



**Beschreibung**

## PRIORITÄTSANSPRUCH

**[0001]** Diese Anmeldung beansprucht den Vorteil des Anmeldedatums der US-Patentanmeldung mit der Seriennummer 16/948.906, eingereicht am 5. Oktober 2020 und mit dem Titel „MOTOR-CURRENT CONTROL PROCESS FOR PERMANENTMAGNET SYNCHRONOUS MOTORS AND RELATED SYSTEMS, METHODS AND DEVICES“, die den Vorteil des Anmeldedatums der chinesischen Patentanmeldung mit der Seriennummer 201911148300.3, eingereicht am 21. November 2019, beansprucht, deren Offenbarung hiermit in ihrer Gesamtheit durch diese Bezugnahme hierin aufgenommen wird.

## TECHNISCHES GEBIET

**[0002]** Beschriebene Ausführungsformen beziehen sich allgemein auf eine Motorstromsteuerung und allgemeiner auf eine Motorsteuerung. Einige Ausführungsformen beziehen sich allgemein auf Treiber, die Prozesse zum Verfolgen eines Motorstroms zu einem Sollmotorstrom implementieren, und Steuerungen für Permanentmagnet-Synchronmotoren, die solche Prozesse implementieren.

## STAND DER TECHNIK

**[0003]** Servomotoren sind Spezialmotoren, die zu einer genauen Drehwinkelsteuerung und Drehzahlsteuerung fähig sind und häufig zur hochansprechenden, hochpräzisen Positionierung von Ausrüstung verwendet werden. Eine Vielfalt von Motoren, die unterschiedliche Steuertechniken implementieren, werden als Servomotoren verwendet. Ein Motortyp, der für Servomotoren verwendet wird, sind Synchronmotoren, die die Drehung einer Welle mit einer Frequenz eines Versorgungsstroms synchronisieren. Ein typischer Synchronmotor schließt Mehrphasenwechselstromelektromagnete (Mehrphasen-AC-Elektromagnete) an einem Stator (d. h. nicht rotierenden Teil) des Motors ein, der ein erstes Magnetfeld (auch als „Statorfeld“ bezeichnet) erzeugt, das sich im Takt von Schwingungen eines Netzstroms dreht. Ein Rotor (d. h. ein rotierendes Teil) schließt Permanentmagnete oder Elektromagnete ein und dreht sich in Übereinstimmung mit dem ersten Magnetfeld mit der gleichen Drehzahl und erzeugt dadurch ein zweites synchronisiertes Magnetfeld (auch als „Rotorfeld“ bezeichnet) des AC-Motors. Theoretisch ist eine Drehperiode des Rotors genau gleich einer ganzzahligen Anzahl von AC-Zyklen.

**[0004]** Permanentmagnet-Synchronmotoren (PMSMs) sind Synchronmotoren, die zum Erzeugen des zweiten, konstanten Magnetfelds Permanentmagnete verwenden, die in den Rotor eingebettet sind. Ein Stator eines PMSM trägt üblicherweise Wicklun-

gen, die mit einer AC-Versorgung verbunden sind, um ein Statorfeld (d. h. ein rotierendes Magnetfeld) zu erzeugen, das sich im Takt mit Schwingungen von Strömen an den Statorwicklungen dreht (solche Ströme werden auch als „Statorströme“ und „Motorströme“ bezeichnet). Bei synchronen Drehzahlen synchronisiert sich ein Rotor von einem PMSM-Polen mit der Drehung des Statorfelds.

**[0005]** Um eine leistungsstarke Motorsteuerung zu erreichen, werden für PMSMs manchmal Vektorsteuertechniken verwendet, die feldorientierte Steuerung (FOC) genannt werden. FOC-Algorithmen zerlegen einen Statorstrom in zwei Komponenten: einen magnetfelderzeugenden Teil ( $i_d$ ) und einen drehmomenterzeugenden Teil ( $i_q$ ). Jedes von  $i_d$  und  $i_q$  kann separat gesteuert werden. Das Reaktanzmoment eines PMSM ist das Ergebnis einer Wechselwirkung des Magnetfelds des Stators und des Rotormagnetfelds. Statorströme werden aktualisiert, während sich ein Rotor dreht, um den Statorfluss (d. h. q-Achse) auf 90 Grad zu dem Rotorfluss (d. h. d-Achse) zu halten. Ein Diagramm eines Beispiels eines für FOC geeigneten PMSM ist in **Fig. 10** gezeigt. Wie in **Fig. 10** gezeigt, befinden sich die Wicklungen a, b und c richtungsmäßig in einem Stator, und ein Rotor ist in einem durch den Stator definierten Raum angeordnet. Achsen, die einer Achse des Statorfelds entsprechen, das durch Fließen von Strom durch jede Wicklung erzeugt wird, sind als Achse A, Achse B und Achse C gezeigt. Ebenfalls gezeigt sind eine beispielhafte Quadraturmagnetachse (q-Magnetachse) und eine direkte Magnetachse (d-Magnetachse). Im Fall eines FOC-gesteuerten Motors kann ein Drehdetektor angeordnet sein, um die Drehung des Motors zu beobachten und Bewegungsinformationen (z. B. Drehposition und Drehgeschwindigkeit, ohne darauf beschränkt zu sein) über die beobachtete Bewegung des Motors einem Treiber zuzuführen. Darüber hinaus kann ein Stromdetektor angeordnet sein, um die Motorströme (d. h. Statorströme, die an jeweiligen Statorwicklungen beobachtet werden) an dem Motor zu beobachten und Motorstrominformationen über die beobachteten Ströme des Motors einem Treiber zuzuführen. Der Treiber kann Fehler berechnen, wobei die Fehler eine Differenz zwischen einer Sollrotation/einem Sollstrom des Motors und einer beobachteten Bewegung/einem beobachteten Strom des Motors anzeigen können. Der Treiber kann versuchen, die Motordrehung durch Steuern des Statorstroms zu steuern, um theoretisch den Fehler auf null zu reduzieren. Dies ermöglicht es dem Servomotor unter anderem, hochgenaue Positioniervorgänge durchzuführen.

## OFFENBARUNG

**[0006]** Die beschriebenen Ausführungsformen beziehen sich auf eine Motorsteuerung für Synchronmotoren, und insbesondere beziehen sich einige

Ausführungsformen auf eine Motorstromsteuerung für Permanentmagnet-Synchronmotoren. Es werden Ausführungsformen einer Stromsteuerung beschrieben, die eine adaptive Steuerung einschließen, die konfiguriert ist, um sich an eine sich ändernde Systemdynamik eines PMSM anzupassen. Es werden Ausführungsformen adaptiver Steuertechniken beschrieben, die ein Schätzen von Systemparametern eines PMSM und ein Anpassen von Steueraktionen zum Kompensieren solcher geschätzten Systemparameter einbeziehen. Es kann erwartet werden, dass solche angepassten Steueraktionen einen beobachteten Motorstrom zu einem Sollmotorstrom verfolgen. Systeme, Verfahren und Vorrichtungen, die sich auf das Vorstehende beziehen, werden ebenfalls beschrieben.

**[0007]** Während diese Offenbarung mit Ansprüchen endet, die bestimmte Ausführungsformen besonders hervorheben und eindeutig beanspruchen, können verschiedene Merkmale und Vorteile von Ausführungsformen innerhalb des Schutzzumfangs dieser Offenbarung leichter aus der folgenden Beschreibung in Verbindung mit den begleitenden Zeichnungen ermittelt werden.

#### Figurenliste

**[0008]** Um die Erörterung eines bestimmten Elements oder einer bestimmten Aktion leicht zu identifizieren, bezieht/beziehen sich die höchstwertige Ziffer oder die höchstwertigen Ziffern in einem Bezugszeichen auf die Figurnummer, in der dieses Element zuerst eingeführt wird.

**Fig. 1** veranschaulicht eine Vektorsteuertechnik einer feldorientierten Steuerung (FOC), die zur Steuerung von Permanentmagnet-Synchronmotoren gemäß einer oder mehreren Ausführungsformen verwendet wird.

**Fig. 2** veranschaulicht ein System zur adaptiven Kompensation gemäß einer oder mehreren Ausführungsformen.

**Fig. 3** veranschaulicht eine Stromsteuerschleife gemäß einer oder mehreren Ausführungsformen.

**Fig. 4** veranschaulicht einen Stromtreiber gemäß einer oder mehreren Ausführungsformen.

**Fig. 5A** und **Fig. 5B** veranschaulichen Wellenformen, die der Motorsteuerung und genauer der Stromverfolgung zugeordnet sind, gemäß einer oder mehreren Ausführungsformen.

**Fig. 6** veranschaulicht ein Motorsteuersystem, das eine adaptive Kompensation gemäß einer oder mehreren Ausführungsformen implementiert.

**Fig. 7** veranschaulicht einen Motorsteuerprozess gemäß einer oder mehreren Ausführungsformen.

**Fig. 8** veranschaulicht einen Prozess zum Durchführen einer adaptiven Steuerschleife, um eine Fehlerfunktion zu minimieren.

**Fig. 9** veranschaulicht einen Prozess zum Bestimmen geschätzter Verstärkungen als Teil des Durchführens einer adaptiven Steuerschleife gemäß einer oder mehreren Ausführungsformen.

**Fig. 10** veranschaulicht einen PMSM gemäß dem Stand der Technik, wie er den Erfindern dieser Offenbarung bekannt ist.

#### ART(EN) ZUM AUSFÜHREN DER ERFINDUNG

**[0009]** In der folgenden detaillierten Beschreibung wird auf die beigefügten Zeichnungen Bezug genommen, die einen Teil hiervon bilden und in denen zur Veranschaulichung spezifische Beispiele von Ausführungsformen gezeigt sind, in denen die vorliegende Offenbarung ausgeführt werden kann. Diese Ausführungsformen werden ausreichend detailliert beschrieben, um es einem Durchschnittsfachmann zu ermöglichen, die vorliegende Offenbarung auszuführen. Es können jedoch auch andere hierin ermöglichte Ausführungsformen verwendet werden, und Änderungen der Struktur, des Materials und des Prozesses können vorgenommen werden, ohne vom Schutzzumfang der Offenbarung abzuweichen.

**[0010]** Die hierin dargestellten Veranschaulichungen sollen keine tatsächlichen Ansichten eines bestimmten Verfahrens oder Systems oder einer bestimmten Vorrichtung oder Struktur sein, sondern sind lediglich idealisierte Darstellungen, die zur Beschreibung der Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung verwendet werden. Ähnliche Strukturen oder Komponenten in den verschiedenen Zeichnungen können in einigen Fällen zur Vereinfachung für den Leser die gleiche oder eine ähnliche Nummerierung beibehalten; die Ähnlichkeit der Nummerierung bedeutet jedoch nicht notwendigerweise, dass die Strukturen oder Komponenten in Größe, Zusammensetzung, Konfiguration oder einer anderen Eigenschaft identisch sind.

**[0011]** Die folgende Beschreibung kann Beispiele einschließen, um es einem Durchschnittsfachmann zu ermöglichen, die offenbarten Ausführungsformen auszuführen. Die Verwendung der Begriffe „beispielhaft“, „als Beispiel“ und „zum Beispiel“ bedeutet, dass die zugehörige Beschreibung erläuternd ist, und während der Schutzzumfang der Offenbarung die Beispiele und ihre rechtlichen Äquivalente umschließen soll, ist die Verwendung solcher Begriffe nicht dazu bestimmt, den Schutzzumfang einer Ausführungsform oder dieser Offenbarung auf die spezifizierten Kom-

ponenten, Schritte, Merkmale, Funktionen oder dergleichen einzuschränken.

**[0012]** Es versteht sich, dass die Komponenten der Ausführungsformen, wie sie hierin allgemein beschrieben und in den Zeichnungen veranschaulicht sind, in einer großen Vielfalt unterschiedlicher Konfigurationen angeordnet und ausgelegt werden könnten. Somit soll die folgende Beschreibung verschiedener Ausführungsformen den Schutzzumfang der vorliegenden Offenbarung nicht einschränken, sondern ist lediglich repräsentativ für verschiedene Ausführungsformen. Während die verschiedenen Gesichtspunkte der Ausführungsformen in den Zeichnungen dargestellt sein können, sind die Zeichnungen nicht notwendigerweise maßstabsgetreu gezeichnet, sofern nicht ausdrücklich angegeben.

**[0013]** Des Weiteren sind die gezeigten und beschriebenen spezifischen Implementierungen nur Beispiele und sollten nicht als die einzige Möglichkeit zur Implementierung der vorliegenden Offenbarung ausgelegt werden, sofern hierin nicht anders angegeben. Elemente, Schaltungen und Funktionen können in Blockdiagrammform gezeigt sein, um die vorliegende Offenbarung nicht durch unnötige Details undeutlich werden zu lassen. Umgekehrt sind gezeigte und beschriebene spezifische Implementierungen nur beispielhaft und sollten nicht als die einzige Möglichkeit zur Implementierung der vorliegenden Offenbarung ausgelegt werden, sofern hierin nicht anders angegeben. Außerdem sind Blockdefinitionen und die Aufteilung von Logik zwischen verschiedenen Blöcken beispielhaft für eine spezifische Implementierung. Es ist für den Fachmann ohne Weiteres ersichtlich, dass die vorliegende Offenbarung durch zahlreiche andere Aufteilungslösungen ausgeführt werden kann. Details bezüglich Zeitüberlegungen und dergleichen wurden größtenteils weggelassen, wenn solche Details nicht notwendig sind, um ein vollständiges Verständnis der vorliegenden Offenbarung zu erhalten, und diese innerhalb der Fähigkeiten eines Durchschnittsfachmanns liegen.

**[0014]** Der Durchschnittsfachmann würde verstehen, dass Informationen und Signale unter Verwendung einer Vielfalt verschiedener Technologien und Techniken dargestellt werden können. Einige Zeichnungen können Signale zur Übersichtlichkeit der Darstellung und Beschreibung als ein einzelnes Signal veranschaulichen. Es ist für einen Durchschnittsfachmann ersichtlich, dass das Signal einen Bus von Signalen darstellen kann, wobei der Bus eine Vielfalt von Bitbreiten aufweisen kann und die vorliegende Offenbarung auf einer beliebigen Anzahl von Datensignalen, einschließlich eines einzelnen Datensignals, implementiert werden kann.

**[0015]** Die verschiedenen veranschaulichenden logischen Blöcke, Module und Schaltungen, die in Ver-

bindung mit den hierin offenbarten Ausführungsformen beschrieben sind, können mit einem Universalprozessor, einem Spezialprozessor, einem Digitalsignalprozessor (DSP), einer integrierten Schaltung (IC), einer anwendungsspezifischen integrierten Schaltung (ASIC), einer feldprogrammierbaren Gatteranordnung (FPGA) oder einer anderen programmierbaren Logikvorrichtung, einer diskreten Gatter- oder Transistorlogik, diskreten Hardwarekomponenten oder einer beliebigen Kombination davon, die zum Durchführen der hierin beschriebenen Funktionen ausgelegt sind, implementiert oder durchgeführt werden. Ein Universalprozessor (der hierin auch als Host-Prozessor oder einfach als Host bezeichnet werden kann) kann ein Mikroprozessor sein, alternativ kann der Prozessor jedoch ein beliebiger herkömmlicher Prozessor oder Zustandsautomat oder eine beliebige herkömmliche Steuerung oder Mikrosteuerung sein. Ein Prozessor kann auch als eine Kombination von Rechenvorrichtungen, wie eine Kombination aus einem DSP und einem Mikroprozessor, eine Vielzahl von Mikroprozessoren, ein oder mehrere Mikroprozessoren in Verbindung mit einem DSP-Kern oder eine beliebige andere derartige Konfiguration implementiert sein. Ein Universalcomputer, einschließlich eines Prozessors, wird als Spezialcomputer angesehen, während der Universalcomputer derart konfiguriert sein kann, dass er Rechenanweisungen (z. B. Softwarecode) ausführt, die sich auf Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung beziehen.

**[0016]** Die Ausführungsformen können in Bezug auf einen Prozess beschrieben sein, der als ein Flussdiagramm, ein Fließschema, ein Strukturdiagramm oder ein Blockdiagramm dargestellt ist. Obwohl ein Flussdiagramm Betriebsvorgänge als einen sequentiellen Prozess beschreiben kann, können viele dieser Vorgänge in einer anderen Sequenz, parallel oder im Wesentlichen gleichzeitig durchgeführt werden. Außerdem kann die Reihenfolge der Vorgänge neu angeordnet werden. Ein Prozess kann einem Verfahren, einem Thread, einer Funktion, einer Prozedur, einer Subroutine, einem Unterprogramm, einer anderen Struktur oder Kombinationen davon entsprechen. Des Weiteren können die hierin offenbarten Verfahren in Hardware, Software oder beidem implementiert werden. Bei Implementierung in Software können die Funktionen als eine oder mehrere Anweisungen oder ein Code auf computerlesbaren Medien gespeichert oder übertragen werden. Computerlesbare Medien schließen sowohl Computerspeichermedien als auch Kommunikationsmedien, einschließlich aller Medien, die die Übertragung eines Computerprogramms von einem Ort zu einem anderen unterstützen, ein.

**[0017]** Jede Bezugnahme auf ein Element hierin unter Verwendung einer Bezeichnung, wie „erste/r/s“, „zweite/r/s“ usw. schränkt die Menge oder Reihenfolge dieser Elemente nicht ein, es sei denn, eine

solche Einschränkung wird ausdrücklich angegeben. Vielmehr können diese Bezeichnungen hierin als ein zweckmäßiges Verfahren zum Unterscheiden zwischen zwei oder mehr Elementen oder Instanzen eines Elements verwendet werden. Ein Verweis auf ein erstes und ein zweites Element bedeutet also nicht, dass dort nur zwei Elemente eingesetzt werden dürfen oder dass das erste Element dem zweiten Element in irgendeiner Weise vorhergehen muss. Außerdem kann ein Satz von Elementen, sofern nicht anders angegeben, ein oder mehrere Elemente umfassen.

**[0018]** Wie hierin verwendet, bedeutet der Begriff „im Wesentlichen“ in Bezug auf einen gegebenen Parameter, eine Eigenschaft oder eine Bedingung und schließt in einem für den Durchschnittsfachmann verständlichen Ausmaß ein, dass der gegebene Parameter, die gegebene Eigenschaft oder die gegebene Bedingung mit einem geringen Maß an Varianz, wie zum Beispiel innerhalb annehmbarer Fertigungstoleranzen, erfüllt ist.

**[0019]** Beispielhaft kann in Abhängigkeit von dem bestimmten Parameter, der bestimmten Eigenschaft oder der bestimmten Bedingung, der bzw. die im Wesentlichen erfüllt ist, der Parameter, die Eigenschaft oder die Bedingung zu mindestens 90 % erfüllt, zu mindestens 95 % erfüllt oder sogar zu mindestens 99 % erfüllt sein.

**[0020]** Für FOC werden manchmal Proportional-Integral-Steuerungen (PI-Steuerungen) verwendet. Allgemein gesagt empfangen PI-Steuerungen als Eingabe ein Fehlersignal und erzeugen ein aus einer P-Aktion und einer I-Aktion zusammengesetztes Steueraktionssignal (hierin auch als I-Verstärkung,  $G_I$ , bezeichnet).

**[0021]** Im Fall von FOC verwendet eine PI-Steuerung, die eine PI-Steuerschleife implementiert, den Stromfehler  $i^-$  als Eingabe (wobei  $i^-$  die Differenz zwischen einem Sollstrom  $i_q^{ref}$  und einem beobachteten Strom  $i$  ist) und gibt eine Spannungsreferenz  $u_q^{ref}$  - die Steueraktion - aus, die voraussichtlich einen Statorsollstrom erreicht. Da der Statorstrom in d-Achsen- und q-Achsen-Komponenten zerlegt werden kann, können separate PI-Steuerungen für die  $i_q$ -Komponente und die  $i_d$ -Komponente verwendet werden.

**[0022]** Betrachtet man nur die q-Achsen-Komponente, versucht eine PI-Steuerung, einen Fehler zu mini-

mieren, indem sie eine q-Achsen-Spannung  $u_q^{ref}$  findet, die den q-Achsen-Sollstrom  $i_q^{ref}$  erreicht. Eine Beziehung zwischen  $u_q^{ref}$  und  $i_q^{ref}$  ist in Gleichung 1 definiert:

$$u_q^{ref} = L_q \cdot \frac{d}{dt} i_q^{ref} + R i_q^{ref} + \omega (L_d i_d + \psi_f)$$

Gleichung 1

**[0023]** Wobei  $L_q$  die q-Achsen-Induktivität darstellt,  $L_d$  die d-Achsen-Induktivität darstellt,  $R$  den Phasenwiderstand darstellt,  $\psi_f$  den Rotorfluss darstellt und  $\omega$  die Motorwinkelgeschwindigkeit darstellt. Eine Steueraktion einer PI-Steuerung kann durch Gleichung 2 definiert werden:

$$u_q^{PI} = G_P \tilde{i}_q + G_I \int \tilde{i}_q dt$$

Gleichung 2

**[0024]** Wobei  $G_P$  und  $G_I$  Verstärkungen aus dem Durchführen von P-Steueraktionen bzw. I-Steueraktionen sind.

**[0025]** Kleine Störungen (z. B. Vibrationen, Ausrüstungsverschleiß, ohne darauf beschränkt zu sein) können aus dem Betrieb von PMSMs und allgemeiner Servomotoren resultieren, und ein Grad solcher Störungen kann eine Steuerschleife beeinflussen, die für FOC verwendet wird. Kompensatoren werden manchmal verwendet, um die Belastung einer PI-Steuerung durch Abstimmen der Steuersystemleistung zu verringern, um Systemdynamik Rechnung zu tragen. Im Fall von FOC für einen PMSM kann eine Kompensation zu einer q-Achsen-Steuer-

spannung  $u_q^{ref}$  hinzugefügt werden, wie durch Gleichung 3 definiert:

$$u_q^{ref} = u_q^{comp} + u_q^{PI}$$

Gleichung 3

**[0026]** Eine Kompensationskomponente einer Spannungsreferenz  $u_q^{comp}$  kann durch Gleichung 4 definiert werden:

$$u_q^{comp} = \frac{L_q d}{dt} i_q^{ref} + R i_q^{ref} + \omega (L_d i_d + \psi_f)$$

Gleichung 4

**[0027]** Es ist anzumerken, dass eine Kompensation nach Gleichung 4 mehrere Systemparameter beinhaltet, um ein Kompensationssignal zu erzeugen, das, ohne darauf beschränkt zu sein, eine q-Achsen-Induktivität ( $L_q$ ), einen Phasenwiderstand ( $R$ ) und einen Rotorfluss ( $\psi_f$ ) einschließt.

**[0028]** Gleichung 4 ist eine ideale Darstellung des Betriebs eines PMSM. Die Erfinder dieser Offenbarung verstehen nun, dass es in der Praxis nicht einfach ist, solche Systemparameter genau zu bestimmen. Darüber hinaus verbessert Gleichung 4 nicht notwendigerweise die Stromverfolgungsleistung ei-

ner Steuerung und kann sogar die Stromverfolgungsleistung schwächen, wenn ein ungenauer Systemparameter verwendet wird.

**[0029]** Als nicht einschränkendes Beispiel kann ein Grad, in dem Systemparameterwerte Gesichtspunkte eines Stromverfolgungsprozesses für einen PMSM genau darstellen, im Laufe der Zeit aufgrund vorstehend genannter Störungen abnehmen. Und wie vorstehend erwähnt, ist das Neuberechnen von Systemparametern, wie Induktivität, Phasenwiderstand und Rotorfluss, rechenintensiv, und solche Berechnungen sind anfällig für Ungenauigkeiten, die einen Prozess instabil machen können.

**[0030]** Herkömmliche Techniken, die den Erfindern dieser Offenbarung bekannt sind, können auf einem oder mehreren von einer Kreuzelementkompensation zwischen direkter Achse und Quadraturachse, der Verwendung einer großen PI-Aktion zum Erhöhen der Steuerbandbreite und/oder einer hohen Impulsweitenmodulationsfrequenz und/oder einem sofortigen Aktualisieren eines PWM-Arbeitszyklus zum Erhöhen der Steuerbandbreite beruhen. Solche Techniken bringen unerwünschte Kompromisse, wie Tiefpassfiltermerkmale einer Stromschleife, geschwächte Stabilität und höheres Rauschen, Leistungsverlust und erhöhte Komponentenkosten und -komplexität, ohne darauf beschränkt zu sein. Daher wird ein Verbessern der Stromverfolgung und allgemeiner der Motorstromsteuerleistung im Fall von FOC von PMSMs häufig zugunsten eines Verbesserns der Bewegungssteuerleistung ignoriert.

**[0031]** Die Erfinder dieser Offenbarung erkennen, dass die Stromverfolgung für FOC von PMSMs verbessert werden kann, indem Systemparameter des PMSM geschätzt werden und einer PI-Steuerung eine vollständige Kompensation auferlegt wird, um die Belastung (z. B. Rechenlast, ohne darauf beschränkt zu sein) zu reduzieren.

**[0032]** Wie hierin verwendet, bedeutet „drehen“, dass mindestens eine Teildrehung um eine Achse durchgeführt wird. Als nicht einschränkende Beispiele kann sich ein physischer Körper (z. B. eine Welle oder ein Rotor, ohne darauf beschränkt zu sein) um eine Achse drehen und kann sich eine Kraft (z. B. ein Magnetfeld, ohne darauf beschränkt zu sein) um eine Achse drehen.

**[0033]** Fig. 1 zeigt eine FOC-Schleife **100**, die einen Stromverfolgungsprozess gemäß einer oder mehreren Ausführungsformen implementiert. Die FOC-Schleife **100** schließt einen d-Aktionsblock 102 und einen q-Aktionsblock 104 ein. Hier wird nur der q-Aktionsblock 104 erörtert, weil der Idealstrom für die direkte Komponente des d-Aktionsblocks 102 allgemein als null verstanden wird.

**[0034]** Bezug nehmend auf den q-Aktionsblock 104, wie in Fig. 1 gezeigt, versucht der q-Aktionsblock 104, eine Fehlerfunktion zu reduzieren, indem er fehlerfunktionsreduzierende Steueraktionen bestimmt. Die PI-Steuerung **112** gibt als Reaktion auf einen Fehler **114** eine erste Steueraktion **126** aus, die in Fig. 1 als Differenz zwischen  $i_q^{ref}$  und  $i_q$  bezeichnet wird. Eine adaptive Kompensationskomponente **122**, die durch einen adaptiven Kompensator **106** bereitgestellt wird, und eine Kreuzkompensationskomponente **120**, die durch einen Kreuzkompensator **118** bereitgestellt wird, werden auf die erste Steueraktion **126** angewendet, um eine zweite Steueraktion **116** zu erhalten, die in Fig. 1 als  $u_q^{ref}$  bezeichnet wird.

**[0035]** Der adaptive Kompensator **106** schließt einen Kompensator **110** und einen Schätzer **108** ein. Wie hierin erörtert, kann der Schätzer **108** konfiguriert sein, um präzise Informationen über Motorparameter (z. B. q-Achsen-Induktivität, einen Phasenwiderstand und einen Rotorfluss, ohne darauf beschränkt zu sein) bereitzustellen. Durch Verwendung präziser Informationen über Motorparameter ist die Ausgabe des Kompensators **110** (d. h. eine Kompensations-

komponente einer Steuerspannung  $u_q^{comp}$ ) korrekter (z. B. in Bezug auf Fälle, in denen weniger präzise Informationen über Motorparameter durch den Kompensator **110** verwendet werden), und somit kann der Kompensator **110** eine PI-Steuerung entlasten und mindestens einige Nachteile des Verwendens einer PI-Steuerungen mit PMSM-Motoren und Servomotoren können verringert werden.

**[0036]** Als nicht einschränkendes Beispiel wird in den meisten Fällen eine ursprüngliche q-Achsen-Induktivität und ein ursprünglicher Widerstand eines Motors sehr klein sein, weshalb eine parasitäre Induktivität und ein parasitärer Widerstand des Systems die tatsächliche q-Achsen-Induktivität und den tatsächlichen Widerstand des Motors verglichen mit der ursprünglichen q-Achsen-Induktivität und dem ursprünglichen Widerstand des Motors drastisch ändern. In dieser Situation ist ein Kompensator **110** allein nicht in der Lage, eine korrekte Ausgabe bereitzustellen, sodass der Kompensator **110** nichts kompensiert und die Leistung eines Steuersystems, in das er integriert ist, beeinträchtigen kann. Als ein weiteres nicht einschränkendes Beispiel variieren q-Achsen-Induktivität, Widerstand und Rotorfluss eines Motors mit der Temperatur. Selbst wenn der Kompensator **110** allein eine korrekte Ausgabe bereitstellt, wenn ein Motor zu laufen beginnt, wird, während der Motor weiter läuft, die Ausgabe des Kompensators **110** immer inkorrekt (d. h., eine Differenz zwischen einer korrekten Ausgabe und einer tatsächlichen Ausgabe wird zunehmen), wenn die Temperatur zunimmt.

**[0037]** Der Schätzer **108** kann allgemein konfiguriert sein, um adaptive Steuertechniken zum Schätzen von Systemparametern **124** zu implementieren. Insbesondere liefert der Schätzer **108** präzise Informationen über Motorparameter, um den Kompensator **110** zu unterstützen - z. B. ist die Ausgabe des Kompensators **110** korrekter verglichen mit dem allein arbeitenden Kompensator **110** ohne die Unterstützung des Schätzers **108**. Ferner kann die Leistung des Kompensators **110** mit Unterstützung des Schätzers **108** die PI-Steuerung **112** entlasten.

**[0038]** Adaptive Steuertechniken sind Techniken zum Anpassen einer zugrundeliegenden Steuerstrategie für einen Prozess, um als nicht einschränkenendes Beispiel die Dynamik des Prozesses anzupassen. Das Anpassen einer zugrundeliegenden Steuerstrategie unterscheidet sich von einer allgemeineren Steuerung eines Prozesses, der das Anpassen einer Ausgabe als Reaktion auf eine Änderung des Fehlers zwischen einem Sollparameter und einem beobachteten Parameter einbezieht. Die adaptive Steuerung kann in Verbindung mit und/oder zum Verbessern einer solchen allgemeineren Steuerung verwendet werden.

**[0039]** Als nicht einschränkende Beispiele können adaptive Steuertechniken ein Abstimmen von Eingangsparametern auf ein Steuergesetz oder ein Modifizieren von Ausdrücken davon - und in jedem Fall als Reaktion auf Änderungen eines Verhaltens eines Prozesses - einschließen. Es ist anzumerken, dass nichtadaptive Steuerungen, wie eine PI-Steuerung oder eine PID-Steuerung, instabil werden können, wenn Nichtübereinstimmungen zwischen einem Prozess und der ursprünglichen Abstimmung der Steuerung zu stark werden. Instabilität kann durch Stoppen eines Prozesses und Abstimmen/Neuabstimmen einer nichtadaptiven Steuerung und allgemeiner der nichtadaptiven Steuerschleife auf den Prozess korrigiert werden. Im Gegensatz dazu kann gemäß einer oder mehreren Ausführungsformen eine Steuerung und/oder Steuerschleife, die adaptive Steuertechniken implementiert, eine zugrundeliegende Steuerstrategie anpassen, während ein Prozess durchgeführt wird.

**[0040]** Fig. 2 zeigt eine Ausführungsform eines adaptiven Kompensators **200** (wie des adaptiven Kompensators **106**, ohne darauf beschränkt zu sein) zur Steuerung eines Stromverfolgungsprozesses gemäß einer oder mehreren Ausführungsformen. In der in Fig. 2 gezeigten Ausführungsform schließt Schätzer, die einen Kompensator **202** unterstützen, eine Anzahl von Schätzern (in Fig. 2 Schätzer **204**, **206** und **208**) ein, wobei jeder solche Schätzer konfiguriert ist, um einen Systemparameter zu berechnen.

**[0041]** Der Kompensator **202** kann allgemein konfiguriert sein, um eine adaptive Kompensationskom-

ponente **212**, bezeichnet als  $u_q^{comp}$ , unter Verwendung von Gleichung 4 (hier ein Steuergesetz) zu berechnen, vorausgesetzt, dass geschätzte Parameter anstelle von q-Achsen-Induktivität ( $L_q$ ), Phasenwiderstand ( $R$ ) und Rotorfluss ( $\psi_f$ ), nämlich,  $\hat{L}_q$ ,  $R$  und  $\hat{\psi}_f$ , verwendet werden. Die geschätzten Parameter werden durch einen oder mehrere Schätzer bereitgestellt, wie nachstehend erörtert. Die durch den Kompensator **202** verwendete Gleichung wird hierin als Gleichung 4' (hier ein modifiziertes Steuergesetz) bezeichnet, weil geschätzte Systemparameter  $\hat{L}_q$ ,  $R$  und  $\hat{\psi}_f$  anstelle von  $L_q$ ,  $R$  und  $\psi_f$  verwendet werden:

$$u_q^{comp} = \hat{L}_q \frac{d}{dt} i_q^{ref} + \hat{R} i_q^{ref} + \omega \hat{\psi}_f$$

Gleichung 4'

**[0042]** In Gleichung 4' ist die erste Teilkomponente eine Induktivitätskomponente, die definiert ist durch

den Ausdruck:  $\hat{L}_q \frac{d}{dt} i_q^{ref}$ . Die digitale Berechnung

des Ausdrucks  $\frac{d}{dt} i_q^{ref}$  kann viel Rauschen einführen.

Optional kann zum Adressieren des Rauschens in einigen Ausführungsformen ein Schätzer verwendet werden (z. B. zusätzlich oder alternativ zu einem oder mehreren der Schätzer **204**, **206** und **208**), um

$\frac{d}{dt} i_q^{ref}$  unter Verwendung einer Näherung zu berechnen, wie in Gleichung 5 definiert:

$$\frac{d}{dt} i_q^{ref} = \left( J \frac{d}{dt} a^{ref} + \frac{d}{dt} T_l \right) \cdot \frac{1}{K_t}$$

Gleichung 5

**[0043]** Wobei  $J$  eine Rotorträgheit ist,  $a^{ref}$  eine Sollbeschleunigung ist,  $K_t$  ein Motordrehmomentkoeffizient ist und  $T_l$  ein Lastdrehmoment ist. Gleichung 5 ist

eine Näherung von  $\frac{d}{dt} i_q^{ref}$ , die ein kinetisches Gesetz

verwendet, um  $\frac{d}{dt} i_q^{ref}$  zu berechnen, und Rauschen reduziert, das durch eine digitale Berechnung eingeführt wird.

**[0044]** Die zweite Komponente ist eine Phasenwiderstandskomponente, die definiert ist durch den

Ausdruck:  $\hat{R} i_q^{ref}$ .

**[0045]** Die dritte Komponente ist eine Flusskomponente, die definiert ist durch den Ausdruck:  $\omega \hat{\psi}_f$ .

**[0046]** Mindestens drei Parameter **210** werden durch den Kompensator **202** verwendet,  $\hat{L}_q$ ,  $R$  und

$\hat{\psi}_f$ , wobei die jeweiligen Großbuchstaben bedeuten, dass es sich um geschätzte Systemparameter handelt. Drei Schätzer unterstützen den Kompensator **202** beim Berechnen des Beitrags jeder der drei Komponenten zu der adaptiven Kompensationskomponente **212**.

**[0047]** Der Induktivitätsschätzer **204** kann konfiguriert sein, um einen Induktivitätsparameter,  $\hat{L}_q$ , zu schätzen, der durch den Kompensator **202** verwendet wird. Der Widerstandsschätzer **206** kann konfiguriert sein, um einen Phasenwiderstandsparameter,  $R$ , zu schätzen, der durch den Kompensator **202** verwendet wird. Der Flusschätzer **208** kann konfiguriert sein, um einen Rotorflussparameter,  $\hat{\psi}_f$  zu schätzen, der durch den Kompensator **202** verwendet wird.

**[0048]** In einer Ausführungsform kann der Induktivitätsschätzer **204** konfiguriert sein, um einen geschätzten q-Achsen-Induktivitäts-Parameter gemäß Gleichung 6 zu bestimmen:

$$\hat{L}_q = P_1 \int \tilde{i}_q \cdot \frac{d}{dt} i_q^{ref} dt + \hat{L}_0 \quad \text{Gleichung 6}$$

**[0049]** In einer Ausführungsform kann der Widerstandsschätzer **206** konfiguriert sein, um einen geschätzten Phasenwiderstandsparameter gemäß Gleichung 7 zu bestimmen:

$$\hat{R} = P_2 \int \tilde{i}_q \cdot i_q^{ref} dt + \hat{R}_0 \quad \text{Gleichung 7}$$

**[0050]** In einer Ausführungsform kann der Induktivitätsflusschätzer **208** konfiguriert sein, um einen geschätzten Phasenwiderstandsparameter gemäß Gleichung 8 zu bestimmen:

$$\hat{\psi}_f = P_3 \int \tilde{i}_q \omega dt + \hat{\psi}_{f0} \quad \text{Gleichung 8}$$

**[0051]** In den Gleichungen 6, 7 und 8 sind  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  geschätzte Verstärkungen aus Steueraktionen einer Steuerung und allgemeiner einer Steuererschleife, und die Parameter  $\hat{L}_0$ ,  $\hat{R}_0$  und  $\hat{\psi}_{f0}$  sind anfängliche Schätzwerte für  $L_q$ ,  $R$  bzw.  $\psi_f$ . Jede geeignete Technik, die dem Durchschnittsfachmann bekannt ist, kann verwendet werden, um die Verstärkungen aus geschätzten Steueraktionen **P1**, **P2** und **P3** zu bestimmen.

**[0052]** Als nicht einschränkendes Beispiel können Abstimmungstechniken verwendet werden, um allgemein ausgedrückt wiederholt bei einem geschätzten Wert zu schätzen und zu prüfen, bis eine zufriedenstellende Leistung erreicht ist. Als ein weiteres nicht einschränkendes Beispiel eines Algorithmus zum Bestimmen geschätzter Verstärkungen aus Steueraktionen **P1**, **P2** und **P3**: anfängliche beliebige Werte für

die geschätzten Verstärkungen aus Steueraktionen können verwendet werden, und eine Wellenform, die  $L_q$ ,  $R$  und  $\psi_f$  entspricht (d. h. Wellenformen entsprechend Gleichung 6, Gleichung 7 bzw. Gleichung 8) können erzeugt und beobachtet werden, um zu bestimmen, wie schnell ein geschätzter Wert stabil wird (d. h. eine beobachtete Stabilisierungsperiode). Eine Stabilisierungsperiode kann mit einem spezifizierten Schwellenwert verglichen werden. Wenn eine beobachtete Stabilisierungsperiode zu lang ist (d. h., eine beobachtete Stabilisierungsperiode länger als ein spezifizierter Schwellenwert ist), kann eine geschätzte Verstärkung aus einer Steueraktion erhöht werden. Wenn eine beobachtete Stabilisierungsperiode zu kurz ist (d. h., eine beobachtete Stabilisierungsperiode kürzer als ein spezifizierter Schwellenwert ist), kann die geschätzte Verstärkung aus einer Steueraktion verringert werden. In einer anderen Ausführungsform kann alternativ oder zusätzlich zu einem beliebigen Wert ein durch einen Motorlieferanten bereitgestellter Nennwert (d. h. ein vorbestimmter Wert) verwendet werden.

**[0053]** Fig. 3 zeigt ein Blockdiagramm einer Motorstromsteuerschleife **300** gemäß einer oder mehreren Ausführungsformen. Wie dargestellt, kann die Motorstromsteuerschleife **300** einen Clarke-Transformator **310**, einen Park-Transformator **312**, eine PI-Steuerung **306**, eine adaptive Steuerung **308**, einen inversen Clarke- und Park-Transformator **302** und einen PWM-Erzeuger **304** einschließen.

**[0054]** Der Clarke-Transformator **310** kann konfiguriert sein, um dreiphasige Größen ( $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ ) von einem dreiphasigen Referenzrahmen in eine zweiachsige, orthogonale stationäre Referenz als Reaktion auf gemessene  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  und quadraturcodierte Impulse zu übersetzen. Als Eingaben sind nur die gemessene  $i_a$  und die gemessene  $i_b$  gezeigt, weil  $i_c$  aus  $i_a$  und  $i_b$  unter Verwendung von dem Durchschnittsfachmann bekannten Techniken bestimmt werden kann, obwohl auch eine gemessene  $i_c$  empfangen und verwendet werden kann. Da sich ein Rotorreferenzrahmen ständig dreht, werden die durch den Clarke-Transformator **310** ausgegebenen Größen, die sich in einem zweiachsigen orthogonalen Referenzrahmen befinden, durch den Park-Transformator **312** in den orthogonalen Referenzrahmen, der aus der d-Achse und q-Achse besteht, übersetzt. Verschiedene Größen in einem (q, d)-Referenzrahmen können durch den Park-Transformator **312** ausgegeben werden, einschließlich, ohne darauf beschränkt zu sein,  $i_q$ ,  $i_d$ ,  $w_q$  und  $w_d$  - aber nur  $i_q$  und  $i_d$  sind in Fig. 3 für die Motorstromsteuerschleife **300** gezeigt.

**[0055]** Die PI-Steuerung **306** und die adaptive Steuerung **308** können konfiguriert sein, um d- und q-Steuerspannungen  $u_d$  bzw.  $u_q$  auszugeben. Insbesondere kann die adaptive Steuerung **308** konfiguriert sein, um eine q-Achsen-Steuerspannung  $u_q$  ge-

mäß der FOC-Schleife **100** und dem adaptiven Kompensator **200**, wie hierin erörtert, als Reaktion auf den q-Achsen-Motorstrom-Fehler  $\tilde{i}_q$ , der die Differenz zwischen dem q-Achsen-Sollstrom (z.B.  $i_q^{ref}$ ) und einem beobachteten q-Achsen-Strom  $i_q$  ist, die aus den gemessenen Strömen  $i_a$  und  $i_b$  und dem berechneten Strom  $i_c$  berechnet wird, zu erzeugen. Die PI-Steuerung **306** kann konfiguriert sein, um die d-Achsen-Steuerspannung  $u_d$  als Reaktion auf den q-Achsen-Motorstrom-Fehler  $\tilde{i}_q$  auszugeben, der die Differenz zwischen null und einem beobachteten d-Achsen-Strom  $i_d$  ist, die aus den gemessenen Strömen  $i_a$  und  $i_b$  und dem berechneten Strom  $i_c$  berechnet wird.

**[0056]** Der inverse Clarke- und Park-Transformator **302** kann konfiguriert sein, um die referenzierten d-Achsen- und q-Achsen-Spannungen  $u_d$ ,  $u_q$ , die durch die PI-Steuerung **306** bzw. die adaptive Steuerung **308** ausgegeben werden, in einen Dreiphasen-Referenzrahmen als  $u_a$ ,  $u_b$  und  $u_c$  umzuwandeln.

**[0057]** Der PWM-Erzeuger **304** kann konfiguriert sein, um Arbeitszyklen von impulsweitenmodulierten Spannungen (PWM-Spannungen)  $DC_a$ ,  $DC_b$  und  $DC_c$  als Reaktion auf  $u_a$ ,  $u_b$  bzw.  $u_c$  bereitzustellen, und die PWM-Spannungen  $DC_a$ ,  $DC_b$  und  $DC_c$  können einem PMSM bereitgestellt werden, der mit einem Ausgang des PWM-Erzeugers **304** wirkgekoppelt ist.

**[0058]** Fig. 4 zeigt ein PMSM-Ansteuersystem **400** gemäß einer oder mehreren Ausführungsformen. Das PMSM-Ansteuersystem **400** implementiert neben anderen Steuerschleifen eine Motorstromsteuerschleife zum Steuern von Motorströmen eines Motors, der ein Permanentmagnet-Synchronmotor (z. B. PMSM **410**, ohne darauf beschränkt zu sein) konfiguriert ist, wie die Motorstromsteuerschleife **300** von Fig. 3, ohne darauf beschränkt zu sein, gemäß einer oder mehreren Ausführungsformen.

**[0059]** Das PMSM-Ansteuersystem **400** kann konfiguriert sein, um eine Wellenform eines Motorstroms des PMSM **410** zu einer Wellenform zu verfolgen, die durch ein Stromprofil **416** definiert ist. Im Einklang mit der allgemeinen Verwendung von Singular- und Pluralbegriffen in dieser Beschreibung, soll, während eine Singularform der Begriffe „Spannung“, „Wellenform“, „Strom“ und „Profil“ unter Bezugnahme auf Fig. 4 bis Fig. 9 verwendet werden kann, eine solche Beschreibung Singular und Plural, z. B. „Spannung“, „Spannungen“, „Wellenform“, „Wellenformen“, „Strom“, „Ströme“, „Profil“, „Profile“ und Signale davon einbeziehen. Eine solche Beschreibung steht als nicht einschränkendes Beispiel mit Fig. 3 dieser Offenbarung im Einklang, die mehrere PWM-Spannungen (z. B.  $DC_a$ ,  $DC_b$  und  $DC_c$ ) zum Steuern mehrerer

Motorströme (z. B.  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ ) eines PMSM und ein System zum Formen der Wellenformen solcher Motorströme basierend auf Sollwellenformen für Motorströme zeigt.

**[0060]** Wie in Fig. 4 gezeigt, kann das PMSM-Ansteuersystem **400** einen Bewegungsprofilerzeuger **404**, eine Bewegungssteuerung **406** und eine Stromsteuerung **408** einschließen, die wirkgekoppelt sein können, um den Motortreiber **402** zum Ansteuern des PMSM **410** zu umfassen. In einem in Betracht gezogenen Anwendungsfall kann der Motortreiber **402** in einer Mikrosteuerung implementiert sein und diese kann als Hauptzuständigkeit zum allgemeineren Implementieren des Motortreibers **402** und des PMSM-Ansteuersystems **400** konfiguriert sein. In einem anderen in Betracht gezogenen Anwendungsfall kann der Motortreiber **402** in einer Mikrosteuerung implementiert sein, die den Motortreiber **402** und andere Steuerelemente (wie eine Prozesssteuerung **602** von Fig. 6, ohne darauf beschränkt zu sein) einschließt.

**[0061]** Der Bewegungsprofilerzeuger **404** kann allgemein konfiguriert sein, um ein oder mehrere S-Kurven-Bewegungsprofile zu erzeugen, die Sollbewegungszustände eines PMSM im Laufe der Zeit als Reaktion auf eine Sollposition/-drehzahl **412** definieren. Als nicht einschränkendes Beispiel definiert ein durch den Bewegungsprofilerzeuger **404** erzeugtes Bewegungsprofil eine Position und eine Drehzahl eines PMSM zu einem gegebenen Zeitpunkt über einen Zeitraum. Im Fall einer s-Kurve sind Wellenformen eines Bewegungsprofils, das durch den Bewegungsprofilerzeuger **404** erzeugt wird, glatt (d. h. differenzierbar), und eine Periode der Wellenform ist im Wesentlichen in der Form eines „s“. Als nicht einschränkende Beispiele kann der Bewegungsprofilerzeuger **404** konfiguriert sein, um Bewegungsprofile unter Verwendung symmetrischer Referenzen, asymmetrischer Referenzen und Kombinationen davon zu erzeugen. Bewegungsprofile entsprechen der Sollposition/-drehzahl. Ein Bewegungsprofil **414**, das der Sollposition/-drehzahl **412** entspricht, wird durch den Bewegungsprofilerzeuger **404** ausgewählt und der Bewegungssteuerung **406** bereitgestellt.

**[0062]** Die Bewegungssteuerung **406** kann allgemein konfiguriert sein, um eine Steuerschleife durchzuführen, die ein Bereitstellen eines Stromprofils **416** einbezieht, das voraussichtlich zu einer Bewegung des PMSM **410** (z. B. Drehung, ohne darauf beschränkt zu sein) im Wesentlichen gemäß dem Bewegungsprofil **414** führt. Als Teil einer solchen Steuerschleife empfängt die Bewegungssteuerung **406** eine Motorbewegungsrückkopplung **420**, die eine Bewegung des PMSM **410** (z. B. Drehzahl, Position, Drehmoment, Drehwinkel, ohne darauf beschränkt zu sein) angibt, und versucht, den Bewegungsfehler durch Anpassen (z. B. Hinzufügen, Ändern, Lösen) eines oder mehrerer Merkmale des Strom-

profils **416** zu reduzieren, wodurch ein aktualisiertes Stromprofil **416** erhalten wird. In einer oder mehreren Ausführungsformen kann die Bewegungssteuerung **406** eine oder mehrere Komponentenbewegungssteuerungen einschließen, einschließlich, ohne darauf beschränkt zu sein, einer Positionssteuerung, einer Geschwindigkeitssteuerung und/oder einer Drehmomentsteuerung, und jede solche Komponentensteuerung kann auch eine oder mehrere Steuerschleifen implementieren.

**[0063]** Das Stromprofil **416** kann neben anderen Informationen eine Sollwellenform der Motorstromrückkopplung **422** einschließen. Die Stromsteuerung **408** kann allgemein konfiguriert sein, um eine Motorstromsteuerschleife (z. B. die Motorstromsteuerschleife **300** von **Fig. 3**, ohne Imitation) durchzuführen, die ein Bereitstellen von Steuerspannungen **418** einbezieht, die voraussichtlich zu Motorströmen bei dem PMSM **410** führen, die das Stromprofil **416** verfolgen.

**[0064]** Wie hierin erörtert, ist es wünschenswert, dass eine Wellenform eines Motorstroms mit einer Sollwellenform des Stromprofils **416** übereinstimmt. Deshalb empfängt die Stromsteuerung **408** als Teil einer Motorstromsteuerschleife eine Motorstromrückkopplung **422**, die einen oder mehrere Motorströme bei dem PMSM **410** angibt. Die Stromsteuerung **408** kann versuchen, den Stromfehler (der hierin auch als „Verfolgungsfehler“ gekennzeichnet sein kann) durch Anpassen der Steuerspannungen **418**, wie hierin beschrieben, zu reduzieren, d. h. durch Anpassen von Merkmalen, die eine Wellenform von  $DC_a$ ,  $DC_b$  und/oder  $DC_c$  aufweist, die durch den PWM-Erzeuger **304** von **Fig. 3** erzeugt wird. Auf diese Weise kann die Stromsteuerung **408** konfiguriert sein, um die Verfolgung von Motorströmen des PMSM **410** zu dem Stromprofil **416**, das durch die Bewegungssteuerung **406** bereitgestellt wird, zu steuern.

**[0065]** Obwohl in **Fig. 4** nicht gezeigt, kann das PMSM-Ansteuersystem **400** eine Inverterschaltung einschließen, die zum Umwandeln der durch einen PWM-Erzeuger der Stromsteuerung **408** (z. B. den PWM-Erzeuger **304** von **Fig. 3**) ausgegebenen DC-Spannungen in entsprechende AC-Spannungen, die eine Sollimpulsweite und -impulsfrequenz aufweisen, ohne darauf beschränkt zu sein, konfiguriert ist.

**[0066]** Es ist anzumerken, dass die Stromsteuerung **408** während des Durchführens eines Zyklus einer Motorstromsteuerschleife ein Stromprofil **416** eines vorherigen Zyklus verwenden kann oder ein Stromprofil **416**, das seit einem vorherigen Zyklus durch die Bewegungssteuerung **406** aktualisiert wurde, verwenden kann. Deshalb kann der Verfolgungsfehler daraus resultieren, dass Steuerspannungen nicht vollständig abgestimmt werden, sodass die Motorströme dem Stromprofil **416** folgen, kann aus einer

Anpassung an das Stromprofil **416** durch die Bewegungssteuerung **406** resultieren und einer Kombination davon, ohne darauf beschränkt zu sein.

**[0067]** **Fig. 5A** und **Fig. 5B** sind Signaldiagramme, die Wellenformen veranschaulichen, die der Motorsteuerung und genauer der Stromverfolgung zugeordnet sind. **Fig. 5A** und **Fig. 5B** stellen Beispiele von Wellenformen für einen Sollstrom, einen Rückkopplungsstrom, eine Sollgeschwindigkeit, eine Rückkopplungsgeschwindigkeit, eine Sollposition und eine Rückkopplungsposition dar, die erzeugt werden, während ein Motorsteuerprozess durchgeführt wird, und genauer, während ein Stromverfolgungsprozess **500** gemäß einer oder mehreren Ausführungsformen durchgeführt wird. Als nicht einschränkende Beispiele kann ein solcher Motorsteuerprozess/Stromverfolgungsprozess durch das PMSM-Ansteuersystem **400** oder genauer eine Motorstromsteuerschleife **300** zum Erzeugen einer oder mehrerer der Steuerspannungen  $DC_a$ ,  $DC_b$  oder  $DC_c$  durchgeführt werden. **Fig. 5B** stellt den in **Fig. 5A** dargestellten Sollstrom und Rückkopplungsstrom dar, ohne jedoch durch Darstellungen anderer Wellenformen verdeckt zu werden.

**[0068]** Wie in **Fig. 5B** dargestellt, verfolgt der Stromverfolgungsprozess **500** ein Sollstromprofil **504** (z.

B.  $i_q^{ref}$ ) mit einem gemessenen Motorstrom **502** (z. B.  $i_q$ , bereitgestellt mit der Motorstromrückkopplung **422**). Es ist anzumerken, dass die Wellenform **502** des gemessenen Motorstroms eine Wellenform **504** eines Sollstromprofils verfolgt.

**[0069]** **Fig. 6** zeigt ein gesteuertes Motorsystem **600** für geschwindigkeitsvektorgesteuerte PWM für FOC-PMSMs gemäß einer oder mehreren Ausführungsformen.

**[0070]** Wie in **Fig. 6** gezeigt, kann eine Prozesssteuerung **602** konfiguriert sein, um eine Sollposition/-drehzahl **618** gemäß einer Sollposition und/oder -drehzahl eines PMSM **608** und/oder Ausrüstung, die mechanisch durch den PMSM **608** gesteuert wird, bereitzustellen.

**[0071]** Ein Treiber **604** (z. B. ein Motortreiber **402** von **Fig. 4**, ohne darauf beschränkt zu sein) kann als Reaktion auf die Sollposition/-drehzahl **618** konfiguriert sein, um der PMSM **608** eine Motorsteuerung **606** bereitzustellen. Die Motorsteuerung **606** kann, ohne darauf beschränkt zu sein, PWM-Spannungen (einschließlich, ohne darauf beschränkt zu sein, einer Reihe von PWM-Spannungen, die als Teil einer Anzahl von Zyklen einer Steuerschleife bereitgestellt werden) einschließen, die voraussichtlich zu einer Drehung des PMSM **608** in die Position und mit der Drehzahl führen, die in der Sollposition/-drehzahl **618** spezifiziert sind.

**[0072]** Der Drehsensor **610** erfasst Bewegungsinformationen über den PMSM **608** (z. B. Positions-/Drehzahlinformationen **612**, ohne darauf beschränkt zu sein) und sendet sie an den Treiber **604** zum Anpassen der Motorsteuerung **606**, um die Sollposition/-drehzahl **618** einzuhalten.

**[0073]** Darüber hinaus erfasst ein Stromsensor **614** Motorstrominformationen **616** über Motorströme bei dem PMSM **608** und führt die Motorstrominformationen **616** dem Treiber **604** zu. Der Treiber **604** vergleicht die Motorstrominformationen **616** mit einem Sollsignal für den Stromsensor **614** und passt die Motorsteuerung **606** als Reaktion auf solche Vergleiche an, wie hierin beschrieben.

**[0074]** Fig. 7 zeigt ein Flussdiagramm eines Prozesses **700** zum Steuern eines PMSM gemäß einer oder mehreren Ausführungsformen.

**[0075]** In Vorgang **702** stellt der Prozess **700** einem Motor eine Steuerspannung als Reaktion auf einen Sollmotorstrom bereit. Der Motor kann ein Mittel zum Erzeugen einer Drehung eines drehbaren Teils des Motors als Reaktion auf einen an einem stationären Teil des Motors induzierten Motorstrom einschließen. Das Mittel zum Erzeugen einer Drehung des drehbaren Teils des Motors als Reaktion auf den Motorstrom, der an dem stationären Teil des Motors induziert wird, kann, ohne darauf beschränkt zu sein, eine PMSM einschließen, einschließlich, ohne darauf beschränkt zu sein, eines FOC-PMSM.

**[0076]** In Vorgang **704** führt der Prozess **700** einen Motorstromverfolgungsprozess zum Verfolgen eines beobachteten Motorstroms zu einem Sollmotorstrom durch. Das Durchführen des Motorstromverfolgungsprozesses kann anfänglich ein Bestimmen einer Steuerspannung einbeziehen, die voraussichtlich einen beobachteten Motorstrom erzeugt, der einen Sollmotorstrom verfolgt.

**[0077]** In Vorgang **706** erzeugt der Prozess **700** eine Fehlerfunktion als Reaktion auf das Durchführen des Motorstromverfolgungsprozesses in Vorgang **704**. Die Fehlerfunktion gibt eine Differenz zwischen einem beobachteten Motorstrom und einem Sollmotorstrom an.

**[0078]** In Vorgang **708** stimmt der Prozess **700** eine adaptive Steuerschleife unter Verwendung eines oder mehrerer geschätzter Systemparameter ab. Die adaptive Steuerschleife kann konfiguriert sein, um die Fehlerfunktion zu minimieren. Das Abstimmen der adaptiven Steuerschleife kann Abstimmfunktionen zum Erzeugen der geschätzten Systemparameter einschließen, bis stabile geschätzte Systemparameter erhalten werden. Das Abstimmen geschätzter Systemparameter kann Abstimmfunktionen für eines oder mehrere von  $L_q$ ,  $R$  und  $\psi_f$  sowie andere System-

parameter einschließen, wie hierin erörtert. Der Prozess **700** kann eine Abstimmung der adaptiven Steuerschleife durchführen, ohne den Motorstromverfolgungsprozess von Vorgang **706** zu unterbrechen.

**[0079]** In Vorgang **710** führt der Prozess **700** die adaptive Steuerschleife zum Minimieren der in Vorgang **708** abgestimmten Fehlerfunktion durch. Das Minimieren der Fehlerfunktion kann ein Versuchen einbeziehen, eine Differenz zwischen dem Sollmotorstrom und dem beobachteten Motorstrom zu reduzieren, wie durch die Fehlerfunktion angegeben. Das Versuchen, die Fehlerfunktion zu minimieren, kann ein Versuchen einschließen, Steueraktionen zu bestimmen, die voraussichtlich die Fehlerfunktion minimieren, das heißt, eine Differenz zwischen einer beobachteten Wellenform eines beobachteten Motorstroms und einer Wellenform des Sollmotorstroms zu reduzieren.

**[0080]** In Vorgang **712** erhält der Prozess **700** eine zweite Steuerspannung als Reaktion auf das Durchführen der abgestimmten adaptiven Steuerschleife in Vorgang **710**. Die zweite Steuerspannung kann konfiguriert sein, um die Fehlerfunktion zu minimieren und genauer eine Differenz zwischen dem beobachteten Motorstrom und dem Sollmotorstrom zu minimieren.

**[0081]** In Vorgang **714** stellt der Prozess **700** dem Motor die in Vorgang **712** bestimmte zweite Steuerspannung bereit.

**[0082]** Fig. 8 zeigt ein Flussdiagramm eines Prozesses **800** zum Durchführen einer adaptiven Steuerschleife zum Minimieren einer Fehlerfunktion.

**[0083]** In Vorgang **802** erhält der Prozess **800** eine erste Steueraktion, die voraussichtlich eine Differenz zwischen einer Sollwellenform des Sollmotorstroms und einer Wellenform des beobachteten Motorstroms steuert. In einer Ausführungsform kann der Prozess **800** die erste Steueraktion durch Durchführen einer Proportional-Integral-Steuerschleife erhalten.

**[0084]** In Vorgang **804** erhält der Prozess **800** einen oder mehrere geschätzte Systemparameter des Motors. In einer Ausführungsform erhält der Prozess **800** den einen oder die mehreren geschätzten Systemparameter durch Schätzen eines oder mehrerer Systemparameter, die für die Systemdynamik des Motors repräsentativ sind. Als nicht einschränkende Beispiele können geschätzte Systemparameter eine geschätzte Induktivität, einen geschätzten Phasenwiderstand und einen geschätzten Rotorfluss einschließen.

**[0085]** In Vorgang **806** erhält der Prozess **800** eine Kompensationskomponente als Reaktion auf den einen oder die mehreren geschätzten Systemparameter. In einer Ausführungsform kompensiert die

Kompensationskomponente voraussichtlich mindestens einen der geschätzten Systemparameter, die in Vorgang **804** erhalten werden.

**[0086]** In Vorgang **808** erhält der Prozess **800** eine zweite Steueraktion als Reaktion auf die in Vorgang **806** erhaltene Kompensationskomponente. In einer Ausführungsform wird die zweite Steueraktion erhalten, indem die erste Steueraktion angepasst wird, um mindestens einen der geschätzten Systemparameter zu kompensieren.

**[0087]** In Vorgang **810** erzeugt der Prozess **800** eine oder mehrere Steuerspannungen als Reaktion auf die in Vorgang **808** erhaltene zweite Steueraktion. Die eine oder die mehreren Steuerspannungen können durch einen PWM-Erzeuger (z. B. den PWM-Erzeuger **304**) erzeugt werden. Vor dem Erzeugen der einen oder der mehreren Steuerspannungen kann die zweite Steueraktion in einen Mehrphasen-Referenzrahmen umgewandelt werden.

**[0088]** Die eine oder die mehreren Steuerspannungen können ausgewählt werden, um eine Differenz zwischen Wellenformen, die gemessene Motorströme aufweisen (z. B. in Bezug auf eine Impulsweite und Impulsfrequenz, die solche Wellenformen aufweisen, ohne darauf beschränkt zu sein), und einer Sollwellenform eines Sollstromprofils für die Motorströme eines PMSM zu minimieren.

**[0089]** **Fig. 9** veranschaulicht einen Prozess **900** zum Bestimmen geschätzter Verstärkungen als Teil des Durchführens einer adaptiven Steuerschleife gemäß einer oder mehreren Ausführungsformen.

**[0090]** In Vorgang **902** legt der Prozess **900** Werte für geschätzte Verstärkungen von Steueraktionen (z. B.  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  der Gleichungen 9, 10 und 11) entsprechend geschätzten Systemparametern (z. B.  $L$ ,  $R$  und  $\Psi$  geschätzt) unter Verwendung von Anfangswerten fest. In einer Ausführungsform können Anfangswerte beliebige Werte sein. In einer anderen Ausführungsform können Anfangswerte durch einen Motorhersteller bereitgestellt werden. In Vorgang **904** erzeugt der Prozess **900** eine Wellenform für mindestens einen der Systemparameter. Die in Vorgang **904** erzeugte Wellenform kann die Funktion sein, die durch eine der Gleichungen 9, 10 oder 11 definiert ist. In Vorgang **906** wird eine Stabilisierungsperiode für die in Vorgang **904** erzeugte Wellenform beobachtet. Die Stabilisierungsperiode ist der Zeitraum, den die Wellenform benötigt, um sich zu stabilisieren. Wenn eine Länge der Stabilisierungsperiode, die in Vorgang **906** beobachtet wird, größer als ein spezifizierter Schwellenwert ist (d. h., die Wellenform zu langsam stabilisiert wird), wird in Vorgang **908** der Wert der geschätzten Verstärkung erhöht. Wenn eine Länge der Stabilisierungsperiode, die in Vorgang **906** beobachtet wird, kleiner als ein spezifizierter Schwellenwert

ist (d. h., die Wellenform zu schnell stabilisiert wird), wird in Vorgang **910** der Wert der geschätzten Verstärkung verringert.

**[0091]** **Fig. 10** veranschaulicht ein Beispiel für die Steuerung eines FOC-PMSM **1000**, nämlich der  $q$ - und  $d$ -Komponenten sowie der beispielhaften Achse des Dreiphasensystems, wie hierin erörtert. Gezeigt sind die Statorwicklungen  $a$ ,  $b$  und  $c$ . Im Betrieb empfängt jede Statorwicklung  $a$ ,  $b$  und  $c$  einen Strom (d. h. einen Statorstrom). Die Wellenform für jede Statorwicklung ist unterschiedlich.

**[0092]** Wie in der vorliegenden Offenbarung verwendet, können die Begriffe „Modul“ oder „Komponente“ auf spezifische Hardware-Implementierungen Bezug nehmen, die konfiguriert sind, um die Aktionen des Moduls oder der Komponente und/oder Softwareobjekte oder Software-Routinen, die auf Universalhardware (z. B. computerlesbaren Medien, Verarbeitungsvorrichtungen, ohne darauf beschränkt zu sein) des Rechensystems gespeichert und/oder durch diese ausgeführt werden können, durchzuführen. In einigen Ausführungsformen können die verschiedenen Komponenten, Module, Engines und Dienste, die in der vorliegenden Offenbarung beschrieben sind, als Objekte oder Prozesse implementiert werden, die auf dem Rechensystem ausgeführt werden (z. B. als separate Threads). Obwohl einige der in der vorliegenden Offenbarung beschriebenen Systeme und Verfahren allgemein als in Software implementiert (gespeichert auf und/oder ausgeführt durch Universalhardware) beschrieben sind, sind spezifische Hardware-Implementierungen oder eine Kombination von Software und spezifischen Hardware-Implementierungen ebenfalls möglich und werden in Betracht gezogen.

**[0093]** Wie in der vorliegenden Offenbarung verwendet, kann der Begriff „Kombination“ in Bezug auf eine Vielzahl von Elementen eine Kombination aller Elemente oder eine beliebige von verschiedenen unterschiedlichen Unterkombinationen einiger der Elemente einschließen. Zum Beispiel kann die Phrase „A, B, C, D oder Kombinationen davon“ Bezug nehmen auf eines von A, B, C oder D; die Kombination von jedem von A, B, C und D und jede Unterkombination von A, B, C oder D, wie A, B und C; A, B und D; A, C und D; B, C und D; A und B; A und C; A und D; B und C; B und D oder C und D.

**[0094]** Begriffe, die in der vorliegenden Offenbarung und insbesondere in den beiliegenden Ansprüchen verwendet werden (z. B. Inhalte der beiliegenden Ansprüche), sind allgemein als „offene“ Begriffe gedacht (z. B. sollte der Begriff „einschließlich“ als „einschließlich“, jedoch nicht beschränkt auf interpretiert werden, der Begriff „aufweisend“ sollte als „mindestens aufweisend“ interpretiert werden, der Begriff „schließt ein“ sollte als „schließt ein, ist jedoch nicht beschränkt

auf interpretiert werden, ohne darauf beschränkt zu sein).

**[0095]** Wenn außerdem eine bestimmte Anzahl einer eingeführten Anspruchsangabe beabsichtigt ist, wird eine solche Absicht ausdrücklich in dem Anspruch angegeben, und in Abwesenheit einer solchen Angabe liegt keine solche Absicht vor. Als Verständnishilfe können zum Beispiel die folgenden beiliegenden Ansprüche die Verwendung der einleitenden Phrasen „mindestens eine/r/s“ und „eine/r/s oder mehrere“ zum Einführen von Anspruchsangaben enthalten. Die Verwendung solcher Phrasen sollte jedoch nicht so ausgelegt werden, dass sie impliziert, dass die Einführung einer Anspruchsangabe durch die unbestimmten Artikel „ein“ oder „eine“ einen bestimmten Anspruch, der eine solche eingeführte Anspruchsangabe enthält, auf Ausführungsformen beschränkt, die nur eine solche Angabe enthalten, selbst wenn derselbe Anspruch die einleitenden Phrasen „eine/r/s oder mehrere“ oder „mindestens eine/r/s“ und unbestimmte Artikel wie „ein“ und/oder „eine“ einschließt (z. B. soll „ein“ und/oder „eine“ so interpretiert werden, dass es „mindestens ein/e“ oder „ein/e oder mehrere“ bedeutet); gleiches gilt für die Verwendung bestimmter Artikel, die zur Einführung von Anspruchsangaben verwendet werden.

**[0096]** Selbst wenn eine bestimmte Anzahl einer eingeführten Anspruchsangabe explizit angegeben ist, wird der Fachmann außerdem erkennen, dass eine solche Angabe so interpretiert werden sollte, dass sie mindestens die angegebene Anzahl bedeutet (z. B. bedeutet die bloße Angabe von „zwei Angaben“ ohne andere Modifikatoren mindestens zwei Angaben oder zwei oder mehr Angaben). Des Weiteren soll in den Fällen, in denen eine Konvention analog zu „mindestens eine/r/s von A, B und C, ohne darauf beschränkt zu sein“ oder „eine/r/s oder mehrere von A, B und C, ohne darauf beschränkt zu sein“ verwendet wird, eine solche Konstruktion allgemein A allein, B allein, C allein, A und B zusammen, A und C zusammen, B und C zusammen, oder A, B und C zusammen, ohne darauf beschränkt zu sein, einschließen.

**[0097]** Ferner sollte jedes disjunkte Wort oder jede disjunkte Phrase, das bzw. die zwei oder mehr alternative Begriffe darstellt, sei es in der Beschreibung, den Ansprüchen oder den Zeichnungen, so verstanden werden, dass die Möglichkeit des Einschließens eines der Begriffe, des einen oder des anderen Begriffs oder beider Begriffe in Betracht gezogen wird. Zum Beispiel sollte die Phrase „A oder B“ so verstanden werden, dass sie die Möglichkeiten „A“ oder „B“ oder „A und B“ einschließt.

**[0098]** Zusätzliche, nicht einschränkende Ausführungsformen der Offenbarung schließen ein:

**Ausführungsform 1:** Ein Verfahren zum Steuern eines Motors, der zum Erzeugen einer Drehung eines drehbaren Teils des Motors als Reaktion auf einen Motorstrom konfiguriert ist, der an einem stationären Teil des Motors induziert wird, wobei das Verfahren umfasst: Bereitstellen einer Steuerspannung für einen Motor; Durchführen eines Motorstromverfolgungsprozesses zum Verfolgen eines beobachteten Motorstroms zu einem Sollmotorstrom; Erzeugen einer Fehlerfunktion als Reaktion auf das Durchführen des Motorstromverfolgungsprozesses; Abstimmen einer adaptiven Steuerschleife, die konfiguriert ist, um die Fehlerfunktion unter Verwendung eines oder mehrerer geschätzter Systemparameter zu minimieren; und Durchführen einer Steueraktion als Reaktion auf die abgestimmte adaptive Steuerschleife.

**Ausführungsform 2:** Das Verfahren nach Ausführungsform 1, ferner umfassend: Erhalten einer ersten Steueraktion, die voraussichtlich eine Differenz zwischen einer Sollwellenform des Sollmotorstroms und einer beobachteten Wellenform des beobachteten Motorstroms steuert; Erhalten eines oder mehrerer geschätzter Systemparameter des Motors; Erhalten einer Kompensationskomponente als Reaktion auf den einen oder die mehreren geschätzten Systemparameter und Erhalten einer zweiten Steueraktion durch Anpassen der ersten Steueraktion als Reaktion auf die Kompensationskomponente.

**Ausführungsform 3:** Das Verfahren nach einer der Ausführungsformen 1 und 2, wobei das Erhalten des einen oder der mehreren geschätzten Systemparameter des Motors ein Schätzen eines oder mehrerer Systemparameter umfasst, die für die Systemdynamik des Motors repräsentativ sind.

**Ausführungsform 4:** Das Verfahren nach einer der Ausführungsformen 1 bis 3, wobei das Schätzen des Systemparameters, der für die Systemdynamik des Motors repräsentativ ist, ein Schätzen eines oder mehrerer von Induktivität, Phasenwiderstand und Rotorfluss umfasst.

**Ausführungsform 5:** Das Verfahren nach einer der Ausführungsformen 1 bis 4, wobei das Erhalten der Kompensationskomponente als Reaktion auf den einen oder die mehreren geschätzten Systemparameter ein Bestimmen einer Komponente umfasst, die voraussichtlich mindestens einen der geschätzten Systemparameter kompensiert.

**Ausführungsform 6:** Das Verfahren nach einer der Ausführungsformen 1 bis 5, ferner umfassend ein Bereitstellen einer zweiten Steuerspannung für den Motor als Reaktion auf eine Steueraktion, die durch ein Durchführen der adaptiven Steuerschleife erhalten wird.

**Ausführungsform 7:** Das Verfahren nach einer der Ausführungsformen **1 bis 6**, wobei das Durchführen der adaptiven Steuerschleife umfasst: Festlegen von Werten für geschätzte Verstärkungen von Steueraktionen, die geschätzten Systemparametern entsprechen, unter Verwendung von Anfangswerten; Erzeugen einer Wellenform für mindestens einen Systemparameter und Abstimmen eines Werts einer geschätzten Verstärkung, die dem mindestens einen Systemparameter entspricht, als Reaktion auf die Wellenform.

**Ausführungsform 8:** Das Verfahren nach einer der Ausführungsformen **1 bis 7**, ferner umfassend: Beobachten einer Stabilisierungsperiode der Wellenform und Ändern des Werts der geschätzten Verstärkung als Reaktion auf eine Länge der Stabilisierungsperiode. **Ausführungsform 9:** Das Verfahren nach einer der Ausführungsformen **1 bis 8**, wobei das Ändern des Werts der geschätzten Verstärkung als Reaktion auf die Länge der Stabilisierungsperiode umfasst: Erhöhen des Werts der geschätzten Verstärkung als Reaktion darauf, dass die Länge der Stabilisierungsperiode größer als ein spezifizierter Schwellenwert ist.

**Ausführungsform 10:** Das Verfahren nach einer der Ausführungsformen **1 bis 9**, wobei das Ändern des Werts der geschätzten Verstärkung als Reaktion auf die Länge der Stabilisierungsperiode umfasst: Verringern des Werts der geschätzten Verstärkung als Reaktion darauf, dass die Länge der Stabilisierungsperiode kürzer als ein spezifizierter Schwellenwert ist.

**Ausführungsform 11:** Eine Motorsteuerung zum Ansteuern eines Motors, der als Permanentmagnet-Synchronmotor, PMSM, konfiguriert ist, wobei die Motorsteuerung einen Prozessor und ein nichtflüchtiges maschinenlesbares Medium umfasst, wobei das Medium Anweisungen einschließt, die, wenn sie durch den Prozessor ausgeführt werden, die Motorsteuerung konfigurieren zum: Bereitstellen einer ersten Steuerspannung für den Motor; Durchführen eines Motorstromverfolgungsprozesses zum Verfolgen eines beobachteten Motorstroms zu einem Sollmotorstrom; Erzeugen einer Fehlerfunktion als Reaktion auf das Durchführen des Motorstromverfolgungsprozesses; Abstimmen einer adaptiven Steuerschleife, die konfiguriert ist, um die Fehlerfunktion als Reaktion auf einen oder mehrere geschätzte Systemparameter zu minimieren; und Bereitstellen einer zweiten Steuerspannung als Reaktion auf die abgestimmte adaptive Steuerschleife.

**Ausführungsform 12:** Die Motorsteuerung nach **Ausführungsform 11**, wobei die Anweisungen, wenn sie durch den Prozessor ausgeführt wer-

den, ferner die Motorsteuerung konfigurieren zum: Erhalten einer ersten Steueraktion, die voraussichtlich eine Differenz zwischen einer Sollwellenform des Sollmotorstroms und einer beobachteten Wellenform des beobachteten Motorstroms steuert; Erhalten eines oder mehrerer geschätzter Systemparameter des Motors; Erhalten einer Kompensationskomponente als Reaktion auf den einen oder die mehreren geschätzten Systemparameter und Erhalten einer zweiten Steueraktion durch Anpassen der ersten Steueraktion als Reaktion auf die Kompensationskomponente.

**Ausführungsform 13:** Die Motorsteuerung nach einer der Ausführungsformen **11 und 12**, wobei die Anweisungen, wenn sie durch den Prozessor ausgeführt werden, ferner die Motorsteuerung konfigurieren, um den einen oder die mehreren geschätzten Systemparameter des Motors zu erhalten, indem ein oder mehrere Systemparameter geschätzt werden, die für die Systemdynamik des Motors repräsentativ sind.

**Ausführungsform 14:** Die Motorsteuerung nach einer der Ausführungsformen **11 bis 13**, wobei die Anweisungen, wenn sie durch den Prozessor ausgeführt werden, ferner die Motorsteuerung konfigurieren, um einen Systemparameter zu schätzen, der für die Systemdynamik des Motors repräsentativ ist, indem eines oder mehrere von Induktivität, Phasenwiderstand und Rotorfluss geschätzt werden.

**Ausführungsform 15:** Die Motorsteuerung gemäß einer der Ausführungsformen **11 bis 14**, wobei die Anweisungen, wenn sie durch den Prozessor ausgeführt werden, ferner die Motorsteuerung konfigurieren, um die Kompensationskomponente als Reaktion auf den einen oder die mehreren geschätzten Systemparameter zu erhalten, indem eine Komponente bestimmt wird, die voraussichtlich mindestens einen der geschätzten Systemparameter kompensiert.

**Ausführungsform 16:** Die Motorsteuerung nach einer der Ausführungsformen **11 bis 15**, wobei die Anweisungen, wenn sie durch den Prozessor ausgeführt werden, ferner die Motorsteuerung konfigurieren, um dem Motor eine zweite Steuerspannung als Reaktion auf eine Steueraktion bereitzustellen, die durch ein Durchführen der adaptiven Steuerschleife erhalten wird.

**Ausführungsform 17:** Die Motorsteuerung nach einer der Ausführungsformen **11 bis 16**, wobei die Anweisungen, wenn sie durch den Prozessor ausgeführt werden, ferner die Motorsteuerung konfigurieren, um die adaptive Steuerschleife durchzuführen durch: Festlegen von Werten für geschätzte Verstärkungen aus Steueraktionen, die geschätzten Systemparametern

entsprechen, unter Verwendung von Anfangswerten; Erzeugen einer Wellenform für mindestens einen Systemparameter und Abstimmen eines Werts einer geschätzten Verstärkung, die dem mindestens einen Systemparameter entspricht, als Reaktion auf die Wellenform.

**Ausführungsform 18:** Die Motorsteuerung nach einer der Ausführungsformen **11** bis **17**, wobei die Anweisungen, wenn sie durch den Prozessor ausgeführt werden, ferner die Motorsteuerung konfigurieren, um die adaptive Steuerschleife durchzuführen durch: Beobachten einer Stabilisierungsperiode der Wellenform und Ändern des Werts der geschätzten Verstärkung als Reaktion auf eine Länge der Stabilisierungsperiode.

**Ausführungsform 19:** Die Motorsteuerung nach einer der Ausführungsformen **11** bis **18**, wobei die Anweisungen, wenn sie durch den Prozessor ausgeführt werden, ferner die Motorsteuerung konfigurieren, um den Wert der geschätzten Verstärkung als Reaktion auf die Länge der Stabilisierungsperiode zu ändern durch: Erhöhen des Werts der geschätzten Verstärkung als Reaktion darauf, dass die Länge der Stabilisierungsperiode größer als ein spezifizierter Schwellenwert ist.

**Ausführungsform 20:** Die Motorsteuerung nach einer der Ausführungsformen **11** bis **19**, wobei die Anweisungen, wenn sie durch den Prozessor ausgeführt werden, ferner die Motorsteuerung konfigurieren, um den Wert der geschätzten Verstärkung als Reaktion auf die Länge der Stabilisierungsperiode zu ändern durch: Verringern des Werts der geschätzten Verstärkung als Reaktion darauf, dass die Länge der Stabilisierungsperiode kürzer als ein spezifizierter Schwellenwert ist.

**Ausführungsform 21:** Ein System, umfassend: einen Motor, der als feldorientierter gesteuerter Permanentmagnet-Synchronmotor konfiguriert ist; und einen Treiber, wobei der Treiber konfiguriert ist, um einen Stromverfolgungsprozess zum Verfolgen eines beobachteten Motorstroms des Motors zu einem Sollmotorstrom für den Motor durchzuführen, wobei der Prozess umfasst: Erzeugen einer Fehlerfunktion als Reaktion auf den Stromverfolgungsprozess; Abstimmen einer adaptiven Steuerschleife, die konfiguriert ist, um die Fehlerfunktion als Reaktion auf eine Kompensationsfunktion, die geschätzte Systemparameter verwendet, zu minimieren; und Bereitstellen, als Reaktion auf die abgestimmte adaptive Steuerschleife, einer Steuerspannung für den Motor.

**Ausführungsform 22:** Das System nach Ausführungsform **21**, wobei die Fehlerfunktion eine Differenz zwischen einem Sollmotorstrom und einem beobachteten Motorstrom angibt.

**Ausführungsform 23:** Das System nach einer der Ausführungsformen **21** und **22**, wobei der Treiber umfasst: einen Bewegungsprofilerzeuger, um ein Sollbewegungsprofil als Reaktion auf eines oder mehrere von einer Sollposition und einer Solldrehzahl zu erzeugen; eine Bewegungssteuerung, die konfiguriert ist, um ein Sollstromprofil als Reaktion auf das Sollbewegungsprofil auszugeben; und eine Stromsteuerung, die konfiguriert ist, um eine Steuerspannung als Reaktion auf das Sollstromprofil auszugeben.

**Ausführungsform 24:** Das System nach einer der Ausführungsformen **21** bis **23**, wobei die Stromsteuerung umfasst: eine Steuerung, die konfiguriert ist, um eine d-Achsen-Steuerschleife zu implementieren; und eine adaptive Steuerung, die konfiguriert ist, um eine q-Achsen-Steuerschleife zu implementieren.

**Ausführungsform 25:** Das System nach einer der Ausführungsformen **21** bis **24**, wobei die Stromsteuerung ferner einen Park-Transformator umfasst, der mit einem Ausgang eines Clarke-Transformators wirkgekoppelt ist, wobei der wirkgekoppelte Park-Transformator und Clarke-Transformator konfiguriert sind, um einen beobachteten Motorstrom und eine beobachtete Bewegung des Motors zu empfangen und den beobachteten Motorstrom und die beobachtete Bewegung in eine q-Achsen- und d-Achsen-Komponente umzuwandeln.

**Ausführungsform 26:** Das System nach einer der Ausführungsformen **21** bis **25**, wobei die Stromsteuerung ferner einen Impulsweitenmodulationserzeuger umfasst, der konfiguriert ist, um impulsweitenmodulierte Spannungssteuersignale zu erzeugen.

**Ausführungsform 27:** Das System nach einer der Ausführungsformen **21** bis **26**, wobei die Bewegungssteuerung umfasst: eine Drehzahlsteuerung, die konfiguriert ist, um eine Drehzahlkomponente des Sollbewegungsprofils zu bestimmen; und eine Positionssteuerung, die konfiguriert ist, um eine Positionskomponente des Sollbewegungsprofils zu bestimmen.

**Ausführungsform 28:** Das System nach einer der Ausführungsformen **21** bis **27**, ferner umfassend: einen ersten Rückkopplungspfad zum Bereitstellen von Bewegungsinformationen über einen Betrieb des Motors an die Bewegungssteuerung und einen zweiten Rückkopplungspfad zum Bereitstellen von Motorstrominformationen über den dem Motor zugeführten Motorstrom an die Stromsteuerung.

**[0099]** Während die vorliegende Offenbarung hierin in Bezug auf bestimmte veranschaulichte Ausführungsformen beschrieben wurde, wird der Fachmann erkennen und verstehen, dass die vorliegende Erfin-

nung nicht darauf beschränkt ist. Vielmehr können viele Ergänzungen, Löschungen und Modifikationen an den veranschaulichten und beschriebenen Ausführungsformen vorgenommen werden, ohne vom Schutzzumfang der Erfindung abzuweichen, wie nachfolgend zusammen mit ihren rechtlichen Äquivalenten beansprucht wird. Außerdem können Merkmale von einer Ausführungsform mit Merkmalen einer anderen Ausführungsform kombiniert werden, während sie immer noch innerhalb des Schutzzumfangs der Erfindung enthalten sind, wie er vom Erfinder in Betracht gezogen wird.

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**Zitierte Patentliteratur**

- CH 201911148300 [0001]

## Patentansprüche

1. Verfahren zum Steuern eines Motors, der zum Erzeugen einer Drehung eines drehbaren Teils des Motors als Reaktion auf einen Motorstrom konfiguriert ist, der an einem stationären Teil des Motors induziert wird, wobei das Verfahren umfasst:

Bereitstellen einer Steuerspannung an einen Motor;  
Durchführen eines Motorstromverfolgungsprozesses zum Verfolgen eines beobachteten Motorstroms zu einem Sollmotorstrom;  
Erzeugen einer Fehlerfunktion als Reaktion auf das Durchführen des Motorstromverfolgungsprozesses;  
Abstimmen einer adaptiven Steuerschleife, die konfiguriert ist, um die Fehlerfunktion unter Verwendung eines oder mehrerer geschätzter Systemparameter zu minimieren; und  
Durchführen einer Steueraktion als Reaktion auf die abgestimmte adaptive Steuerschleife.

2. Verfahren nach Anspruch 1, ferner umfassend:  
Erhalten einer ersten Steueraktion, die voraussichtlich eine Differenz zwischen einer Sollwellenform des Sollmotorstroms und einer beobachteten Wellenform des beobachteten Motorstroms steuert;  
Erhalten eines oder mehrerer geschätzter Systemparameter des Motors;  
Erhalten einer Kompensationskomponente als Reaktion auf den einen oder die mehreren geschätzten Systemparameter und  
Erhalten einer zweiten Steueraktion durch Anpassen der ersten Steueraktion als Reaktion auf die Kompensationskomponente.

3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei das Erhalten des einen oder der mehreren geschätzten Systemparameter des Motors ein Schätzen eines oder mehrerer Systemparameter umfasst, die für eine Systemdynamik des Motors repräsentativ sind.

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei das Schätzen des Systemparameters, der für die Systemdynamik des Motors repräsentativ ist, ein Schätzen von einem oder mehreren von Induktivität, Phasenwiderstand und Rotorfluss umfasst.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4, wobei das Erhalten der Kompensationskomponente als Reaktion auf den einen oder die mehreren geschätzten Systemparameter ein Bestimmen einer Komponente umfasst, die voraussichtlich mindestens einen der geschätzten Systemparameter kompensiert.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, ferner umfassend ein Bereitstellen einer zweiten Steuerspannung an den Motor als Reaktion auf eine Steueraktion, die durch ein Durchführen der adaptiven Steuerschleife erhalten wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei das Durchführen der adaptiven Steuerschleife umfasst:

Festlegen von Werten für geschätzte Verstärkungen aus Steueraktionen, die geschätzten Systemparametern entsprechen, unter Verwendung von Anfangswerten;  
Erzeugen einer Wellenform für mindestens einen Systemparameter und  
Abstimmen eines Werts einer geschätzten Verstärkung, die dem mindestens einen Systemparameter entspricht, als Reaktion auf die Wellenform.

8. Verfahren nach Anspruch 7, ferner umfassend:  
Beobachten einer Stabilisierungsperiode der Wellenform und  
Ändern des Werts der geschätzten Verstärkung als Reaktion auf eine Länge der Stabilisierungsperiode.

9. Verfahren nach Anspruch 8, wobei das Ändern des Werts der geschätzten Verstärkung als Reaktion auf die Länge der Stabilisierungsperiode umfasst:  
Erhöhen des Werts der geschätzten Verstärkung als Reaktion darauf, dass die Länge der Stabilisierungsperiode größer als ein spezifizierter Schwellenwert ist.

10. Verfahren nach Anspruch 8, wobei das Ändern des Werts der geschätzten Verstärkung als Reaktion auf die Länge der Stabilisierungsperiode umfasst:  
Verringern des Werts der geschätzten Verstärkung als Reaktion darauf, dass die Länge der Stabilisierungsperiode kürzer als ein spezifizierter Schwellenwert ist.

11. Motorsteuerung zum Ansteuern eines Motors, der als Permanentmagnet-Synchronmotor, PMSM, konfiguriert ist, wobei die Motorsteuerung einen Prozessor und ein nichtflüchtiges maschinenlesbares Medium umfasst, wobei das Medium Anweisungen einschließt, die, wenn sie durch den Prozessor ausgeführt werden, die Motorsteuerung konfigurieren zum:

Bereitstellen einer ersten Steuerspannung für den Motor;  
Durchführen eines Motorstromverfolgungsprozesses zum Verfolgen eines beobachteten Motorstroms zu einem Sollmotorstrom;  
Erzeugen einer Fehlerfunktion als Reaktion auf das Durchführen des Motorstromverfolgungsprozesses;  
Abstimmen einer adaptiven Steuerschleife, die konfiguriert ist, um die Fehlerfunktion als Reaktion auf einen oder mehrere geschätzte Systemparameter zu minimieren; und  
Bereitstellen einer zweiten Steuerspannung als Reaktion auf die abgestimmte adaptive Steuerschleife.

12. Motorsteuerung nach Anspruch 11, wobei die Anweisungen, wenn sie durch den Prozessor ausge-

führt werden, ferner die Motorsteuerung konfigurieren zum:

Erhalten einer ersten Steueraktion, die voraussichtlich eine Differenz zwischen einer Sollwellenform des Sollmotorstroms und einer beobachteten Wellenform des beobachteten Motorstroms steuert;  
 Erhalten eines oder mehrerer geschätzter Systemparameter des Motors;  
 Erhalten einer Kompensationskomponente als Reaktion auf den einen oder die mehreren geschätzten Systemparameter und  
 Erhalten einer zweiten Steueraktion durch Anpassen der ersten Steueraktion als Reaktion auf die Kompensationskomponente.

13. Motorsteuerung nach Anspruch 12, wobei die Anweisungen, wenn sie durch den Prozessor ausgeführt werden, ferner die Motorsteuerung konfigurieren, um den einen oder die mehreren geschätzten Systemparameter des Motors durch Schätzen eines oder mehrerer Systemparameter zu erhalten, die für eine Systemdynamik des Motors repräsentativ sind.

14. Motorsteuerung nach Anspruch 13, wobei die Anweisungen, wenn sie durch den Prozessor ausgeführt werden, ferner die Motorsteuerung konfigurieren, um einen Systemparameter zu schätzen, der für die Systemdynamik des Motors repräsentativ ist, indem eines oder mehrere von Induktivität, Phasenwiderstand und Rotorfluss geschätzt werden.

15. Motorsteuerung nach einem der Ansprüche 12 bis 14, wobei die Anweisungen, wenn sie durch den Prozessor ausgeführt werden, ferner die Motorsteuerung konfigurieren, um die Kompensationskomponente als Reaktion auf den einen oder die mehreren geschätzten Systemparameter zu erhalten, indem eine Komponente bestimmt wird, die voraussichtlich mindestens einen der geschätzten Systemparameter kompensiert.

16. Motorsteuerung nach einem der Ansprüche 11 bis 15, wobei die Anweisungen, wenn sie durch den Prozessor ausgeführt werden, ferner die Motorsteuerung konfigurieren, um dem Motor eine zweite Steuerspannung als Reaktion auf eine Steueraktion bereitzustellen, die durch ein Durchführen der adaptiven Steuerschleife erhalten wird.

17. Motorsteuerung nach einem der Ansprüche 11 bis 16, wobei die Anweisungen, wenn sie durch den Prozessor ausgeführt werden, ferner die Motorsteuerung konfigurieren, um die adaptive Steuerschleife durchzuführen durch:  
 Festlegen von Werten für geschätzte Verstärkungen aus Steueraktionen, die geschätzten Systemparametern entsprechen, unter Verwendung von Anfangswerten;  
 Erzeugen einer Wellenform für mindestens einen Systemparameter und

Abstimmen eines Werts einer geschätzten Verstärkung, die dem mindestens einen Systemparameter entspricht, als Reaktion auf die Wellenform.

18. Motorsteuerung nach Anspruch 17, wobei die Anweisungen, wenn sie durch den Prozessor ausgeführt werden, ferner die Motorsteuerung konfigurieren, um die adaptive Steuerschleife durchzuführen durch:  
 Beobachten einer Stabilisierungsperiode der Wellenform und  
 Ändern des Werts der geschätzten Verstärkung als Reaktion auf eine Länge der Stabilisierungsperiode.

19. Motorsteuerung nach Anspruch 18, wobei die Anweisungen, wenn sie durch den Prozessor ausgeführt werden, ferner die Motorsteuerung konfigurieren, um den Wert der geschätzten Verstärkung als Reaktion auf die Länge der Stabilisierungsperiode zu ändern durch:  
 Erhöhen des Werts der geschätzten Verstärkung als Reaktion darauf, dass die Länge der Stabilisierungsperiode größer als ein spezifizierter Schwellenwert ist.

20. Motorsteuerung nach Anspruch 18, wobei die Anweisungen, wenn sie durch den Prozessor ausgeführt werden, ferner die Motorsteuerung konfigurieren, um den Wert der geschätzten Verstärkung als Reaktion auf die Länge der Stabilisierungsperiode zu ändern durch:  
 Verringern des Werts der geschätzten Verstärkung als Reaktion darauf, dass die Länge der Stabilisierungsperiode kürzer als ein spezifizierter Schwellenwert ist.

21. System, umfassend:  
 einen Motor, der als feldorientierter gesteuerter Permanentmagnet-Synchronmotor konfiguriert ist; und  
 einen Treiber, wobei der Treiber konfiguriert ist, um einen Stromverfolgungsprozess zum Verfolgen eines beobachteten Motorstroms des Motors zu einem Sollmotorstrom für den Motor durchzuführen, wobei der Prozess umfasst:  
 Erzeugen einer Fehlerfunktion als Reaktion auf den Stromverfolgungsprozess;  
 Abstimmen einer adaptiven Steuerschleife, die konfiguriert ist, um die Fehlerfunktion als Reaktion auf eine Kompensationsfunktion, die geschätzte Systemparameter verwendet, zu minimieren; und  
 Bereitstellen einer Steuerspannung für den Motor als Reaktion auf die abgestimmte adaptive Steuerschleife.

22. System nach Anspruch 21, wobei die Fehlerfunktion eine Differenz zwischen einem Sollmotorstrom und einem beobachteten Motorstrom angibt.

23. System nach Anspruch 21 oder 22, wobei der Treiber umfasst:

einen Bewegungsprofilerzeuger, um ein Sollbewegungsprofil als Reaktion auf eines oder mehrere von einer Sollposition und einer Solldrehzahl zu erzeugen;  
eine Bewegungssteuerung, die konfiguriert ist, um ein Sollstromprofil als Reaktion auf das Sollbewegungsprofil auszugeben; und  
eine Stromsteuerung, die konfiguriert ist, um eine Steuerspannung als Reaktion auf das Sollstromprofil auszugeben.

24. System nach Anspruch 23, wobei die Stromsteuerung umfasst:  
eine Steuerung, die konfiguriert ist, um eine d-Achsen-Steuerschleife zu implementieren; und  
eine adaptive Steuerung, die konfiguriert ist, um eine q-Achsen-Steuerschleife zu implementieren.

25. System nach Anspruch 23 oder 24, wobei die Stromsteuerung ferner einen Park-Transformator umfasst, der mit einem Ausgang eines Clarke-Transformators wirkgekoppelt ist, wobei der wirkgekoppelte Park-Transformator und Clark-Transformator konfiguriert sind, um einen beobachteten Motorstrom und eine beobachtete Bewegung des Motors zu empfangen und den beobachteten Motorstrom und die beobachtete Bewegung in eine q-Achsen- und d-Achsen-Komponente umzuwandeln.

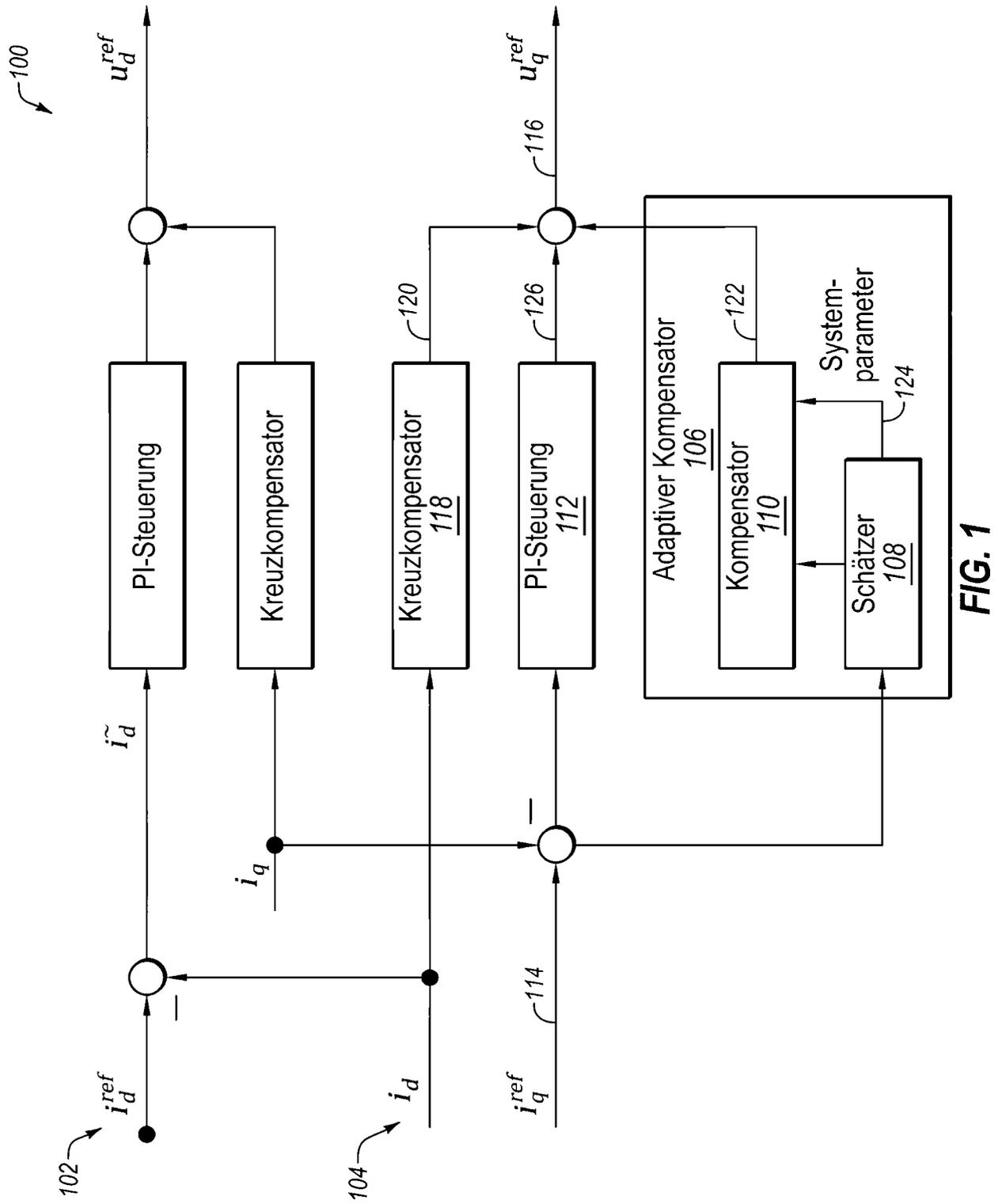
26. System nach einem der Ansprüche 23 bis 25, wobei die Stromsteuerung ferner einen Impulsweitenmodulationserzeuger umfasst, der konfiguriert ist, um impulsweitenmodulierte Spannungssteuersignale zu erzeugen.

27. System nach einem der Ansprüche 23 bis 26, wobei die Bewegungssteuerung umfasst:  
eine Drehzahlsteuerung, die konfiguriert ist, um eine Drehzahlkomponente des Sollbewegungsprofils zu bestimmen; und  
eine Positionssteuerung, die konfiguriert ist, um eine Positionskomponente des Sollbewegungsprofils zu bestimmen.

28. System nach einem der Ansprüche 23 bis 27, ferner umfassend:  
einen ersten Rückkopplungspfad zum Bereitstellen von Bewegungsinformationen über einen Betrieb des Motors an die Bewegungssteuerung und  
einen zweiten Rückkopplungspfad zum Bereitstellen von Motorstrominformationen über den dem Motor zugeführten Motorstrom an die Stromsteuerung.

Es folgen 11 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



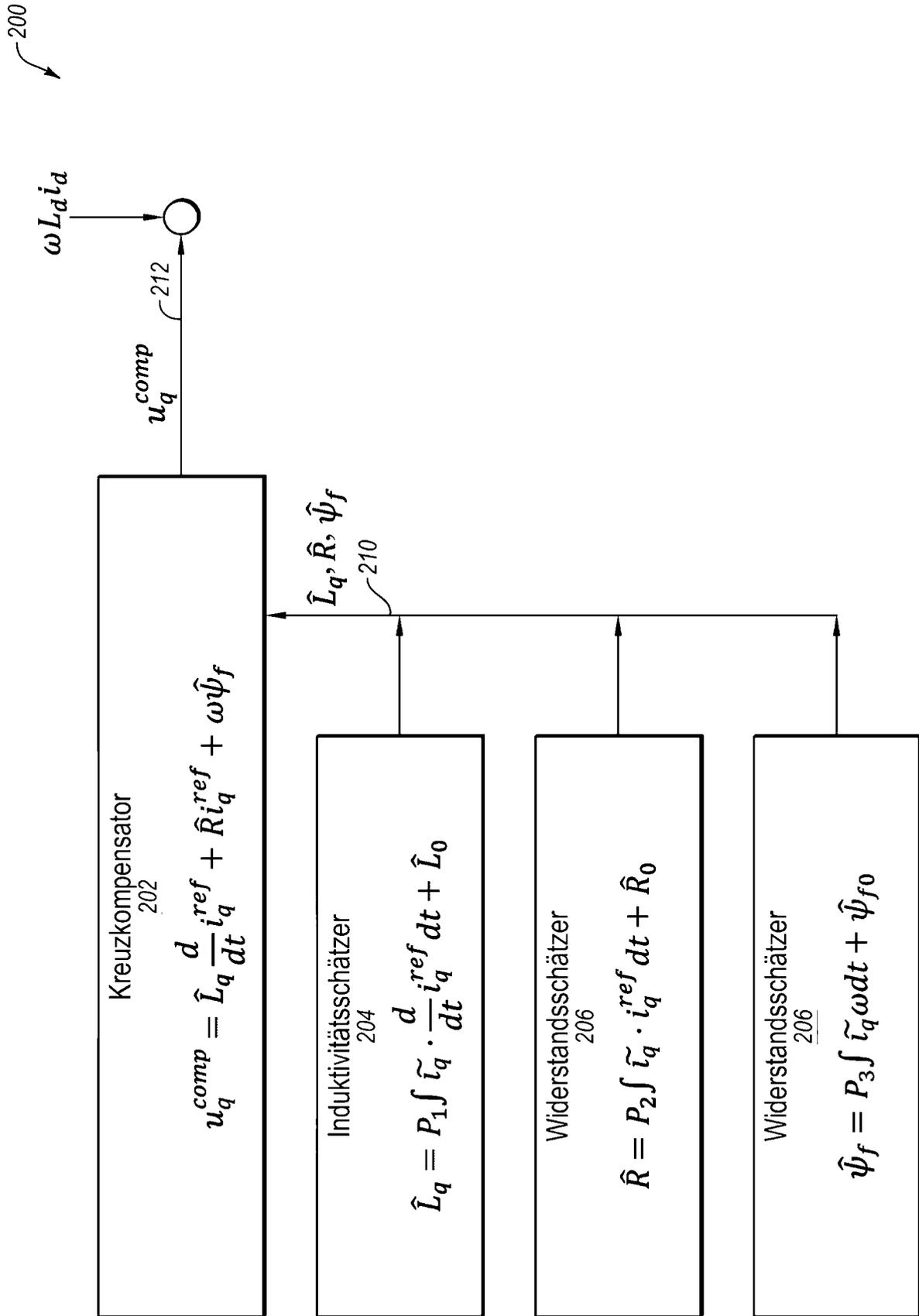


FIG. 2

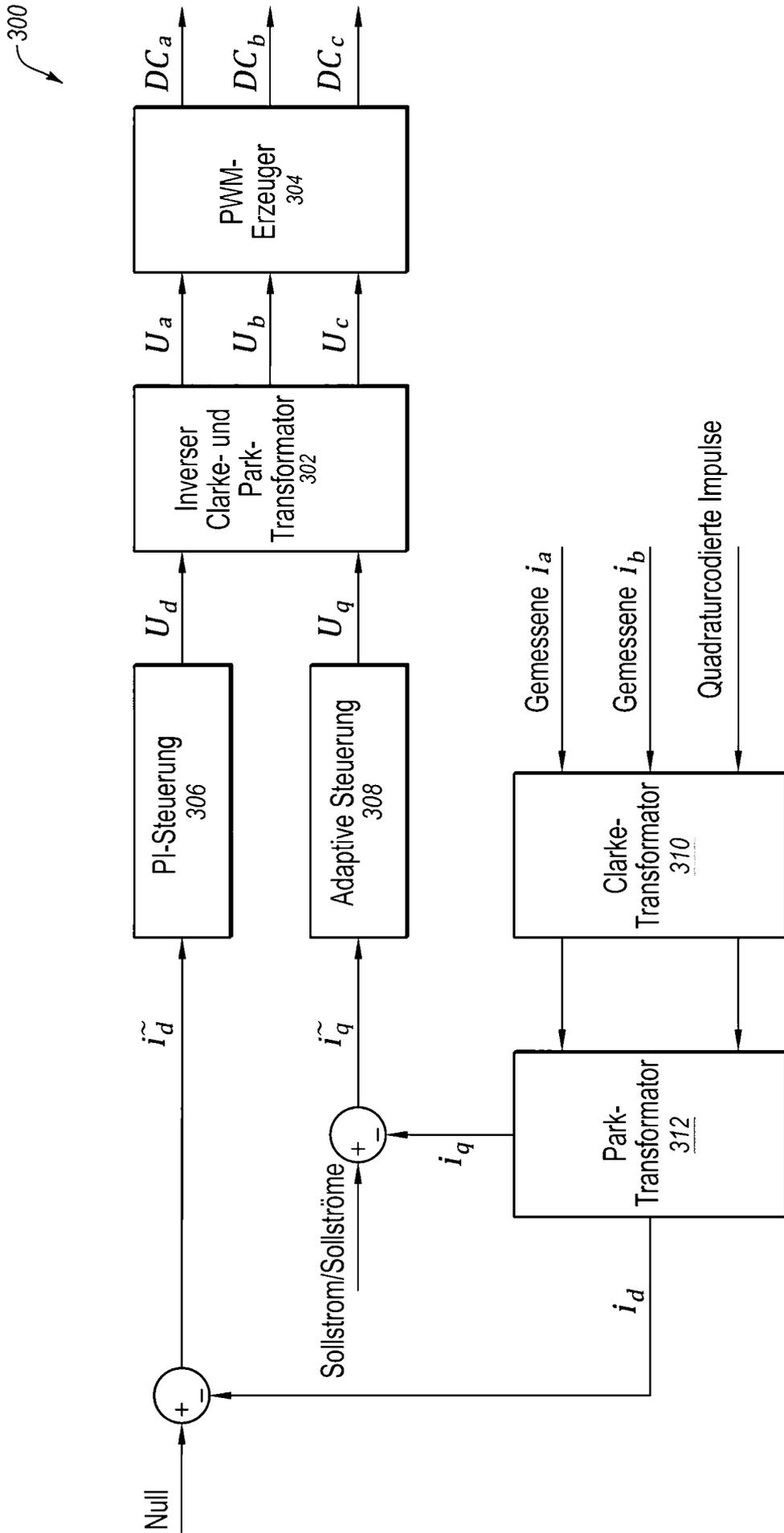


FIG. 3

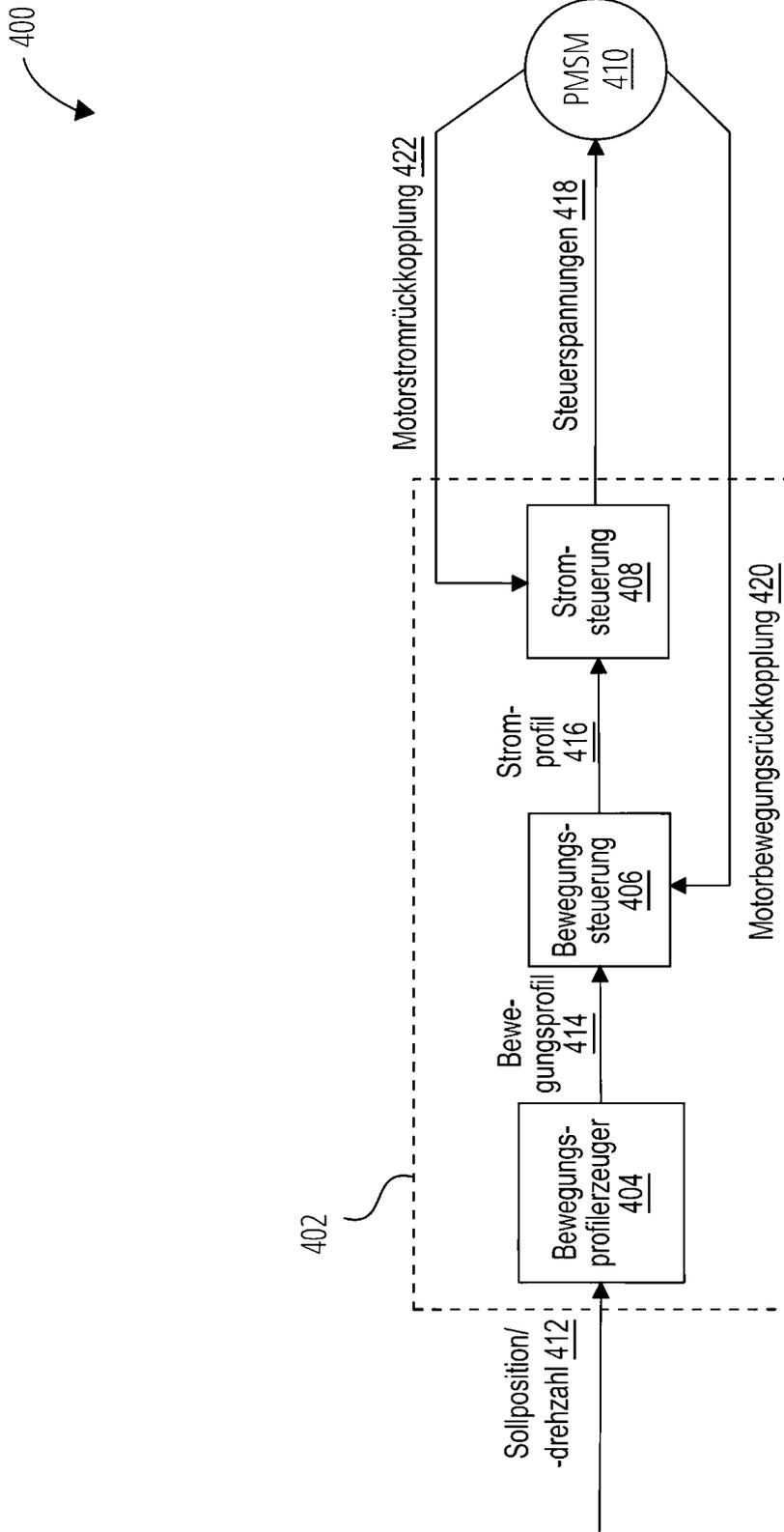


FIG. 4

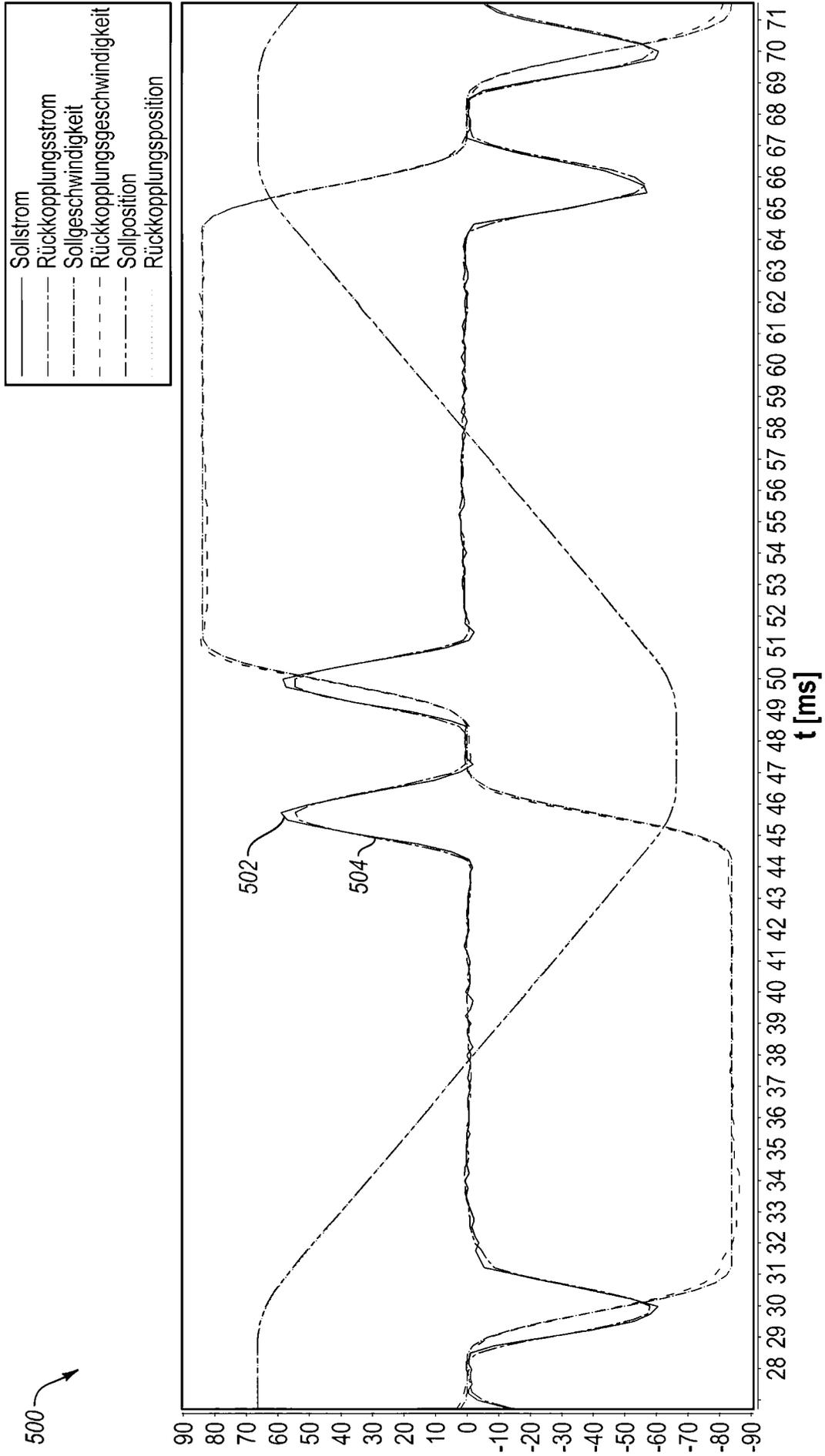
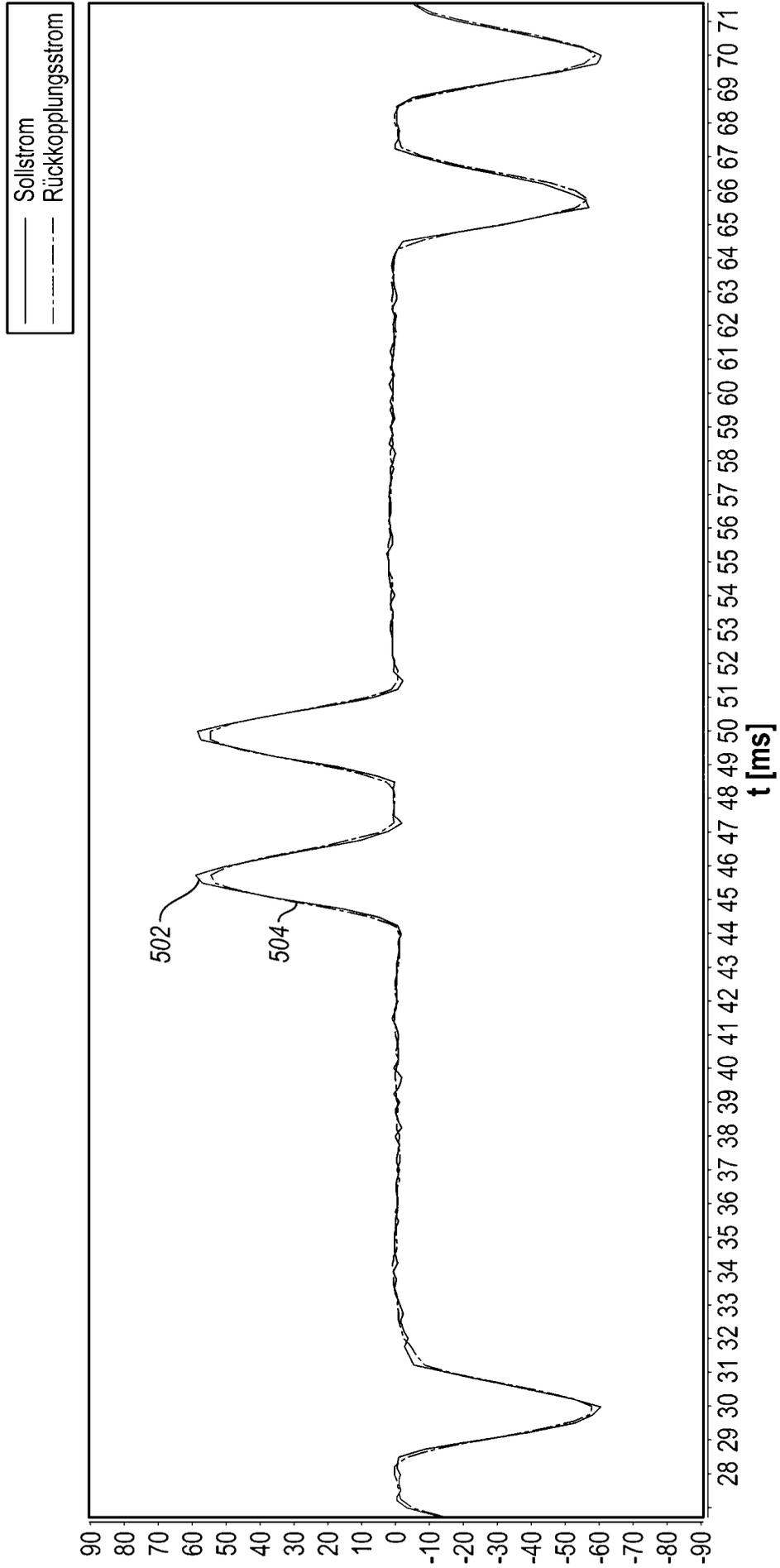


FIG. 5A

500 →



**FIG. 5B**

600

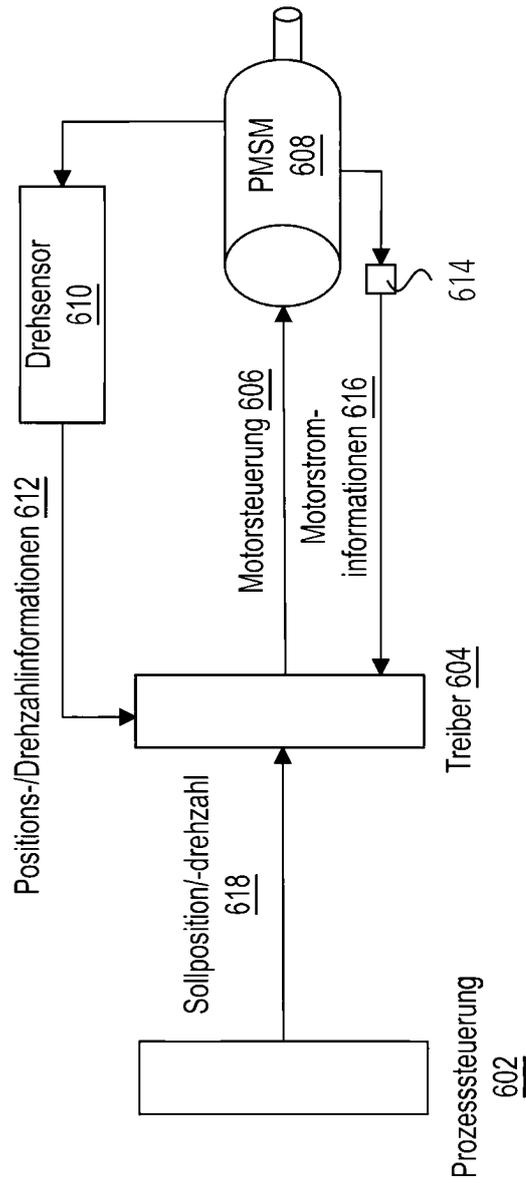


FIG. 6

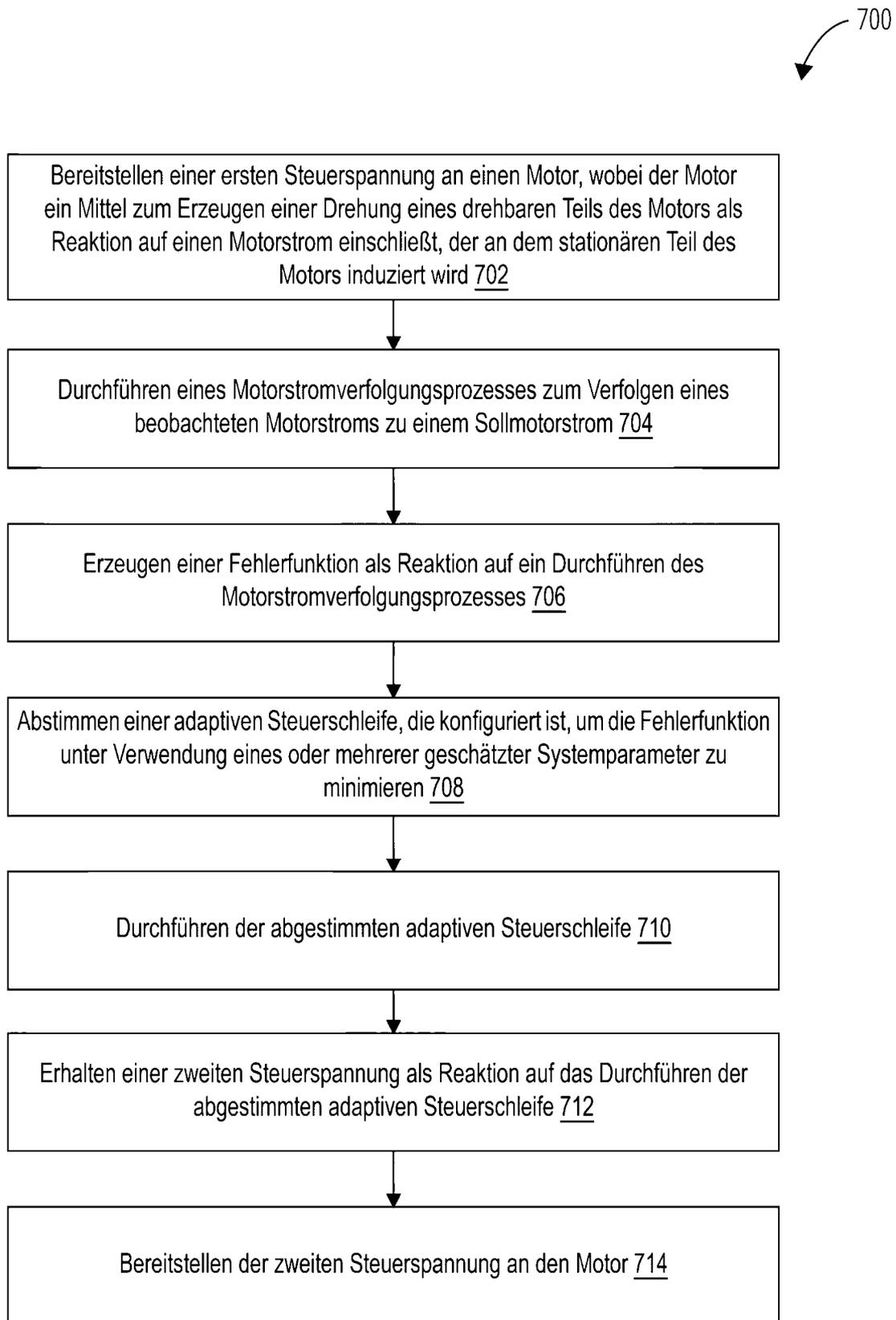


FIG. 7

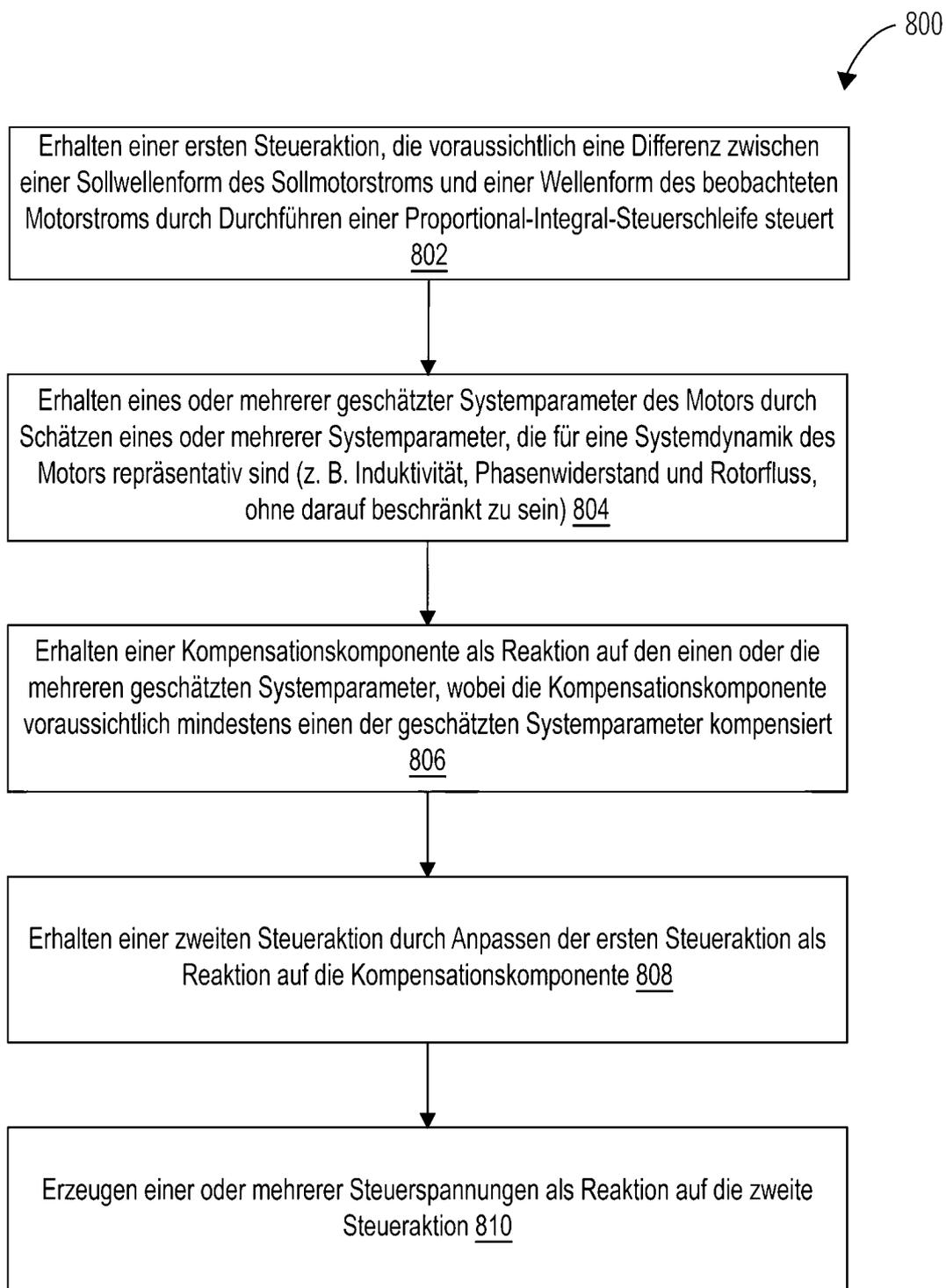


FIG. 8

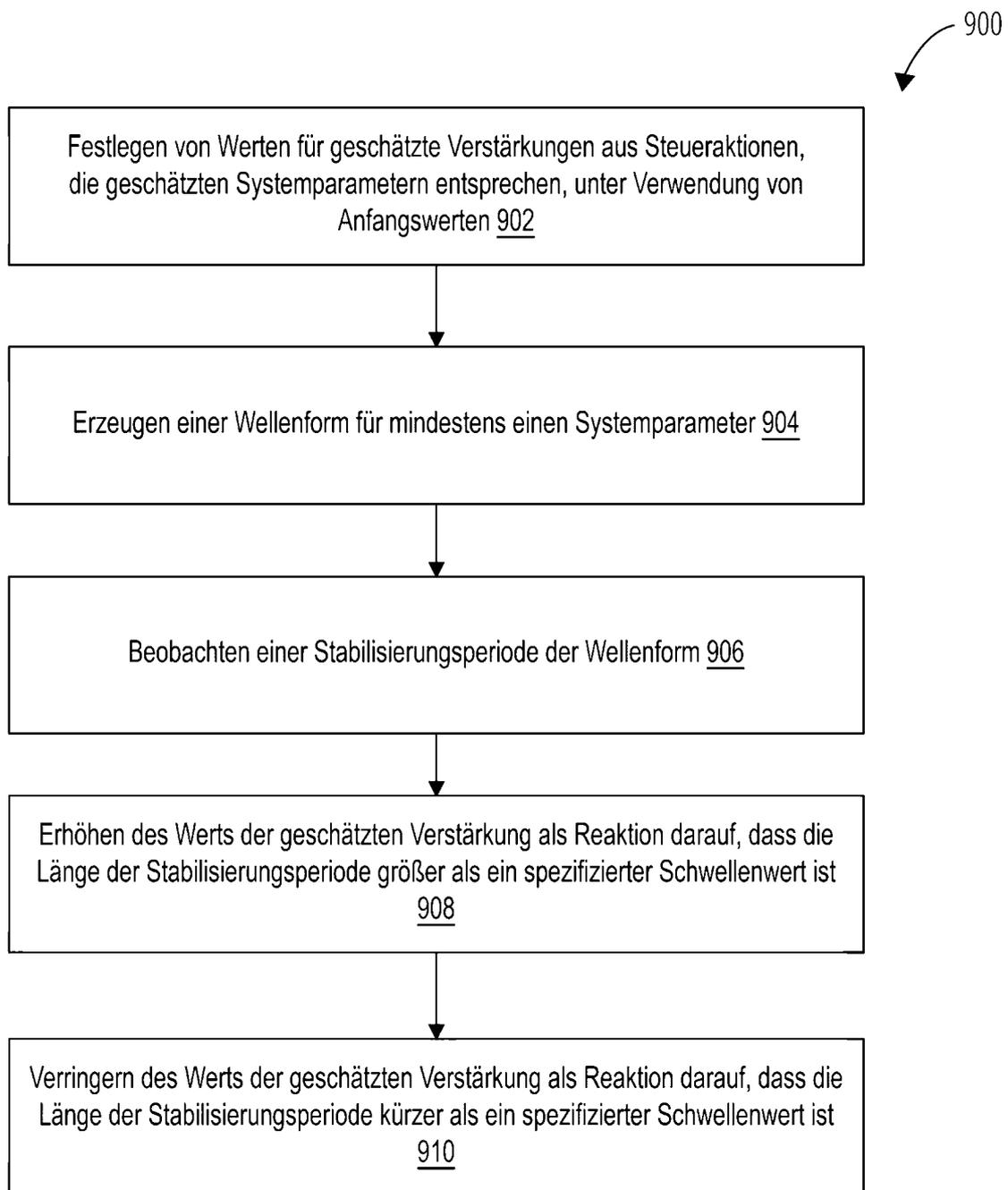
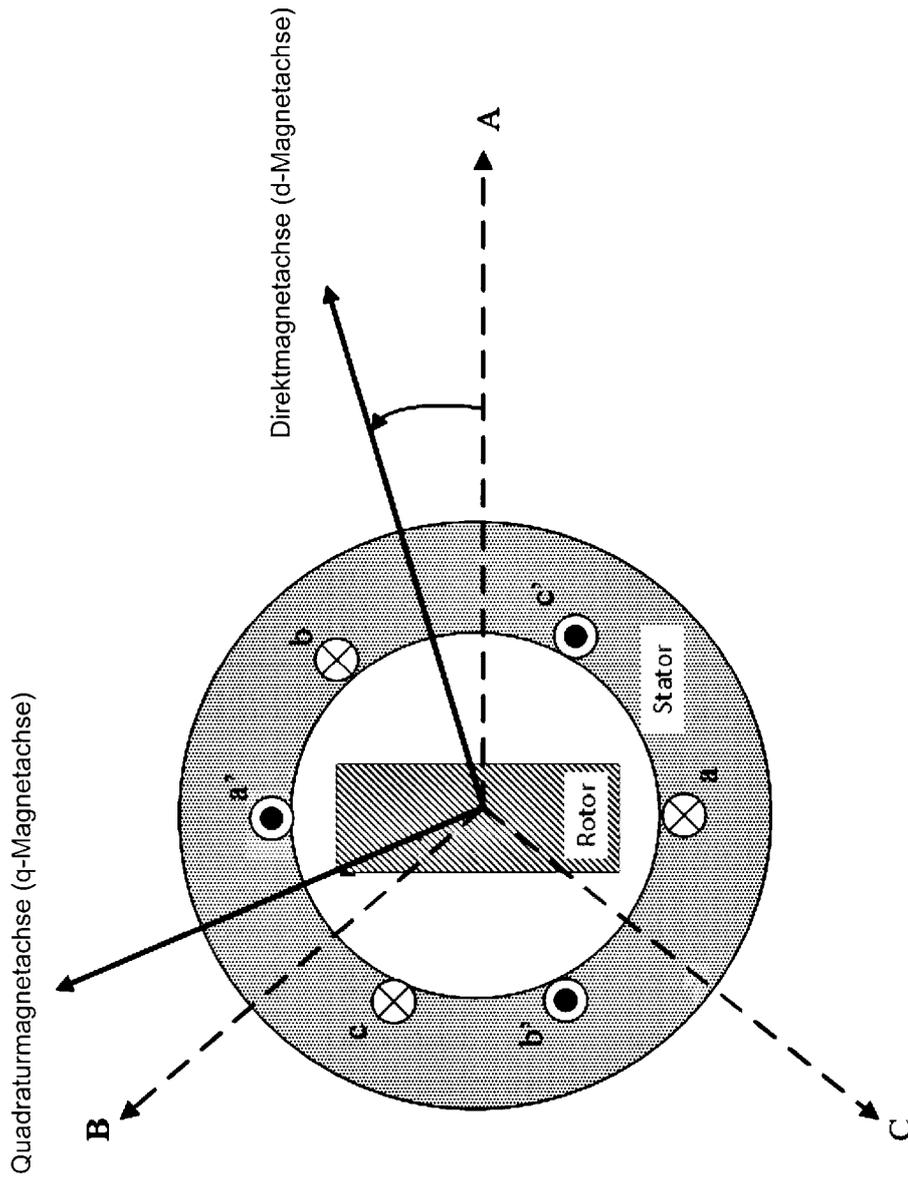


FIG. 9

1000



STAND DER TECHNIK

**FIG. 10**