, \quad j \in \{1,2\} \quad (13)$$

mit dem $(N_j \times 1)$ -dimensionalen Messvektor y_j und der $(N_j \times 2)$ -dimensionalen Regressionsmatrix S_j . Die bestmögliche Approximation $\hat{\theta}_j = [\hat{i}_{0_j} \quad \hat{L}_j^{LS}]$ ist im Sinne der kleinsten Fehlerquadrate gegeben durch

$$20 \quad \hat{\theta}_j = (S_j^T S_j)^{-1} S_j^T y_j = \Xi_j^{-1} \xi_j, \quad j \in \{1,2\}. \quad (14)$$

Dabei ergibt sich die symmetrische (2×2) -Matrix

$$S_j^T S_j = \begin{bmatrix} N_j & \sum_{k_j=0}^{N_j-1} \tilde{\psi}_{k_j} \\ \sum_{k_j=0}^{N_j-1} \tilde{\psi}_{k_j} & \sum_{k_j=0}^{N_j-1} \tilde{\psi}_{k_j}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Xi_{11_j} & \Xi_{12_j} \\ \Xi_{21_j} & \Xi_{22_j} \end{bmatrix} \quad (14A)$$

und der (2×1) -Vektor

$$\mathbf{S}_j^T \mathbf{y}_j = \begin{bmatrix} \sum_{k_j=0}^{N_j-1} \dot{i}_{k_j} \\ \sum_{k_j=0}^{N_j-1} \dot{i}_{k_j} \tilde{\psi}_{k_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_{1j} \\ \xi_{2j} \end{bmatrix}. \quad (14B)$$

An dieser Stelle kann man nun die Aufteilung des Algorithmus der Least-Squares Identifikation für die Stromanfangsbedingung und die (inverse) Induktivität in zwei unterschiedlichen Abtastraten darstellen. Die N_j Messwerte des Stroms i_{k_j} werden mit der schnellen Abtastzeit T_s aufgenommen. In jedem dieser schnellen Abtastschritte müssen die Einträge der symmetrischen Matrix $\mathbf{S}_j^T \mathbf{S}_j$ und der Matrix $\mathbf{S}_j^T \mathbf{y}_j$ auf den aktuellen Stand gebracht werden. Wie ersichtlich, erfordert dies aber nur die einfachen Rechenoperationen Summation und Multiplikation. Insbesondere muss für den Eintrag Ξ_{1j} , nur die Anzahl der Messwerte angegeben werden. Weiterhin erfordert die Berechnung von Ξ_{2j} eine zusätzliche Multiplikation und Addition. Schließlich benötigt man zur Berechnung des Eintrags ξ_{1j} eine Addition und für ξ_{2j} eine Multiplikation und eine Addition.

Wie man erkennen kann, sind also nur sehr wenige, relativ einfache Operationen innerhalb eines Abtastschrittes T_s notwendig. Die Messwerte des Stroms und der Spannung werden mit Hilfe eines ADCs (Analog-Digital-Wandler bzw. "Analog-Digital-Converter") ermittelt und liefern entsprechend ihrer Auflösung einen Integer-Wert. Daher können die obigen Operationen bspw. in einem Fixkomma-Prozessor ohne maßgeblichen Verlust an Genauigkeit ermittelt werden.

Zur Berechnung der Induktivität und der Stromanfangsbedingung muss im letzten Schritt die Inverse der Matrix $\mathbf{S}_j^T \mathbf{S}_j$ berechnet und mit $\mathbf{S}_j^T \mathbf{y}_j$ multipliziert werden. Diese Operationen sind numerisch wesentlich sensibler und sollten daher bspw. auf einem Gleitkomma-Prozessor ausgeführt werden. Da diese Operationen jedoch nur einmal in einer PWM-Periode durchgeführt werden müssen (es gilt $T_{PWM} \gg T_s$), kann auch für diese Berech-

nung ein sehr einfacher und daher günstiger Prozessor zur Anwendung kommen.

5 Zusammenfassend können also die obigen Berechnungen auf eine schnelle Berechnung auf einem Fixkomma-Prozessor und auf eine langsame Berechnung auf einem Gleitkomma-Prozessor aufgeteilt werden.

Schätzung der Stromendbedingung

10

Zur modellbasierten Berechnung der Position und/oder Geschwindigkeit werden die Stromhöhe $\Delta i_j = i_{N_j-1} - i_{0_j}$ mit $j \in \{1,2\}$

benötigt. Mit der vorangegangenen Bestimmung der Stromfangsbedingung i_{0_j} für kann in einer zusätzlichen Least-

15

Squares-Schätzung die Stromendbedingungen i_{N_j-1} geschätzt werden. Dazu wird der Stromverlauf $i(t)$ mit einer linearen diskreten Approximation über die beiden Phasen $j=1$ und $j=2$ abgeschätzt. Es ergibt sich damit in Vektorschreibweise die folgende Gleichung mit den Steigungen η_j und der Schrittweite

20

T_s :

$$i_{k_j} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & k_j \end{bmatrix}}_{q_{k_j}^T} \underbrace{\begin{bmatrix} i_{0_j} \\ \eta_j T_s \end{bmatrix}}_{p_j} \text{ für } k_j = 0, \dots, N_j - 1 \text{ und } j \in \{1,2\}. \quad (15)$$

Für $N_j, j \in \{1,2\}$ Messungen erhält man demnach

$$\underbrace{\begin{bmatrix} i_{0_j} \\ i_{1_j} \\ \vdots \\ i_{N_j-1} \end{bmatrix}}_{h_j} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & N_j - 1 \end{bmatrix}}_{Q_j} \underbrace{\begin{bmatrix} i_{0_j} \\ \eta_j T_s \end{bmatrix}}_{p_j} \text{ mit } j \in \{1,2\} \quad (16)$$

25

mit dem $(N_j \times 1)$ -dimensionalen Messvektor h_j und der $(N_j \times 2)$ -dimensionalen Regressionsmatrix Q_j für das Ausgleichsproblem $\hat{p}_j = (Q_j^T Q_j)^{-1} Q_j^T h_j$.

Die Stromendbedingungen \hat{i}_{N_j-1} können dann nach

30

$$\hat{i}_{N_j-1} = \hat{i}_{0_j} + \hat{\eta}_j T_s (N_j - 1) = \hat{\rho}_{1_j} + \hat{\rho}_{2_j} (N_j - 1) \quad (17)$$

berechnet werden. Zu beachten ist, dass lediglich ein weiterer Eintrag zusätzlich in der schnellen Abtastzeit T_s ermittelt werden muss.

5 Modellbasierte Mittelung

Durch das Least-Squares-Verfahren erhält man pro PWM-Periode jeweils für die steigende und fallende Flanke bzw. für die erste und die zweite Phase zwei Werte für die Induktivität sowie zwei Werte jeweils für die Stromanfangs- und Stromendwerte. Die einfachste Möglichkeit, aus den beiden Induktivitäten \hat{L}_1^{LS} , \hat{L}_2^{LS} eine Position zu berechnen, ist eine Mittelung der Werte und eine modellbasierte Rückrechnung mit Hilfe von Gleichung (10). Diese sehr einfache Vorgehensweise führt jedoch zu mehreren Nachteilen: (i) Der Einfluss der Geschwindigkeit des zu lagernden Objektes wird nicht berücksichtigt, (ii) eine Änderung des Tastverhältnisses der PWM bleibt unberücksichtigt und (iii) die Geschwindigkeit des Objektes müsste durch näherungsweise Differentiation der Position ermittelt werden.

Um nun diese Probleme zu umgehen, wird erfindungsgemäß ein geeigneter Berechnungsalgorithmus beschrieben. Dazu werden mit Hilfe der aus den Stromanfangs- und Stromendbedingungen gebildeten Stromhübe Δi_j , der Anzahl der Messpunkte N_j und der Strommittelwerte \bar{i}_j der beiden Phasen mit $j \in \{1,2\}$ in Kombination mit der Differenz der Einzelinduktivitäten \hat{L}_1^{LS} , \hat{L}_2^{LS} der Teilperioden modellbasiert die Position und Geschwindigkeit des zu lagernden Objektes errechnet.

30

Induktivitätsermittlung

Bei der Ermittlung der Schätzwerte \hat{L}_j^{LS} mit Hilfe der Least-Squares-Identifikation wurde angenommen, dass die Induktivität während der Zeit der steigenden und fallenden Flanke einer PWM-Periodendauer konstant ist, d.h. es wurde letztlich die Gleichung

35

$$\hat{L}_j^{LS} \frac{di(t)}{dt} = u - R \cdot i, i(0) = i_0, j \in \{1,2\} \quad (18)$$

mit dem elektrischen Widerstand R verwendet. Eine Integration über die Zeitspanne $\Delta t_j = t_{1j} - t_{0j}$ liefert damit

$$\hat{L}_j^{LS} = \frac{1}{\Delta i_j} \int_{t_{0j}}^{t_{1j}} u(\tau) - R \cdot i(\tau) d\tau \quad (19)$$

5 wobei mit $\Delta i_j = i(t_{1j}) - i(t_{0j})$ der Stromhub innerhalb dieser Zeitspanne bezeichnet wird.

Für den Fall, dass sich das Objekt bewegt, dass also für die Geschwindigkeit gilt $w \neq 0$, muss das totale Differential der
10 Flussverkettung in der Form

$$\frac{d\psi(t)}{dt} = \frac{dL(t)}{dt} i(t) + L(t) \frac{di(t)}{dt} = u(t) - R \cdot i(t) \quad (20)$$

verwendet und über die Zeitspanne $\Delta t_j = t_{1j} - t_{0j}$ integriert werden.

$$\int_{t_{0j}}^{t_{1j}} u(\tau) - R \cdot i(\tau) d\tau = \int_{t_{0j}}^{t_{1j}} \frac{dL(\tau)}{d\tau} i(\tau) d\tau + \int_{t_{0j}}^{t_{1j}} L(\tau) \frac{di(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (21)$$

15 Dividiert man diese Gleichung durch den Stromhub und ersetzt die linke Seite durch die geschätzte Induktivität \hat{L}_j^{LS} , so erhält man

$$\hat{L}_j^{LS} = \frac{1}{\Delta i_j} \int_{t_{0j}}^{t_{1j}} \left(\frac{dL(\tau)}{d\tau} i(\tau) + L(\tau) \frac{di(\tau)}{d\tau} \right) d\tau \quad (22)$$

20 Zur weiteren Berechnung werden folgende Annahmen getroffen, welche in den meisten Fällen sehr gut erfüllt sind:

- Die zeitliche Ableitung des Stroms wird durch

$$\frac{di_j(t)}{dt} \approx \frac{\Delta i_j}{\Delta t_j} \quad (23)$$

25 abgeschätzt. Diese Annahme ist dann sehr gut erfüllt, wenn die PWM-Periodendauer hinreichend klein und somit der Stromverlauf annähernd dreiecksförmig ist.

- Es wird angenommen, dass die zeitliche Ableitung der Induktivität innerhalb einer Periodendauer der PWM konstant ist, d.h. $dL(t)/dt = \dot{L} = \text{konst.}$.

5 Setzt man diese Annahmen in Gleichung (22) ein, so erhält man unmittelbar

$$\hat{L}_j^{LS} = \frac{\dot{L}}{\Delta i_j} \int_{t_{0j}}^{t_{1j}} i(\tau) d\tau + \frac{1}{\Delta t_j} \underbrace{\int_{t_{0j}}^{t_{1j}} L(\tau) d\tau}_{\bar{L}} \quad (24)$$

Dabei ist \bar{L} der zu schätzende Mittelwert von $L(t)$.

10 Führt man weiterhin die Strommittelwerte über eine Teilperiode

$$\bar{i}_j = \frac{1}{T_s N_j} \int_{t_{0j}}^{t_{1j}} i(\tau) d\tau \approx \frac{1}{N_j} \sum_{k_j=0}^{N_j-1} i_k \quad (25)$$

mit der Abtastzeit T_s und der Anzahl der Messpunkte N_j ein, so errechnet sich die zu schätzende mittlere Induktivität gemäß

$$\bar{L} = \hat{L}_1^{LS} - \dot{L} T_s \frac{N_1 \bar{i}_1}{\Delta i_1} = \hat{L}_2^{LS} - \dot{L} T_s \frac{N_2 \bar{i}_2}{\Delta i_2} \quad (26)$$

aus den Least-Squares-Schätzungen der jeweiligen Teilperioden. Es ist erkennbar, dass durch eine geeignete Gewichtung der beiden Least-Squares-Schätzungen \hat{L}_j^{LS} der unerwünschte Effekt einer Induktivitätsänderung \dot{L} und somit der Einfluss

20 der Geschwindigkeit w des Objektes kompensierbar ist.

Eine einfache Umrechnung der Gleichung (26) mit Elimination der zeitlichen Ableitung der Induktivität führt zum Mittelwert der Induktivität

$$\bar{L} = \frac{N_2 \bar{i}_2 \Delta i_1 \hat{L}_1^{LS} - N_1 \bar{i}_1 \Delta i_2 \hat{L}_2^{LS}}{N_2 \bar{i}_2 \Delta i_1 - N_1 \bar{i}_1 \Delta i_2} \quad (27)$$

Man beachte, dass alle darin vorkommenden Größen in der Least-Squares-Identifikation bereits berechnet wurden. Damit ist es also möglich, auch dann einen sinnvollen Schätzwert

30 für die Induktivität des Systems zu bekommen, wenn das zu lagernde Objekt nicht still steht, d.h. $w \neq 0$.

Für den Sonderfall nur kleiner Änderungen des Mittelwerts des Stromes gilt, dass die Stromhöhe $\Delta i_1 \approx -\Delta i_2$ und damit die Strommittelwerte $\bar{i}_1 \approx \bar{i}_2$ ungefähr gleich sind, womit die Mittelung zu einer gewichteten kreuzweisen Mittelung

$$\bar{L} = \frac{N_1 \hat{L}_2^{LS} + N_2 \hat{L}_1^{LS}}{N_2 + N_1} \quad (28)$$

degeneriert. Diese Berechnung ist natürlich wesentlich einfacher zu bewerkstelligen, liefert aber evtl. ungenaue Ergebnisse, wenn z.B. durch einen Regler große Änderungen im Strom (und damit im Tastverhältnis) vorgegeben werden.

Positionsbestimmung aus der mittleren Induktivität

In den obigen Schritten wurde der Mittelwert \bar{L} der Induktivität sowie für die zeitliche Ableitung \dot{L} der Induktivität bestimmt. Im letzten Schritt muss aus diesen Werten die aktuelle Position r und/oder die Geschwindigkeit w des zu lagernden Objektes bestimmt werden.

Dazu verwendet man den auf dem Reluktanzmodell gemäß Gleichung (2) basierenden Modellansatz zur Beschreibung der Induktivität $L(r)$ als Funktion der Position r des zu lagernden Objektes. Bezeichnet man mit $L^M(r)$ den funktionalen Zusammenhang der Induktivität mit der Position r , so erhält man einen Schätzwert \hat{r} der Position durch Inversion dieses Zusammenhangs:

$$\hat{r} = \left(L^M(r) \right)^{-1}(\bar{L}) \quad (29)$$

Zur Stabilisierung des zu lagernden Objektes wird vielfach auch die Geschwindigkeit w benötigt. Klassischerweise wird diese durch näherungsweise Differentiation der geschätzten Position \hat{r} ermittelt. Diese Vorgehensweise hat jedoch den Nachteil, dass Messrauschen zu einem stark verrauschten Schätzwert für die Geschwindigkeit führen kann und dass durch die näherungsweise Differentiation eine Phasendrehung auftritt, welche wiederum zu Stabilitätsproblemen im geschlossenen Regelkreis führen kann.

Der in dieser Erfindung entwickelte Algorithmus kann die Geschwindigkeit direkt aus den geschätzten Induktivitätswerten ohne Differentiation errechnen. Berücksichtigt man, dass für die zeitliche Ableitung \dot{L} der Induktivität gilt

$$\dot{L} = \frac{\partial L(r)}{\partial r} \cdot w, \quad (30)$$

kann man unmittelbar folgenden Ausdruck als Schätzwert für die aktuelle Geschwindigkeit des zu lagernden Objektes ermitteln:

$$\hat{w} = \frac{\hat{L}_2^{LS} - \hat{L}_1^{LS}}{T_s} \left(\frac{\partial L^M(r)}{\partial r} \Big|_{r=\hat{r}^{LS}} \right)^{-1} \frac{\Delta i_1 \Delta i_2}{N_2 \bar{i}_2 \Delta i_1 - N_1 \bar{i}_1 \Delta i_2}. \quad (31)$$

Zusammenfassend wurde in dieser Erfindung ein Algorithmus zur Schätzung der Position r und der Geschwindigkeit w eines mit Hilfe eines Magnetlagers zu lagernden Objektes entwickelt, wobei sich dieser Algorithmus durch folgende Eigenschaften auszeichnet:

- Die Berechnung kann in einen mathematisch sehr einfachen Teil, welcher mit einer schnellen Abtastzeit berechnet werden muss, und einen komplexen Teil, welcher mit einer wesentlich geringeren Abtastzeit ermittelt werden kann, aufgeteilt werden. Dies stellt insbesondere im Hinblick auf eine kostengünstige Implementierung einen wesentlichen Vorteil gegenüber herkömmlichen Verfahren dar.
- Durch eine Gewichtung der geschätzten Induktivitätswerte kann sowohl auf die Position als auch auf die Geschwindigkeit des zu lagernden Objektes geschlossen werden. Dabei können die Einflüsse der Geschwindigkeit und der Pulsweite unterdrückt werden.

Schätzung des Widerstandes und Widerstandsadaption

Bis hierhin wurde angenommen, dass der elektrische Widerstand R des elektrischen Kreises konstant und bekannt ist. Nun än-

dert sich dieser Widerstand im Betrieb aufgrund von Temperaturänderungen. Daher bringt eine Schätzung des Widerstands R für eine praktische Implementierung weitere Vorteile.

5 In einer erfindungsgemäßen Weiterbildung wird der zur sensorlosen Zustandsschätzung des Magnetlagers benötigte elektrische Widerstand basierend auf dem widerstandsabhängigen geschätzten Induktivitätsfehler adaptiert.

10 Bei der oben beschriebenen Ermittlung der Schätzwerte $\hat{L}_{j,s}^{LS}$ mit Hilfe der Least-Squares-Identifikation wurde angenommen, dass die Induktivität während der Zeit der steigenden (j=1) und fallenden Flanke (j=2) einer PWM-Periodendauer konstant ist, d.h. es wurde von Gleichung (18) ausgegangen. Betrachtet man nun den elektrischen Widerstand R_n als Überlagerung des geschätzten Widerstands \hat{R} und eines Widerstandsfehlers δR entsprechend

$$R_n = \hat{R} + \delta R, \tag{32}$$

so ergibt sich für die fehlerhafte Induktivitätsschätzung

20 $\hat{L}_{j,s}^{LS} \frac{di(t)}{dt} = u - \hat{R} \cdot i(t)$ mit $i(0) = i_0$ und $j \in \{1,2\}$ (33)

Betrachtet man das totale Differential der Flussverkettung in der Form

$$\frac{d\psi(t)}{dt} = \frac{dL_n(t)}{dt} i(t) + L_n(t) \frac{di(t)}{dt} = u(t) - R_n i(t), \tag{34}$$

bzw. mit Gleichung (33)

25 $\hat{L}_{j,s}^{LS} \frac{di(t)}{dt} = \frac{dL_n(t)}{dt} i(t) + L_n(t) \frac{di(t)}{dt} + \delta R i(t),$ (35)

und integriert über die Zeitspanne $\Delta t_j = t_{1j} - t_{0j}$, so erhält man nach Division mit dem Stromhub

$$\hat{L}_{j,s}^{LS} = \frac{1}{\Delta i_j} \int_{t_{0j}}^{t_{1j}} \left(\frac{dL_n(\tau)}{d\tau} + \delta R \right) i(\tau) d\tau + \frac{1}{\Delta i_j} \int_{t_{0j}}^{t_{1j}} L_n(\tau) \frac{di(\tau)}{d\tau} d\tau. \tag{36}$$

30 Zur weiteren Berechnung werden wieder folgende Annahmen getroffen:

- Die zeitliche Ableitung des Stroms wird abgeschätzt durch:

$$\frac{di_j(t)}{dt} \approx \frac{\Delta i_j}{\Delta t_j}, j \in \{1,2\}$$

Diese Annahme ist dann sehr gut erfüllt, wenn die PWM-Periodendauer hinreichend klein und somit der Stromverlauf annähernd dreiecksförmig ist.

- 5 - Man nimmt an, dass die zeitliche Ableitung der Induktivität innerhalb einer Periodendauer der PWM konstant ist, d.h. $dL_n(t)/dt = \dot{L}_n = \text{konst.}$

10 Setzt man diese beiden Annahmen in (36) ein, so erhält man unmittelbar

$$\hat{L}_{j,s}^{LS} = \frac{\dot{L}_n + \delta R}{\Delta i_j} \int_{t_{0j}}^{t_{1j}} i(\tau) d\tau + \frac{1}{\Delta t_j} \underbrace{\int_{t_{0j}}^{t_{1j}} L(\tau) d\tau}_{\bar{L}_n} \quad (37)$$

wobei \bar{L}_n der zu schätzende Mittelwert von $L_n(t)$ ist. Führt man weiterhin die Strommittelwerte über eine Teilperiode

$$\bar{i}_j = \frac{1}{T_s N_j} \int_{t_{0j}}^{t_{1j}} i(\tau) d\tau \approx \frac{1}{N_j} \sum_{k_j=0}^{N_j-1} i_k, \quad (38)$$

- 15 mit der Abtastzeit T_s , der Anzahl der Messpunkte $N_j, j \in \{1,2\}$, ein, so errechnet sich die zu schätzende mittlere Induktivität

$$\bar{L}_n = \hat{L}_{1,s}^{LS} - (\dot{L}_n + \delta R) T_s \frac{N_1 \bar{i}_1}{\Delta i_1}, \quad (39)$$

bzw.

20
$$\bar{L}_n = \hat{L}_{2,s}^{LS} - (\dot{L}_n + \delta R) T_s \frac{N_2 \bar{i}_2}{\Delta i_2}. \quad (40)$$

Die Differenz der beiden geschätzten Induktivitätswerte ergibt sich dann zu:

$$\hat{L}_{2,s}^{LS} - \hat{L}_{1,s}^{LS} = (\dot{L}_n + \delta R) T_s \left(\frac{N_2 \bar{i}_2}{\Delta i_2} - \frac{N_1 \bar{i}_1}{\Delta i_1} \right) \quad (41)$$

- 25 Ersetzt man in den Gleichungen (39) oder (40) die zeitliche Ableitung der Induktivität aus Gleichung (41), erhält man die Mittelung

$$\bar{L}_n = \frac{N_2 \bar{i}_2 \Delta i_1 \hat{L}_{1,s}^{LS} - N_1 \bar{i}_1 \Delta i_2 \hat{L}_{2,s}^{LS}}{N_2 \bar{i}_2 \Delta i_1 - N_1 \bar{i}_1 \Delta i_2}, \quad (42)$$

welche unabhängig vom geschätzten Widerstandswert ist. Für die praktische Implementierung mit einer begrenzten Mess- und Rechengenauigkeit ist es allerdings sinnvoll den elektrischen Widerstand zu schätzen.

5

Adaption des elektrischen Widerstandes

Auf Grund der Temperaturänderungen des Gesamtsystems ändert sich wie bereits oben erwähnt der elektrische Widerstand.

10

Es wird eine Widerstandsadaption vorgeschlagen, welche auf der Tatsache beruht, dass sich die Schätzung eines inkorrekten Widerstandswertes im geschätzten Induktivitätsfehler

$$\Delta \hat{L} = \hat{L}_{2,s}^{LS} - \hat{L}_{1,s}^{LS} \quad (43)$$

15

niederschlägt (vgl. Gleichung (41)).

Nach Gleichung (41) ist der Induktivitätsfehler $\Delta \hat{L}$ proportional zur Summe aus dem Widerstandsfehler δR und der totalen zeitlichen Ableitung der Induktivität \dot{L}_n . Ferner gilt nach Gleichung (30) mit der Kettenregel der Differentiation für die totale zeitliche Ableitung der Induktivität $\dot{L} = \frac{\partial L(r)}{\partial r} \cdot w$.

20

Die totale zeitliche Ableitung \dot{L}_n ist jedoch nur Null, wenn die Geschwindigkeit Null ist, d.h. $w = 0$, da die partielle Ableitung der Induktivität nach dem Luftspalt für ein reales System nie Null wird. Damit funktioniert rein theoretisch eine Adaption, welche nur aus einem I-Regler besteht, auf Basis des Induktivitätsfehlers lediglich für ein still stehendes Objekt. Die hier angeführte Widerstandsadaption filtert den Induktivitätsfehler zuvor und beseitigt somit den Einfluss der Geschwindigkeit.

30

Für ein still stehendes Objekt kann der elektrische Widerstand demnach geschätzt werden, indem der Induktivitätsfehler $\Delta \hat{L}$ langsam zu Null geregelt wird, da für ein still stehendes Objekt $\dot{L}_n = 0$ gilt und somit der Induktivitätsfehler $\Delta \hat{L}$ gemäß Gleichung (41) direkt proportional zum Widerstandsfehler δR

35

ist. Die Widerstandsänderung, die sich durch die Erwärmung des Elektromagneten ergibt, ist wesentlich langsamer als die Dynamik bzw. die Positionsänderung des zu lagernden Objekts. Demzufolge kann mit Hilfe einer Tiefpassfilterung

$$5 \quad \frac{d}{dt} \Delta \bar{L} = -\frac{1}{T_{LF}} (\Delta \bar{L} - \Delta \hat{L}), \quad \Delta \bar{L}(0) = \Delta \bar{L}_0 \quad (44)$$

ein ggf. störender geschwindigkeitsabhängiger Anteil \dot{L}_n im Induktivitätsfehler gefiltert bzw. beseitigt werden, vgl. Gleichung 41. Der geschwindigkeitsunabhängige Induktivitätsfehler $\Delta \bar{L}$ wird dann mit Hilfe eines I-Reglers

$$10 \quad \frac{d}{dt} \hat{R} = -\frac{1}{T_{RA}} \Delta \bar{L}, \quad \hat{R}(0) = \hat{R}_0 \quad (45)$$

zu Null geregelt. Damit wird der korrekte Widerstandswert geschätzt.

Die Widerstandsadaption besteht also aus einem Tiefpassfilter und einem I-Regler. Die Widerstandsadaption, bestehend aus Gleichung (44) und (45) basierend auf den Induktivitätsfehler der Least-Squares basierten Positionsschätzung, gewährleistet, dass der Widerstandsfehler δR zu Null geregelt wird, um so den realen Widerstandswert zu schätzen. Dabei sind T_{LF} und T_{RA} positive Einstellparameter.

Zur Implementierung auf einem Digitalrechner werden die Gleichungen (44) und (45) zeitlich diskretisiert. Die Diskretisierung ist allerdings nicht eindeutig. Im einfachsten Fall wird die kontinuierliche Differentiation durch den Vorwärts-Differenzenquotient (Euler-Vorwärts-Verfahren) ersetzt. Man erhält daraus eine sog. Differenzgleichung. Mit Hilfe derer kann in äquidistanten Zeitschritten aus dem vorherigen Schätzwert ein neuer berechnet werden kann. Der Geschätzte Widerstandswert wird an die Positionsschätzung übergeben, womit ein neuer Schätzwert für die Induktivitäten berechnet wird und sich ein neuer Schätzwert für den Induktivitätsfehler ergibt. Diese Iteration wird in jedem Abtastschritt ausgeführt.

35

Überlagerter Beobachter

Wie in den obigen Herleitungen zu erkennen ist, wurde zur Bestimmung der Position und der Geschwindigkeit des zu lagernden Objektes keinerlei Information über die Dynamik bzw. die Eigenschaften des Objektes (z.B. die Masse, die Dämpfung, usw.) verwendet. Dies ist insofern ein großer Vorteil, als dieses Verfahren auch sehr gute Positions- und Geschwindigkeitsinformationen liefert, wenn das zu lagernde Objekt nur wenig bekannt ist.

10

Andererseits ist in vielen Anwendungen eine relativ genaue Kenntnis des zu lagernden Objektes vorhanden, weswegen eine Kombination des obigen Schätzalgorithmus mit einem Zustandsbeobachter sinnvoll sein kann. Mit einem Beobachter könnte man z.B. eine wesentliche Reduktion des Rauschens der Position und Geschwindigkeit erreichen, zusätzlich einzelne Parameter des zu lagernden Objektes identifizieren oder die auf das Objekt einwirkenden Lastkräfte schätzen. Als mögliche Beobachterstrukturen kommen von linearen Beobachtern (Luenbergerbeobachter, Kalmanfilter usw.) bis zu modernen nichtlinearen Verfahren wie das Extended Kalman-Filter, das Uncented Kalman-Filter oder Normalformbeobachter in Frage. Da diese Verfahren im Wesentlichen aus der Literatur bekannt sind, wird an dieser Stelle auf eine genauere Ausführung verzichtet. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass diese Beobachter nur in Kombination mit dem obigen Algorithmus zu Positions- und Geschwindigkeitsschätzung die Anforderungen an die Genauigkeit und Dynamik erfüllen können.

30

Wesentliche qualitative und quantitative Vorteile der Erfindung

35

Das Verfahren benötigt zur Rekonstruktion der Zustandsgrößen keinen zusätzlichen Hardwareaufwand, da inhärente Messeffekte hervorgerufen durch die pulsweitenmodulierte Ansteuerung ausgenutzt werden. Lediglich eine Strom- und Spannungsmessung muss verfügbar sein.

Wird der Algorithmus mit einem Beobachter kombiniert, dann ist es möglich das Gesamtsystem aus systemtheoretischer Sicht algorithmisch in ein elektrisches und mechanisches Teilsystem zu trennen und überdies die volle Modellinformation des Gesamtsystems zur Zustandsgewinnung zu nutzen.

Die getrennte Behandlung des Auf- und Entladevorgangs zur Least-Squares-Schätzung der Induktivitäten bietet einerseits die Möglichkeit, den Einfluss der Integratordrift auf Grund der Diskretisierung des Induktionsgesetzes zu verringern. Andererseits lassen sich das transiente Störverhalten der nicht idealen elektrischen Schaltelemente des Wechselrichters beim Ein- bzw. Ausschalten und der Einfluss von Wirbelströmen in der softwaretechnischen Realisierung ausklammern.

Durch den Aufbau des Least-Squares-Schätzers als Multiraten-system kann weiterhin der Rechenaufwand wesentlich verringert werden. Die Berechnung der Regressoren kann in Ganzzahlarithmetik kostengünstig auf programmierbarerem Integrierten Schaltkreisen (z.B. FPGA) umgesetzt werden, so dass sehr kleine Abtastzeiten und relativ genaue Schätzungen der Induktivitäten und damit der Zustandsgrößen gewonnen werden können. Die rechenintensiven Operationen können des Weiteren in einer größeren Abtastzeit erfolgen.

Die Verwendung eines positions- und geschwindigkeitsabhängigen Modells für die Induktivität und die anschließende Regression stellt sich als rechenintensiv dar, da dies zusätzliche Parameter erfordert. Die Vernachlässigung des Geschwindigkeitseinflusses im Induktionsgesetz führt jedoch zu einer geschwindigkeitsabhängigen Spreizung der Induktivitätsschätzungen des Auf- und Entladevorgangs. Eine theoretische Untersuchung zeigt, dass die Einzelinduktivitäten über eine Mittelung, welche die Stromhöhe, die Anzahl der Messpunkte und die Strommittelwerte der Teilperioden nutzt, korrigiert werden können. Sie zeigt weiter, dass die Differenz der Einzelinduktivitäten proportional zur Geschwindigkeit ist und unter Zu-

hilfenahme des Induktivitätsmodells analytisch ermittelt werden kann.

Im Unterschied zu den bekannten Schätzverfahren ist nicht nur
5 die Positionsschätzung sondern auch die Geschwindigkeits-
schätzung direkt aus dem Schätzalgorithmus möglich. Dem Posi-
tionsregler, welcher in der Regel aus einer Kompensation der
Nichtlinearitäten und einem stabilisierenden Proportional-
Integral-Differential-Regler besteht, wird konventionell le-
10 diglich die geschätzte Position zurückgeführt und im Diffe-
rential-Anteil des Reglers ein geschwindigkeitsproportionales
Signal gebildet. Allerdings beeinträchtigt und limitiert das
Rauschen der Positionsschätzung die erreichbare Regelgüte und
Robustheit gegenüber Modellunsicherheiten des Reglers. Ist,
15 wie bei dem entwickelten Schätzverfahren, zusätzlich eine Ge-
schwindigkeitsschätzung verfügbar, so kann diese ebenso rück-
geführt und eine Erhöhung der Regelgüte und Robustheit er-
zielt werden.

20 Darüber hinaus kann mit einem nichtlinearen modellbasiertem
Beobachterkonzept das mechanische Teilmodell des Gesamtsys-
tems in die Zustandsschätzung eingebracht werden. Damit ist
einerseits eine Filterung zur Rauschunterdrückung der aus dem
Least-Squares-Schätzers ermittelten Position- und Geschwin-
25 digkeitsschätzung möglich und andererseits durch Aufnahme ei-
nes Störgrößenansatzes in die Modellgleichungen eine von au-
ßen einwirkende Lastkraft schätzbar. Im Gegensatz zu einer
herkömmlichen Filterung, geht mit der beobachterbasierten
Filterung keine Phasenverschiebung einher.

30 Die Erfindung ermöglicht eine getrennte Schätzung der Induk-
tivität der Auflade- und Entladephase mit Hilfe von Least-
Squares Schätzung, wobei eine Auftrennung in einen schnellen
aber mathematisch einfachen Teil und einen langsamen mathema-
35 tisch komplexeren Teil erfolgen kann.

Der Einfluss der Geschwindigkeit des zu lagernden Objektes sowie eine Änderung der Pulsweite der Spannung kann durch eine geeignete Korrektur eliminiert werden.

- 5 Die Geschwindigkeit des zu lagernden Objektes kann direkt ohne zeitliche Differentiation der Position aus den Schätzwerten der Induktivität und weiteren Hilfsgrößen ermittelt werden.

Literaturliste

- [1] Noh, Myounggyu D.: "Self-Sensing Magnetic Bearings Driven by Switching Power Amplifier", Diss., University of Virginia, Faculty of the School of Engineering and Applied Science, 1996
5
- [2] Pawelczak, Dieter: "Nutzung inhärenter Messeffekte von Aktoren und Methoden zur sensorlosen Positionsmessung im Betrieb", Diss., Universität der Bundeswehr München, 2005
10
- [3] Skricka, Norbert: "Entwicklung eines sensorlosen aktiven Magnetlagers", Fortschritt-Berichte, Reihe 8, Nr. 1027, VDI-Verlag Düsseldorf, 2004
15
- [4] Yuan QingHui; Li, Perry Y.: "Self-sensing actuators in electrohydraulic valves", in: Proceeding of the International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim, California USA, 2004
20

Patentansprüche

1. Verfahren zur Adaption eines Wertes eines elektrischen Widerstandes eines Magnetlagers mit den Schritten

- 5 - Ansteuerung mindestens eines Elektromagneten des Magnetlagers mittels einer pulsweitenmodulierten (PWM) Spannung, wobei der zeitliche Verlauf der pulsweitenmodulierten Spannung zumindest eine erste Phase ($j=1$), insbesondere eine Aufladephase, und zumindest eine zweite Phase ($j=2$), insbesondere eine Entladephase, aufweist,
- 10 - Messung und Auswertung von Strom i und Spannung u des Elektromagneten zur Ermittlung eines ersten und eines zweiten Induktivitätswertes \hat{L}_1^{LS} , \hat{L}_2^{LS} in der ersten Phase ($j=1$) und in der zweiten Phase ($j=2$),
- 15 - Schätzung, insbesondere Least-Squares-Schätzung, des ersten Induktivitätswertes \hat{L}_1^{LS} für die erste Phase ($j=1$) und des zweiten Induktivitätswertes \hat{L}_2^{LS} für die zweite Phase ($j=2$), wobei bei der Schätzung der Induktivitätswerte \hat{L}_1^{LS} , \hat{L}_2^{LS} der elektrische Widerstand R_n des magnetischen Lagers, insbesondere des Elektromagneten des magnetischen Lagers, berücksichtigt wird,
- 20 - Bestimmung des Induktivitätsfehlers $\Delta\hat{L} = \hat{L}_2^{LS} - \hat{L}_1^{LS}$ und
- Adaption des elektrischen Widerstands dadurch, dass der Induktivitätsfehler $\Delta\hat{L}$ zu Null geregelt wird.

25

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Widerstandsadaption aus einem Tiefpassfilter und einem I-Regler besteht.

- 30 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Induktivitätsfehler mit Hilfe einer Tiefpassfilterung $\frac{d}{dt} \Delta\bar{L} = -\frac{1}{T_{LF}} (\Delta\bar{L} - \Delta\hat{L})$ gefiltert wird.

- 35 4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Induktivitätsfehler $\Delta\hat{L}$ mit Hilfe eines I-Reglers

$$\frac{d}{dt} \hat{R} = -\frac{1}{T_{RA}} \Delta \bar{L} \text{ zu Null geregelt wird.}$$

5. Verfahren zur sensorlosen Positionsermittlung eines in einem magnetischen Lager gelagerten Objekts relativ zu dem magnetischen Lager, insbesondere relativ zu einem Elektromagneten des magnetischen Lagers, mit den folgenden Schritten:
- Ansteuerung mindestens eines Elektromagneten des Magnetlagers mittels einer pulsweitenmodulierten (PWM) Spannung, wobei der zeitliche Verlauf der pulsweitenmodulierten Spannung zumindest eine erste Phase ($j=1$), insbesondere eine Aufladephase, und zumindest eine zweite Phase ($j=2$), insbesondere eine Entladephase, aufweist,
 - Messung und Auswertung von Strom i und Spannung u des Elektromagneten zur Ermittlung eines ersten und eines zweiten Induktivitätswertes \hat{L}_1^{LS} , \hat{L}_2^{LS} in der ersten Phase ($j=1$) und in der zweiten Phase ($j=2$),
 - Schätzung, insbesondere Least-Squares-Schätzung, des ersten Induktivitätswertes \hat{L}_1^{LS} für die erste Phase ($j=1$) und des zweiten Induktivitätswertes \hat{L}_2^{LS} für die zweite Phase ($j=2$), wobei bei der Schätzung der Induktivitätswerte \hat{L}_1^{LS} , \hat{L}_2^{LS} der elektrische Widerstand R_n des magnetischen Lagers, insbesondere des Elektromagneten des magnetischen Lagers, berücksichtigt wird,
 - Berechnung der Position des Objekts relativ zum magnetischen Lager anhand der geschätzten Induktivitätswerte \hat{L}_1^{LS} , \hat{L}_2^{LS} .
6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass der elektrische Widerstand R_n mit einem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2 ermittelt wird.
7. Verfahren nach Anspruch 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, dass zur Berechnung der Position des Objekts eine aus den geschätzten Induktivitätswerten \hat{L}_1^{LS} , \hat{L}_2^{LS} gemittelte Induktivität \bar{L} verwendet wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass eine Geschwindigkeit des Objekts aus den geschätzten Induktivitätswerten \hat{L}_1^{LS} , \hat{L}_2^{LS} berechnet wird.

- 5 9. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass in der ersten Phase ($j=1$) an N_1 Messpunkten und in der zweiten Phase ($j=2$) an N_2 Messpunkten der Strom $i_{k_j,j}$ (mit $k_j = 0, \dots, N_j - 1$) gemessen wird.
- 10 10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass für die erste Phase ($j=1$) und für die zweite Phase ($j=2$) jeweils aus den an den N_j Messpunkten gemessenen Stromwerten $i_{k_j,j}$ (mit $k_j = 0, \dots, N_j - 1$) ein Strommittelwert \bar{i}_j gebildet wird.
- 15 11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, dass für die erste Phase ($j=1$) und für die zweite Phase ($j=2$), insbesondere mittels eines Least-Squares-Verfahrens, jeweils eine Stromanfangsbedingung $\hat{i}_{0,j}$ und eine Stromendbedingungen $\hat{i}_{N_j-1,j}$ ermittelt und aus diesen Bedingungen Stromhöhe $\Delta i_j = \hat{i}_{N_j-1,j} - \hat{i}_{0,j}$ der ersten Phase ($j=1$) und der zweiten Phase ($j=2$) bestimmt werden, wobei die Stromhöhe Δi_j in die Schätzung der Induktivitätswerte \hat{L}_1^{LS} , \hat{L}_2^{LS} eingehen.
- 25 12. Verfahren nach den Ansprüchen 10 und 11, dadurch gekennzeichnet, dass der Mittelwert \bar{L} der Induktivität und daraus die Position und/oder die Geschwindigkeit des Objekts berechnet wird mit Hilfe
- der aus den Stromanfangs- und Stromendbedingungen ermittel-
 - 30 ten Stromhöhe $\Delta i_j = \hat{i}_{N_j-1,j} - \hat{i}_{0,j}$,
 - der Anzahl der Messpunkte N_1 , N_2 ,
 - der Strommittelwerte \bar{i}_j der ersten ($j=1$) und der zweiten Phase ($j=2$) und
 - der Differenz der geschätzten Induktivitätswerte \hat{L}_1^{LS} , \hat{L}_2^{LS}
 - 35 der ersten ($j=1$) und der zweiten Phase ($j=2$).

FIG 1

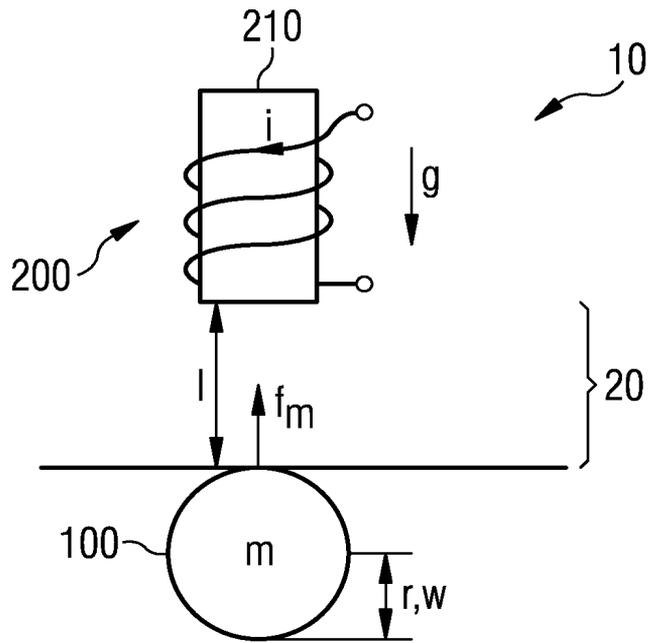


FIG 2

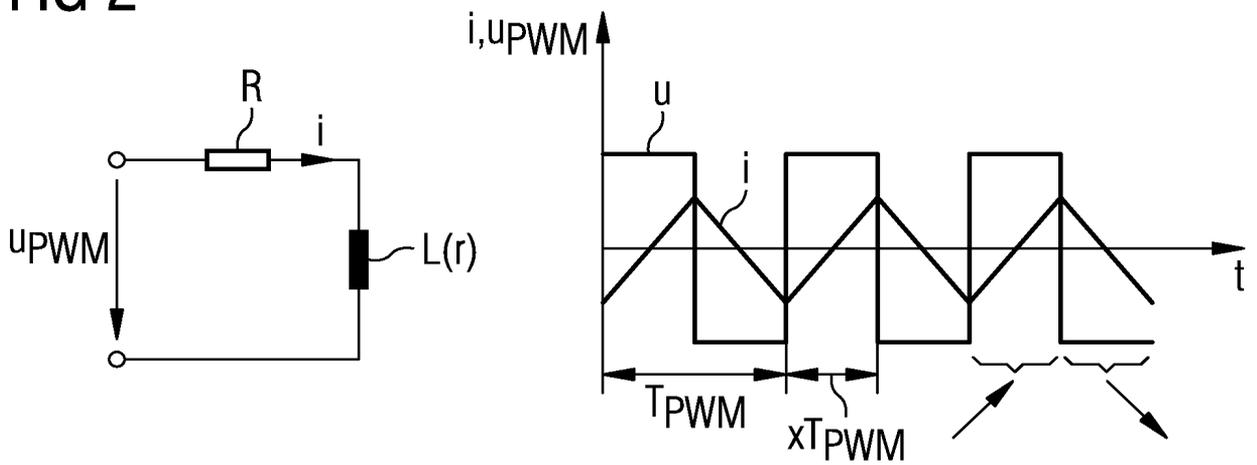
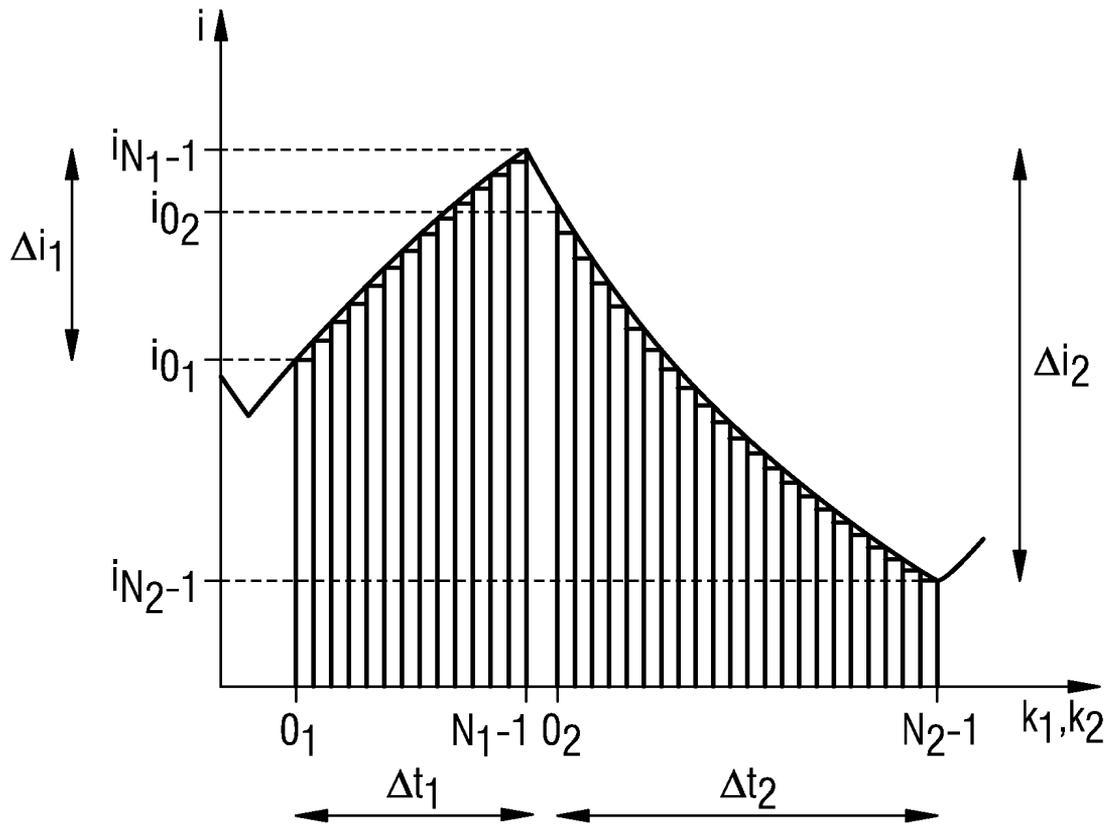


FIG 3



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No PCT/EP2011/053423

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER INV. F16C32/04 ADD.		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) F16C		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used) EPO-Internal		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	EP 1 903 228 A1 (EBARA CORP [JP]) 26 March 2008 (2008-03-26) paragraphs [0024], [0026], [0027], [0032], [0038], [0040], [0041], [0047], [0055] - [0057]; figure 1 -----	1,5
A,P	DE 10 2008 064380 A1 (SIEMENS AG [DE]) 24 June 2010 (2010-06-24) cited in the application the whole document -----	1,5
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents :		
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier document but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art. "&" document member of the same patent family	
Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report	
29 August 2011	05/09/2011	
Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Maukonen, Kalle	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2011/053423

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
EP 1903228	A1	26-03-2008	
		WO 2007004656 A1	11-01-2007
		US 2011012456 A1	20-01-2011
		US 2009096302 A1	16-04-2009

DE 102008064380	A1	24-06-2010	NONE

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen PCT/EP2011/053423

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. F16C32/04 ADD.				
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC				
B. RECHERCHIERTE GEBIETE Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) F16C				
Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen				
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe) EPO-Internal				
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN				
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.		
A	EP 1 903 228 A1 (EBARA CORP [JP]) 26. März 2008 (2008-03-26) Absätze [0024], [0026], [0027], [0032], [0038], [0040], [0041], [0047], [0055] - [0057]; Abbildung 1 -----	1,5		
A,P	DE 10 2008 064380 A1 (SIEMENS AG [DE]) 24. Juni 2010 (2010-06-24) in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument -----	1,5		
<input type="checkbox"/> Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen <input checked="" type="checkbox"/> Siehe Anhang Patentfamilie				
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; border: none;"> * Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist </td> <td style="width: 50%; border: none;"> "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist </td> </tr> </table>			* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist	"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist
* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist	"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist			
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche		Absenddatum des internationalen Recherchenberichts		
29. August 2011		05/09/2011		
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Bevollmächtigter Bediensteter Maukonen, Kalle		

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2011/053423

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 1903228	A1	26-03-2008	
		WO 2007004656 A1	11-01-2007
		US 2011012456 A1	20-01-2011
		US 2009096302 A1	16-04-2009

DE 102008064380	A1	24-06-2010	KEINE
