



(10) **DE 10 2018 218 692 A1** 2020.04.30

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2018 218 692.8**

(22) Anmeldetag: **31.10.2018**

(43) Offenlegungstag: **30.04.2020**

(51) Int Cl.: **G01R 31/34** (2006.01)

(71) Anmelder:

Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

(72) Erfinder:

Wang, Yi, 74343 Sachsenheim, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

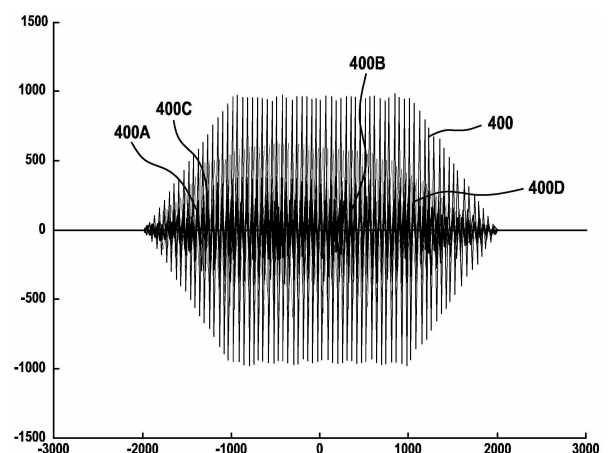
DE	10 2017 214 363	A1
WO	2017/ 129 285	A1

Rechercheantrag gemäß § 43 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Erkennen eines Fehlerzustands einer elektrischen Maschine**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Erkennen eines Fehlerzustands (100A, 100B, 100C, 100D) einer elektrischen Maschine (100) mit einem Rotor (120), einem Stator (110) und einer mit dem Stator (110) verbundenen Gleichrichterschaltung (130), wobei ein zeitlicher Verlauf (200A, 200B, 200C, 200D) eines Anschlusswerts (UB+; IB+) der elektrischen Maschine (100) erfasst wird (310), wobei aus dem erfassten zeitlichen Verlauf (200A, 200B, 200C, 200D) des Anschlusswerts (UB+, IB+) ein Evaluationswert (300A, 300B, 300C, 300D) bestimmt wird (320), wobei der bestimmte Evaluationswert (300A, 300B, 300C, 300D) mit einem Referenzwert (300) korreliert wird (330) und wobei in Abhängigkeit von einem Korrelationsergebnis (400A, 400B, 400C, 400D) bewertet wird, ob ein Fehlerzustand (100A, 100B, 100C, 100D) der elektrischen Maschine vorliegt (341) oder nicht (342).



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Erkennen eines Fehlerzustands einer elektrischen Maschine sowie eine Recheneinheit und ein Computerprogramm zu dessen Durchführung.

Stand der Technik

[0002] Um Netze bzw. Laststromkreise zu versorgen, können verschiedene Arten von Stromerzeugern verwendet werden. Beispielsweise kann mittels Drehstromgeneratoren ein mehrphasiger Strom erzeugt werden. Zur Speisung von Gleichstromnetzen aus derartigen Drehstromgeneratoren können als Gleichrichter betriebene Umrichter eingesetzt werden, um einen von der Drehstromquelle erzeugten mehrphasigen Strom in Gleichstrom zu wandeln. Die Gleichrichtung kann mittels passiver (Dioden) oder aktiver (Halbleiterschalter) Gleichrichterelemente erfolgen. Bei einem aktiven Gleichrichter ist neben dem Feldregler auch eine entsprechende Ansteuerung Teil des Generatorreglers. Oftmals können Drehstromgeneratoren als elektrische Maschinen realisiert sein, welche generatorisch betrieben werden können, um elektrische Energie zu erzeugen, oder motorisch, um elektrische Energie in mechanische zu wandeln.

[0003] Beispielsweise können derartige Stromerzeuger in Kraftfahrzeugen zur Versorgung eines Kraftfahrzeugbordnetzes verwendet werden. Eine entsprechende elektrische Maschine kann beispielsweise generatorisch betrieben werden, um das Kraftfahrzeugbordnetz zu versorgen oder eine Kraftfahrzeugbatterie zu laden. Zu diesem Zweck kann die elektrische Maschine über sog. Endstufen bzw. Endstufenschaltung mit dem Bordnetz verbunden oder von diesem getrennt werden.

Offenbarung der Erfindung

[0004] Erfindungsgemäß werden ein Verfahren zum Erkennen eines Fehlerzustands einer elektrischen Maschine sowie eine Recheneinheit und ein Computerprogramm zu dessen Durchführung mit den Merkmalen der unabhängigen Patentansprüche vorgeschlagen. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind Gegenstand der Unteransprüche sowie der nachfolgenden Beschreibung.

[0005] Die elektrische Maschine kann insbesondere als ein Generator ausgebildet sein, z.B. als Klauenpol- oder Schenkelpolgenerator, und/oder insbesondere als eine elektrische Maschine, welche motorisch und/oder generatorisch betrieben werden kann. Die elektrische Maschine weist insbesondere einen Rotor und einen Stator auf sowie eine mit dem Stator verbundene Gleichrichterschaltung zum Gleichrichten einer an dem Stator anliegenden Wechselspannung.

Die Gleichrichterschaltung kann insbesondere Brückenschaltungen aus passiven Schaltelemente, insbesondere Dioden, oder aus aktiven Schaltelementen, insbesondere Halbleiterschalter wie Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistoren (MOSFET), aufweisen.

[0006] Durch die Erfindung wird eine Möglichkeit bereitgestellt, auf einfache Weise unterschiedliche Fehlerzustände der elektrischen Maschine und deren Stärke zu erkennen. Auch eine Klassifikation nach Art, Umfang und Fortschritt des Fehlers ist daher grundsätzlich möglich.

[0007] Im Rahmen des Verfahrens wird ein zeitlicher Verlauf eines Anschlusswerts der elektrischen Maschine erfasst, insbesondere eines Spannungswerts oder Stromwerts einer von der elektrischen Maschine bereitgestellten Gleichspannung, insbesondere der gleichgerichteten Generatorspannung oder eines entsprechenden Stroms. Aus dem erfassten zeitlichen Verlauf des Anschlusswerts wird ein Evaluationswert bestimmt. Der bestimmte Evaluationswert wird mit einem Referenzwert korreliert und in Abhängigkeit von einem Korrelationsergebnis wird bewertet, ob ein Fehlerzustand der elektrischen Maschine vorliegt oder nicht.

[0008] Insbesondere ist dieser Referenzwert ein theoretischer Wert, der eine fehlerfreie elektrische Maschine beschreibt. Durch den Vergleich von Referenz- und Evaluationswert können insbesondere unterschiedliche Fehlerzustände der elektrischen Maschine erkannt werden. Für die Fehlererkennung wird somit insbesondere nur ein Signal benötigt, nämlich der zeitliche Spannungsverlauf, welcher insbesondere auf konstruktiv einfache Weise messtechnisch erfasst werden kann und insbesondere im Zuge des regulären Betriebs der elektrischen Maschine ohnehin erfasst wird. Zweckmäßigerweise wird somit keine zusätzliche Hardware beispielsweise in der Form von zusätzlichen Messgeräten benötigt.

[0009] Bei einer fehlerfreien elektrischen Maschine weist der entsprechende Spannungsverlauf insbesondere charakteristische Eigenschaften auf. Der Evaluationswert besitzt dabei einen charakteristischen Wert, welcher insbesondere dem Referenzwert entspricht. Bei Fehlerzuständen der elektrischen Maschine verändern sich die Eigenschaften des Spannungsverlaufs. Je nach vorliegendem Fehlerzustand verändern sich die Eigenschaften auf eine unterschiedliche Art und Weise und somit auch insbesondere der Evaluationswert. Durch Auswerten des Korrelationsergebnisses kann somit auf einen vorliegenden Fehlerzustand, sowie auf eine dessen Art und Umfang, rückgeschlossen werden. Insbesondere ist die Fehlererkennung unabhängig von einer Drehzahl und Belastung der elektrischen Maschine, ein Fehlerzustand kann also bei beliebiger Drehzahl

und Belastung zuverlässig erkannt werden. Auch ist die Art der Fehlerermittlung durch Korrelation mit einem Referenzwert sehr robust gegenüber etwaigen Betriebs- bzw. Störfaktoren, die typischerweise eine Fehlerermittlung erschweren.

[0010] Vorteilhafterweise wird der Evaluationswert und/oder der Referenzwert derart ermittelt, dass der zeitliche Verlauf des Anschlusswerts gefiltert wird, wobei die Filterung vorzugsweise mittels eines Hochpassfilters und/oder eines Tiefpassfilters, besonders bevorzugt eines sog. „moving average filters“ und/oder eines entsprechenden Bandpassfilters erfolgt. Eine Filterung der Eingangsdaten ist vorteilhaft, da man sich hierdurch besonders einfach etwaiger Störeinflüsse wie z.B. Rauschen oder sonstiger, dem Messsignal überlagerter höher- oder niederfrequenter Signale, entledigen kann.

[0011] Bei fehlerfreiem Betrieb der elektrischen Maschine besitzt der zeitliche Spannungsverlauf insbesondere eine charakteristische, sich periodisch wiederholende Form. Dies gilt in der Regel auch für die Spannungsverläufe, die sich im Falle der nachfolgend noch näher beschriebenen Fehlerzustände ergeben, jedoch mit dem Unterschied, dass die jeweiligen hierfür charakteristischen Abfolgen der lokalen Maxima und Minima sich in einer zur Referenz verschiedenen Periodizität oder quasiperiodisch wiederholen. Auch die Abfolge der Maxima und Minima sowie deren jeweiligen Amplituden sind charakteristisch für Art, Umfang und zeitlichen Fortschritt der jeweiligen Fehlerzustände. Demnach kann anhand einer Korrelation des jeweiligen sich aus dem Messwert im Fehlerzustand ergebenden Evaluationswerts und einer entsprechenden Referenz für eine fehlerfreie elektrische Maschine auf Art, Umfang und Fortschritt des Fehlerzustands rückgeschlossen werden.

[0012] Da die Fehlererkennung somit auf Statistik basiert, ist die Genauigkeit der Fehlererkennung insbesondere abhängig von der Menge der Messdaten, die zur Auswertung herangezogen werden. Je mehr Messdaten berücksichtigt werden, desto genauer ist das Ergebnis, insbesondere die Erkennung auf ein Vorliegen sowie Art und Umfang eines Fehlers der elektrischen Maschine. Vorzugsweise umfasst die Menge der Messdaten mindestens 90 Ausführungen des bestimmbar wiederkehrenden Merkmals, insbesondere mindestens 100.

[0013] Zweckmäßigerweise wird der Spannungsverlauf daher für eine Zeitdauer von zwischen 30 ms und 100 ms erfasst, besonders bevorzugt für eine Zeitdauer von genau 50 ms oder zumindest im Wesentlichen 50 ms, bei einer Abtastrate von beispielsweise 10 kHz. Grundsätzlich ist die Anzahl der Ausführungen abhängig von Drehzahl, der Polpaarzahl und der Phasenzahl (s. Gleichung 1). Die Anforderung an Ab-

tastrate ist ebenfalls abhängig von der elektrischen Frequenz.

[0014] Insbesondere ist die Anzahl der bestimmten Ausführungen des wiederkehrenden Merkmals abhängig von der Zeitdauer und einer aktuellen Drehzahl der elektrischen Maschine. Beispielsweise können bei einer Drehzahl von 3000 rpm über eine Zeitdauer von 100 ms 180 Ausführungen des Merkmals bestimmt werden. Bei einer Drehzahl von 1800 rpm können über eine Zeitdauer von 100 ms beispielsweise 108 Ausführungen bestimmt werden.

[0015] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform wird der Evaluationswert und/oder der Referenzwert derart ermittelt, dass zumindest ein statistischer Wert des zeitlichen Verlaufs des Anschlusswerts, insbesondere der Mittelwert und/oder die Varianz bestimmt und der zeitliche Verlauf des Anschlusswerts, insbesondere des bereits gefilterten Anschlusswerts, mit dem statistischen Wert normiert wird. Es kann auch bevorzugt sein, dass die Schritte Normierung und Filterung vertauscht werden.

[0016] Eine derartige Normierung ist vorteilhaft, da die für den jeweiligen Fehlerzustand charakteristischen Verläufe des Anschlusswertes durch eine entsprechend Normierung direkt gegenübergestellt werden können. Durch eine entsprechende Korrelation der Ergebnisse mit einem Referenzwert, der vorzugsweise ebenfalls entsprechend normiert und ggf. gefiltert wird, kann die entsprechende Korrelation im Nachgang ausgewertet werden, um den jeweiligen Fehlerzustand zu ermitteln.

[0017] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform wird das Korrelationsergebnis anhand einer Klassifikationsgröße auf das Vorliegen eines Fehlerzustands der elektrischen Maschine hin bewertet, wobei auf das Vorliegen eines Fehlerzustands entschieden wird, wenn die Klassifikationsgröße einen Schwellwert über- oder unterschreitet. Die Wahl einer entsprechenden Klassifikationsgröße aus dem Korrelationsergebnis ist vorteilhaft, um, insbesondere nach Abgleich mit einem Schwellwert, auf das Vorliegen eines Fehlerzustands zu schließen. Hierbei kommen insbesondere der Verlauf der Maxima der jeweiligen Korrelationsverläufe und/oder die Fläche, die durch die jeweiligen Einhüllenden der jeweiligen Korrelationsverläufe eingeschlossen wird, in Betracht. Diese Klassifikationsgrößen können bei einer Überprüfung mit einem Schwellwert, der sich aus den Daten einer nicht defekten elektrischen Maschine ergibt, abgeglichen und basierend hierauf entschieden werden, ob ein Fehlerzustand vorliegt oder nicht. Der Schwellwert kann sich hierbei insbesondere an den Korrelationsverläufen einer funktionstüchtigen elektrischen Maschine bemessen, die im Wesentlichen die Selbstkorrelation des Referenzsignals im funktionstüchtigen Zustand der elektrischen Maschine dar-

stellt, oder auch aus einem gewissen Toleranzanteil hieraus gebildet werden. Hierbei kommt insbesondere in Betracht, dass eine elektrische Maschine auch dann noch für gut erachtet wird, wenn beispielsweise die Klassifikationsgröße im Falle einer Fläche, die durch die jeweiligen Einhüllenden eingeschlossen wird 90 Prozent, weiter vorzugsweise 80 %, der Referenzfläche einer nicht defekten elektrischen Maschine entspricht.

[0018] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform kann anhand der Klassifikationsgröße und/oder von Art und Umfang der Abweichung zumindest einer Klassifikationsgröße vom Schwellwert auf Art, Umfang und/oder Fortschritt des jeweiligen Fehlerzustands geschlossen werden.

[0019] Durch eine entsprechende Abweichung bzw. einer betragsmäßigen Abweichung vom Schwellwert können die jeweiligen Fehlerzustände grundsätzlich voneinander unterschieden werden. Hierbei ist es in der Regel typisch, dass die jeweiligen Fehlerzustände - insbesondere am Beispiel einer Bewertung anhand der durch die einhüllenden eingeschlossenen Flächen - innerhalb eines Flächenbandes verlaufen. Abhängig davon, in welchem Bereich des Flächenbandes sich die Klassifikationsgröße aus dem Korrelationsergebnis bewegt, kann auf die Schwere des jeweiligen Fehlers geschlossen werden. Wertet man zudem noch den Verlauf der jeweiligen Maxima im Korrelationsergebnis und/oder der Amplituden und/oder der Periodizität der Welligkeit des Korrelationsergebnisses, insbesondere der Einhüllenden, aus, kann anhand der Oberschwingungen ebenfalls auf den Umfang und/oder den Fortschritt des jeweiligen Fehlers rückgeschlossen werden.

[0020] Grundsätzlich sei angemerkt, dass die miteinander korrelierten Verläufe, nämlich der mittels Filterung und Normierung bearbeitete Anschlusswert eines jeweiligen Generators mit einem entsprechenden Referenzverlauf, jedenfalls innerhalb eines entsprechenden Messintervalls einen im Wesentlichen periodischen, zumindest einen quasi-periodischen und somit in ähnlicher Form zeitlich wiederkehrenden Verlauf aufweisen. Im Ergebnis hat somit auch der Korrelationsverlauf aus einem Evaluationswert bzw. Evaluationsverlauf mit einem Referenzverlauf eine entsprechende periodische bzw. quasi-periodische Struktur.

[0021] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform ist die Klassifikationsgröße eine Fläche, die von dem jeweiligen Korrelationsergebnis eingeschlossen wird und/oder eine Einhüllende, die das jeweilige Korrelationsergebnis begrenzt.

[0022] Wie bereits zuvor erwähnt ist es besonders vorteilhaft und einfach in der Auswertung als Klassifikationsgröße die durch eine Einhüllende des Korre-

lationsverlaufs vorgegebene Fläche als Kriterium zur Ermittlung von Art, Umfang und/oder Fortschritt des jeweiligen Fehlerzustandes heranzuziehen, da dieses besonders robust in der Auswertung und im Rahmen einer vorgegebenen Recheneinheit mit sehr geringem Rechenaufwand ermittelbar ist.

[0023] Weiter ist es bevorzugt, zur Korrelation mit den entsprechenden Evaluationswerten einen Referenzwert heranzuziehen, der vorzugsweise aus einem Referenzverlauf des Spannungswerts bei einer fehlerfreien elektrischen Maschine bestimmt wird. Dieser Referenzverlauf kann während eines fehlerfreien Betriebs der elektrischen Maschine, beispielsweise im Zuge eines Herstellungsprozesses, messtechnisch erfasst oder im Zuge eines theoretischen Modells der elektrischen Maschine rechnerisch bestimmt werden und beispielsweise in einem Steuergerät und/oder eine entsprechende Recheneinheit zur Ansteuerung der elektrischen Maschine hinterlegt werden. Diese Daten können dann unter Berücksichtigung entsprechender Betriebsparameter wie z.B. einer Drehzahl oder einer eines angelegten Erregerstroms, in der Recheneinheit hinterlegt werden.

[0024] Zudem kann der Referenzwert bzw. ein Referenzverlauf des Anschlusswerts aus einem Spannungswert, oder einem Stromwert oder einer daraus abgeleiteten Größe ermittelt werden, die anhand einer fehlerfreien elektrischen Maschine bestimmt wird oder entsprechend modellbasiert bestimmt wird.

[0025] Vorteilhafterweise wird in Abhängigkeit von dem Vergleichsergebnis des Korrelationsergebnisses und/oder einer Klassifikationsgröße mit einem Schwellwert bewertet, ob als Fehlerzustand der elektrischen Maschine einer oder mehrere der folgenden Zustände vorliegen:

- eine Unterbrechung in einer Phase, wobei ein erhöhter Widerstand zwischen einem Phasenanschluss des Stators und der Gleichrichterschaltung, insbesondere einem Mittelabgriff einer Halbbrücke der Gleichrichterschaltung, vorliegt;
- ein Kurzschluss zwischen zwei Phasen der elektrischen Maschine, wobei ein verringerter, insbesondere verschwindender Widerstand zwischen zwei Phasenanschlüssen des Stators vorliegt;
- eine Unterbrechung in einem Schaltelementpfad, wobei ein erhöhter Widerstand zwischen zwei Schaltelementen einer Halbbrücke der Gleichrichterschaltung vorliegt;
- ein Kurzschluss in einem Schaltelementpfad, wobei ein verringerter insbesondere verschwindender Widerstand über einem Schaltelement der Gleichrichterschaltung vorliegt.

[0026] Insbesondere kann in Abhängigkeit von der Abweichung des Korrelationsergebnisses und/oder der Klassifikationsgröße von dem Referenzwert die Stärke dieser Fehlerzustände bewertet werden. Je größer der Widerstandwert bei einer Unterbrechung, umso stärker ist der entsprechende Fehlerzustand ausgeprägt. Je kleiner der Widerstandwert bei einem Kurzschluss, umso stärker ist dieser entsprechende Fehlerzustand.

[0027] Vorteilhafterweise wird ein zeitlicher Verlauf eines Spannungswerts einer an einer Gleichrichterschaltung der elektrischen Maschine anliegenden Gleichspannung der elektrischen Maschine erfasst. Der Spannungswert kann insbesondere zwischen Gleichspannungsanschlüssen der elektrischen Maschine bzw. der Gleichrichterschaltung messtechnisch erfasst werden und wird zumeist ohnehin für den regulären Betrieb der elektrischen Maschine erfasst.

[0028] Besonders vorteilhaft eignet sich die Erfindung für die Verwendung in einem Kraftfahrzeug. Durch die elektrische Maschine kann dabei beispielsweise ein Kraftfahrzeugbordnetz gespeist und/oder eine Kraftfahrzeugbatterie geladen werden. Ein Kraftfahrzeugbordnetz kann dabei an Gleichspannungsanschlüsse der Gleichrichterschaltung angeschlossen werden. Insbesondere wird im Rahmen des Verfahrens ein zeitlicher Verlauf einer zwischen diesen Gleichspannungsanschlüssen anliegenden Gleichspannung erfasst und aus diesem Gleichspannungsverlauf wird der Evaluationswert bestimmt. Das Verfahren zum Erkennen eines Fehlerzustands kann dabei beispielsweise von einem Steuergerät des Kraftfahrzeugs durchgeführt werden. Die Erfindung eignet sich beispielsweise besonders für Fahrzeuge mit Funktionen, die erhöhte Sicherheitsanforderungen besitzen, z.B. automatisiertes oder autonomes Fahren, oder für Fahrzeuge mit langen Wartungsintervallen, z.B. Nutzfahrzeuge.

[0029] Eine erfindungsgemäße Recheneinheit, z.B. ein Steuergerät eines Kraftfahrzeugs, ist, insbesondere programmtechnisch, dazu eingerichtet, ein erfindungsgemäßes Verfahren durchzuführen.

[0030] Auch die Implementierung des Verfahrens in Form eines Computerprogramms ist vorteilhaft, da dies besonders geringe Kosten verursacht, insbesondere wenn ein ausführendes Steuergerät noch für weitere Aufgaben genutzt wird und daher ohnehin vorhanden ist. Geeignete Datenträger zur Bereitstellung des Computerprogramms sind insbesondere magnetische, optische und elektrische Speicher, wie z.B. Festplatten, Flash-Speicher, EEPROMs, DVDs u.a.m. Auch ein Download eines Programms über Computernetze (Internet, Intranet usw.) ist möglich.

[0031] Weitere Vorteile und Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung und der beiliegenden Zeichnung.

[0032] Die Erfindung ist anhand von Ausführungsbeispielen in der Zeichnung schematisch dargestellt und wird im Folgenden unter Bezugnahme auf die Zeichnung beschrieben.

Figurenliste

Fig. 1 zeigt schematisch eine elektrische Maschine mit einer bevorzugten Ausgestaltung einer erfindungsgemäßen Recheneinheit, die dazu eingerichtet ist, eine bevorzugte Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens durchzuführen.

Fig. 2 zeigt schematisch ein Spannungs-Zeit-Diagramm eines zeitlichen Verlaufs eines Spannungswerts, welcher im Zuge einer bevorzugten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens bestimmt werden kann.

Fig. 3 zeigt schematisch eine bevorzugte Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens als ein Blockdiagramm.

Fig. 4 bis Fig. 7 zeigen jeweils schematisch eine elektrische Maschine in einem Fehlerzustand und jeweils schematisch ein Spannungs-Zeit-Diagramm eines zeitlichen Verlaufs eines Spannungswerts, welcher im Zuge einer bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens in dem jeweiligen Fehlerzustand der elektrischen Maschine bestimmt werden kann.

Fig. 8 zeigt schematisch Spannungs-Zeit-Diagramme von gefilterten, normierten zeitlichen Verläufen von Spannungswerten, die im Zuge bevorzugter Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens bestimmt werden können.

Fig. 9 zeigt schematisch einen Korrelationsverlauf zwischen einem Referenzsignal und der in den **Fig. 8 a)** bis **Fig. 8 d)** dargestellten Spannungs-Zeit-Diagrammen.

Fig. 10 zeigt schematisch Einhüllende der in **Fig. 9** dargestellten Korrelationsverläufe.

[0033] In **Fig. 1** ist eine elektrische Maschine in Form eines Generators schematisch dargestellt und mit 100 bezeichnet.

[0034] Die elektrische Maschine **100** ist in diesem Beispiel als eine dreiphasige elektrische Maschine ausgeführt, wobei Ständerinduktivitäten (Phasen) eines Stators **110** zu einer Dreieckschaltung verbunden sind. Ein Rotor **120** weist eine Erregerwicklung **121** mit einer parallel geschalteten Diode auf. In einem Erregerstromkreis kann weiterhin ein Erregertransis-

tor **122** vorgesehen sein. Durch Ein- und Ausschalten des Erregertransistors **122**, üblicherweise mittels PWM-Betriebs, wird an die Erregerwicklung **121** eine Spannung (hier die gleichgerichtete Generatorspannung) intermittierend angelegt, worauf sich ein Erregerstrom einstellt. Durch Verändern der Tastrate des PWM-Betriebs sind insbesondere die Höhe des Erregerstroms und damit die Höhe der Generatorspannung veränderbar.

[0035] Die elektrische Maschine **100** weist weiterhin eine mit dem Stator **110** verbundene Gleichrichterschaltung **130** mit drei Halbbrücken zum Gleichrichten einer an dem Stator **110** anliegenden dreiphasigen Wechselspannung auf. Jede Halbbrücke weist zwischen ihren zwei hier als Dioden ausgebildeten Gleichrichtelementen jeweils einen Mittelabgriff auf, über welchen die jeweilige Halbbrücke mit einem Phasenanschluss des Stators **110** verbunden ist.

[0036] Zwischen zwei Gleichspannungsanschlüssen **140** der Gleichrichterschaltung **130** wird eine Gleichspannung **UB+** als gleichgerichtete Generatorspannung bereitgestellt. Die elektrische Maschine **100** kann beispielsweise in einem Kraftfahrzeug zum Versorgen eines Kraftfahrzeugbordnetzes verwendet werden, welches mit den Gleichspannungsanschlüssen **140** verbunden ist.

[0037] Eine Recheneinheit **150** ist zum Ansteuern der elektrischen Maschine **100** vorgesehen. Beispielsweise kann die Recheneinheit **150** als ein Steuergerät des entsprechenden Kraftfahrzeugs ausgebildet sein. Die Recheneinheit **150** ist dazu eingerichtet, eine Erkennung von Fehlerzuständen der elektrischen Maschine durchzuführen. Zu diesem Zweck ist die Recheneinheit **150**, insbesondere programmtechnisch, dazu eingerichtet, eine bevorzugte Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens durchzuführen.

[0038] In **Fig. 2** ist in einem Spannungs-Zeit-Diagramm der zeitliche Verlauf **200** der Gleichspannung **UB+** bei einem fehlerfreien Zustand der elektrischen Maschine **100** schematisch dargestellt.

[0039] Dieser Spannungsverlauf **200** ist insbesondere Grundlage für einen möglichen Referenzverlauf **200** der Gleichspannung **UB+** im fehlerfreien Zustand der elektrischen Maschine **100** und kann beispielsweise während eines fehlerfreien Betriebs der elektrischen Maschine **100**, beispielsweise im Zuge eines Herstellungsprozesses, messtechnisch erfasst oder im Zuge eines theoretischen Modells der elektrischen Maschine **100** rechnerisch bestimmt werden. Auch eine weitere messtechnische Verarbeitung dieses Signals, insbesondere eine Filterung, Glättung und/oder Normierung ist möglich, um eine Signalgüte zu erhöhen.

[0040] Der zeitliche Verlauf **200** der Gleichspannung **UB+** hat eine typische Form, die insbesondere von der Anzahl der Phasen n_{phase} , der Anzahl der Polpaare n_{pol} und der Drehzahl n_{gen} der elektrischen Maschine **100** abhängig ist. Insbesondere kann eine Periode T_{el} des zeitlichen Verlaufs dieser Gleichspannung wie folgt berechnet werden:

$$\frac{1}{T_{el}} = \frac{2 * n_{pol} * n_{phase} * n_{gen}}{60}$$

(Gleichung 1)

[0041] Wie in **Fig. 2** zu erkennen ist, besitzt der zeitliche Verlauf **200** der Gleichspannung **UB+** bei fehlerfreiem Zustand der elektrischen Maschine **100** in jeder Periode ein lokales Extremum bzw. einen lokalen Peak an derselben oder im Wesentlichen derselben Position. Insbesondere entspricht dieser lokale Peak einem Maximalwert einer Halbwelle in dieser Anwendung. Bei gleichbleibender Drehzahl ist der Abstand zwischen zwei benachbarten lokalen Extrema idealerweise konstant bzw. die Extrema liegen immer an derselben Position.

[0042] Bei einem Fehlerzustand der elektrischen Maschine **100** verändert sich die Form bzw. die charakteristischen lokalen Maxima und Minima im Spannungsverlauf der Gleichspannung **UB+** in Abhängigkeit von dem vorliegenden Fehlerzustand und der Stärke des jeweiligen Fehlers. Entsprechendes gilt auch für einen Strom **IB+** oder einer aus der Gleichspannung **UB+** oder dem Strom **IB+** abgeleiteten Größe **XB+**. Somit verändert sich ebenfalls die Verteilung der lokalen Peaks sowie deren charakteristische Form und deren zeitlicher Verlauf, insbesondere unter Heranziehung einer Halbwertsbreite oder Periodizität oder einer sonstigen für den zeitlichen Verlauf eines Peaks charakteristischen Größe. Wird nun ein derartiges Fehlerbild, das im Vorfeld noch einer Datenaufbereitung, insbesondere einer Filterung und/oder Normierung, unterzogen wird, mit einem Referenzsignal korreliert kann anhand des Korrelationsergebnisses **400**, **400A**, **400B**, **400C**, **400D** bewertet werden, ob und in welchem Umfang oder Ausprägung ein jeweiliger Fehlerzustand **100A**, **100B**, **100C**, **100D** der elektrischen Maschine **100** vorliegt.

[0043] Eine bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens, welches zweckmäßigerweise von dem Steuergerät **150** durchgeführt werden kann, ist in **Fig. 3** schematisch als ein Blockdiagramm dargestellt.

[0044] Im laufenden Betrieb der elektrischen Maschine **100** wird in Schritt **310** der zeitliche Verlauf der Gleichspannung **UB+**, beispielsweise für eine Zeitdauer von 10 ms (vgl. insbesondere **Fig. 8**), erfasst.

[0045] In Schritt **320** wird aus diesem erfassten zeitlichen Verlauf der Gleichspannung **UB+** ein Evaluationswert bestimmt. Da die Rohdaten **200**, **200A**, **200B**, **200C**, **200D** der Messung mit Störungen und Rauschen behaftet sein können, werden die Rohdaten **200**, **200A**, **200B**, **200C**, **200D**, also der erfasste zeitliche Verlauf der Gleichspannung **UB+**, oder einer entsprechenden Größe **IB+**, **XB+** zunächst in einem optionalen Schritt **321** durch ein Filter geglättet. Die Filterung kann hierbei vorzugsweise durch einen Bandpassfilter erfolgen. Auch ein Hoch- und/oder Tiefpassfilter können bevorzugt sein. Die geglätteten Daten werden in Schritt **322** mittels ihres Mittelwerts und der Varianz optional normiert, beispielsweise durch Subtraktion ihres Mittelwerts, damit die Signalverläufe deutlicher werden.

[0046] Eine Normierung ergibt sich insbesondere aus:

$$X_i = (X_{i0} - \text{mean}(X)) / \text{sqrt}(\text{var}(X)),$$

(Gleichung 2)

wobei

X der Vektor des Signals ist,

X_{i0} der Index-Wert in dem Vektor ist,

$\text{mean}(X)$ der Mittelwert ist,

$\text{var}(X)$ die Varianz ist,

$\text{sqrt}(\text{var}(x))$ die Standardabweichung ist.

Durch eine derartige Normierung wird das Korrelationsergebnis nicht durch eine Änderung der Amplitude lokal verkleinert oder vergrößert, weswegen die Korrelationsergebnisse miteinander vergleichbar werden.

[0047] Somit wird aus den gefilterten und normierten Anschlusswerten Evaluationswerte **300A**, **300B**, **300C** und **300D** und ein entsprechend bereinigter Referenzwert **300** generiert, auf deren Basis eine entsprechend sichere und robuste Fehlerermittlung gewährleistet ist, da die jeweiligen Werte und Verläufe der Störung bereinigt und durch die Normierung entsprechend vergleichbar gemacht werden. Die Vergleichbarkeit der Evaluationswerte **300A**, **300B**, **300C** und **300D** eignen sich daher auch besonders für eine statistische Weiterverarbeitung und einer entsprechenden Extraktion eines Bewertungsergebnisses im Hinblick auf einen Fehlerzustand **100A**, **100B**, **100C** und **100D**.

[0048] In Schritt **330** werden nun die Evaluationswerte **300A**, **300B**, **300C** und **300D** mit dem Referenzwert **300** korreliert. Bei der Korrelation wird insbesondere mittels einer Korrelationsfunktion quantifiziert, wie groß der jeweilige Evaluationswert bzw. Evaluationswerteverlauf **300A**, **300B**, **300C** und

300D insbesondere innerhalb eines vorgegebenen Intervalls mit einem entsprechenden Intervall eines Referenzverlaufs **300** übereinstimmt. Zur Ermittlung des Korrelationsergebnisses kann auf Standardfunktionen wie die sog. Kreuzkorrelationsfunktion zurückgegriffen werden. Hierbei wird ein Signal gegenüber einem anderen Signal in einem Zeitabschnitt von ganz „links“ nach ganz „rechts“ Schritt für Schritt verschoben. Zu jedem Schritt werden die überlagerten Werte miteinander multipliziert. Die Ergebnisse der Multiplikation werden dann addiert und als der Korrelationsindex für die jeweilige Stelle gesetzt.

[0049] Ergebnis dieser Korrelation ist das Korrelationsergebnis **400**, **400A**, **400B**, **400C** und **400D**, bei der sowohl die Evaluationswerte **300A**, **300B**, **300C** und **300D** mit dem Referenzwert **300** als auch der Referenzwert **300** mit sich selbst korreliert werden (Selbstkorrelation **400**). Das Korrelationsergebnis **400**, **400A**, **400B**, **400C** und **400D** ist somit ein Maß für die Übereinstimmung der jeweiligen Evaluationswerte mit dem Referenzwert **300** bzw. des Referenzwert mit sich selbst.

[0050] In Schritt **332** wird eine Klassifikationsgröße **K**, **KA**, **KB**, **KC**, **KD** ermittelt, anhand der auf das Vorliegen sowie auf Art, Umfang und Fortschritt eines Fehlerzustands **100A**, **100B**, **100C** und **100D** rückgeschlossen werden kann. Hierbei kann die Klassifikationsgröße **K**, **KA**, **KB**, **KC**, **KD** gegeben sein durch eine Einhüllende **600**, **600A**, **600B**, **600C**, **600D** des Korrelationsergebnisses **400**, **400A**, **400B**, **400C** und **400D** (vgl. hierzu **Fig. 10**). Die Klassifikationsgröße **K**, **KA**, **KB**, **KC**, **KD** kann auch durch die innerhalb der durch die jeweiligen Verläufe der Korrelationsergebnisse, **400**, **400a**, **400b**, **400c** und **400d** und/oder innerhalb der jeweiligen Einhüllenden **600**, **600A**, **600B**, **600C**, **600D** eingeschlossenen Flächen **500**, **500A**, **500B**, **500C**, **500D** gegeben sein.

[0051] In Schritt **333** wird nun die entsprechende Klassifikationsgröße **K**, **KA**, **KB**, **KC**, **KD** mit einem Schwellwert **G**, **GA**, **GB**, **GC**, **GD**, vorzugsweise unter zusätzlicher Berücksichtigung einer sinnvollen Toleranzschwelle, verglichen, wobei bei Über- oder Unterschreiten der jeweiligen Toleranzschwelle, ggf. zuzüglich einer etwaigen Toleranzschwelle, erkannt wird, dass kein Fehlerzustand der elektrischen Maschine **100** vorliegt (Schritt **341**) oder bei Überschreiten bzw. Unterschreiten der Klassifikationsgröße bezüglich eines vorgegebenen Schwellwertes **G**, **GA**, **GB**, **GC**, **GD**, gegebenenfalls zuzüglich eines entsprechenden weiteren Toleranzschwellwerts, wird in Schritt **342** auf eine entsprechende Fehlfunktion der elektrischen Maschine **100** geschlossen. Ob nun bei Über- oder Unterschreiten auf einen Fehler oder keinen Fehler bestimmt wird, hängt insbesondere davon ab, ob es sich betragsmäßig um eine untere Schranke oder eine obere Schranke handelt. Hierbei kommt insbesondere in Betracht, dass eine elektri-

sche Maschine **100** auch dann noch für fehlerfrei erachtet wird, wenn beispielsweise die Klassifikationsgröße im Falle einer Fläche, die durch die jeweiligen Einhüllenden eingeschlossen wird 90 Prozent, weiter vorzugsweise 80 %, der Referenzfläche einer nicht defekten elektrischen Maschine **100** entspricht.

[0052] Anhand der Klassifikationsgröße und der den jeweiligen Fehlerzuständen **100A**, **100B**, **100C**, **100D** zugeordneten Schwellwerten **G**, **GA**, **GB**, **GC**, **GD**, können die jeweiligen Fehlerzustände **100A**, **100B**, **100C**, **100D** sicher einem entsprechenden Korrelationsergebnis bzw. einer entsprechenden Klassifikation zugeordnet werden. Anhand der Abweichung vom jeweiligen Schwellwert kann auch innerhalb eines Toleranzbandes auf die Schwere des jeweiligen Fehlerzustands geschlossen werden. Zudem können zusätzliche Größen, wie z.B. das Ausmaß der Welligkeit bzw. die Amplitude und/oder Periodizität der Welligkeit innerhalb des Korrelationsergebnisses **400**, **400A**, **400B**, **400C** und **400D** in einem weiteren Schritt **343** ausgewertet und zur Ermittlung von Umfang und zeitlichem Fortschritt des Fehlerzustands **100A**, **100B**, **100C**, **100D** herangezogen werden.

[0053] Die Stärke bzw. der zeitliche Fortschritt des jeweiligen Fehlerzustands **100A**, **100B**, **100C**, **100D** wird vorliegend in Schritt **343** ermittelt.

[0054] Insbesondere wird bei Erkennen eines Fehlerzustands **100A**, **100B**, **100C**, **100D** in Schritt **342** unter Berücksichtigung des Ausmaßes des Fehlers (Schritt **343**) eine Sicherheits- bzw. Selbstschutz-Maßnahme durchgeführt, wodurch eine Warnfunktion aktiviert und eine entsprechende Information an den Benutzer ausgegeben werden kann, dass unmittelbar Wartungsmaßnahmen erforderlich sind. Auch eine Begrenzung der Belastung der elektrischen Maschine **100**, insbesondere durch eine auf die Art der Schädigung angepassten begrenzten Erregerstrom, oder eine vergleichbare Maßnahme ist möglich.

[0055] Grundsätzlich versteht sich, dass der Referenzverlauf **200** einer funktionstüchtigen elektrischen Maschine **100**, der als Grundlage für die weitergehenden Größen wie den Referenzwert **300** dienen, bei entsprechenden Drehzahlen der elektrischen Maschine **100** im Rahmen von Kennfeldern in einem Steuergerät **150** hinterlegt sein können. Der Referenzverlauf kann jedoch auch alternativ oder kumulativ im Rahmen eines theoretischen Modells innerhalb des Steuergeräts **150** ermittelt werden.

[0056] Grundsätzlich können die Schwellwerte **G**, **GA**, **GB**, **GC**, **GD** derart gewählt werden, dass sie einerseits sicher eine Fehlfunktion **100A**, **100B**, **100C**, **100D** widerspiegeln, aber andererseits auch eine entsprechende Abgrenzung der jeweils verschiedenen Fehlerzustände **100A**, **100B**, **100C**, **100D** zulassen. Somit können entsprechende Schwellwertbän-

der vorgegeben werden, die insbesondere die zuvor beschriebenen Kriterien erfüllen. Diese Schwellwertbänder sind in der Regel spezifisch für eine entsprechende elektrische Maschine **100** bzw. die dort verbauten Bauteile und können entsprechend auch im Steuergerät **150** der elektrischen Maschine **100** hinterlegt sein.

[0057] Im Nachfolgenden werden in Bezug auf die **Fig. 4** bis **Fig. 9** unterschiedliche Fehlerzustände der elektrischen Maschine beschrieben und wie diese Fehlerzustände im Rahmen des Verfahrens erkannt werden können.

[0058] In den **Fig. 4** bis **Fig. 7** ist die elektrische Maschine aus **Fig. 1** schematisch in unterschiedlichen Fehlerzuständen dargestellt. Weiterhin sind in den **Fig. 4** bis **Fig. 7** analog zu **Fig. 2** Spannungsverläufe der Gleichspannung **UB+** schematisch dargestellt, welche in diesen Fehlerzuständen im Rahmen des Verfahrens in Schritt **310** erfasst werden können.

[0059] In **Fig. 4a** ist die elektrische Maschine aus **Fig. 1** in einem ersten Fehlerzustand **100A** schematisch dargestellt. In diesem ersten Fehlerzustand **100A** liegt eine Unterbrechung in einer Phase vor, wobei ein erhöhter (ggf. unendlicher) Widerstand **R₁** zwischen einem Phasenanschluss des Stators **110** und einem Mittelabgriff einer Halbbrücke der Gleichrichterschaltung **130** vorliegt. In **Fig. 4b** ist ein zeitlicher Verlauf **200A** der Gleichspannung **UB+** dargestellt, welcher in einem derartigen Fehlerzustand **100A** im Rahmen des Verfahrens in Schritt **310** erfasst werden kann.

[0060] In **Fig. 5a** ist die elektrische Maschine in einem zweiten Fehlerzustand **100B** schematisch dargestellt, in welchem ein Kurzschluss zwischen zwei Phasen der elektrischen Maschine **100** vorliegt, wobei ein verringerter, insbesondere verschwindender Widerstand **R₂** zwischen zwei Phasenanschlüssen des Stators **110** vorliegt. In **Fig. 5b** ist ein zeitlicher Verlauf **200B** der Gleichspannung **UB+** dargestellt, welcher in diesem zweiten Fehlerzustand **100B** im Rahmen des Verfahrens in Schritt **310** erfasst werden kann.

[0061] Ein dritter Fehlerzustand **100C** der elektrischen Maschine ist in **Fig. 6a** dargestellt, wobei eine Unterbrechung in einem Schaltelementpfad der Gleichrichterschaltung **130** vorliegt. Dabei liegt ein erhöhter Widerstand (ggf. unendlicher) **R₃** zwischen zwei Schaltelementen einer der Halbbrücke der Gleichrichterschaltung **130** vor. Ein entsprechender Verlauf **200C** der Gleichspannung **UB+**, welcher in diesem dritten Fehlerzustand **100C** erfasst werden kann, ist schematisch in **Fig. 6b** dargestellt.

[0062] In einem vierten Fehlerzustand **100D** der elektrischen Maschine, der in **Fig. 7a** dargestellt ist,

liegt ein Kurzschluss in einem Schaltelementpfad vor mit einem verringerten, insbesondere verschwindenden Widerstand R_4 über einem Schaltelement der Gleichrichterschaltung **130**. **Fig. 7b** zeigt einen entsprechenden Verlauf **200D** der Gleichspannung **UB+**, welcher in diesem vierten Fehlerzustand **100D** erfasst werden kann

[0063] Analog zu obigen Erläuterungen in Bezug auf **Fig. 3** können diese Verläufe **200A** bzw. **200B** bzw. **200C** bzw. **200D** in Schritt **310** des Verfahrens bestimmt werden, wenn der entsprechende Fehlerzustand **100A** bzw. **100B** bzw. **100C** bzw. **100D** der elektrischen Maschine vorliegt. Gemäß Schritt **321** und **322** werden diese Verläufe **200A** bzw. **200B** bzw. **200C** bzw. **200D** gefiltert und normiert, um im Rahmen der Korrelation und der darauffolgenden weiteren Auswertung eine Fehlerbestimmung zu verbessern.

[0064] Die zu den Verläufen **200A**, **200B**, **200C**, **200D** korrespondierenden gefilterten und normierten Evaluationsverläufe **300A**, **300B**, **300C**, **300D**, **300** sind in den **Fig. 8a** bis **e** dargestellt. Hierbei ist jeweils in den **Fig. 8a** bis **e** lediglich ein Signalverlauf innerhalb des Abschnitts zwischen 0,01 und 0,02 Sekunden repräsentativ für ein etwaiges Messintervall dargestellt. In **Fig. 8f** ist der Referenzverlauf **300** innerhalb des gesamten dargestellten Zeitintervalls aufgetragen.

[0065] In **Fig. 9** sind die jeweiligen Korrelationsverläufe **400A**, **400B**, **400C**, **400D**, **400** der Evaluationswerte **300A**, **300B**, **300C**, **300D** mit dem Referenzwert **300** bzw. die Selbstkorrelation des Referenzwerts **300** mit sich selbst (**400**) dargestellt.

[0066] In **Fig. 10**, auf die unter anderem auch in der Beschreibung zum Verlauf des Verfahrens in **Fig. 3** Bezug genommen wird, ist eine vereinfachte Darstellung des Korrelationsverlaufs **400A**, **400B**, **400C**, **400D**, **400** gezeigt, in denen lediglich der Verlauf der Einhüllenden **600**, **600A**, **600B**, **600C**, **600D** der jeweiligen Korrelationsverläufe **400**, **400A**, **400B**, **400C** und **400D** durch dicken Linien dargestellt sind. Zudem ergeben sich hieraus die entsprechenden Klassifikationsgrößen **KA**, **KB**, **KC**, **KD**, **K**, vorzugsweise die durch die jeweiligen Einhüllenden **600**, **600A**, **600B**, **600C**, **600D** eingeschlossenen Flächen **500**, **500A**, **500B**, **500C**, **500D**. Diese Flächen **500**, **500A**, **500B**, **500C**, **500D** können vorzugsweise im Steuergerät **150** ermittelt werden. Auch eine Ermittlung der Flächen **500**, **500A**, **500B**, **500C**, **500D** und eine generelle Ausführung des Verfahrens in einer externen Recheneinheit ist grundsätzlich möglich. Die Klassifikationsgröße zur Ermittlung von Art, Umfang und zeitlichem Fortschritt eines jeweiligen Fehlerzustands **100A**, **100B**, **100C**, **100D** kann alternativ oder kumulativ auch unter Heranziehung des Verlaufs der

Einhüllenden **600**, **600A**, **600B**, **600C**, **600D** vorgenommen werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Erkennen eines Fehlerzustands (**100A**, **100B**, **100C**, **100D**) einer elektrischen Maschine (**100**) mit einem Rotor (**120**), einem Stator (**110**) und einer mit dem Stator (**110**) verbundenen Gleichrichterschaltung (**130**), wobei ein zeitlicher Verlauf (**200A**, **200B**, **200C**, **200D**) eines Anschlusswerts (**UB+**; **IB+**) der elektrischen Maschine (**100**) erfasst wird (**310**), wobei aus dem erfassten zeitlichen Verlauf (**200A**, **200B**, **200C**, **200D**) des Anschlusswerts (**UB+**, **IB+**) ein Evaluationswert (**300A**, **300B**, **300C**, **300D**) bestimmt wird (**320**), wobei der bestimmte Evaluationswert (**300A**, **300B**, **300C**, **300D**) mit einem Referenzwert (**300**) korreliert wird (**330**) und wobei in Abhängigkeit von einem Korrelationsergebnis (**400**, **400A**, **400B**, **400C**, **400D**) bewertet wird, ob ein Fehlerzustand (**100A**, **100B**, **100C**, **100D**) der elektrischen Maschine vorliegt (**341**) oder nicht (**342**).

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Evaluationswert (**300A**, **300B**, **300C**, **300D**) und/oder der Referenzwert (**300**) derart ermittelt wird, dass der zeitliche Verlauf (**200**, **200A**, **200B**, **200C**, **200D**) des Anschlusswerts (**UB+**; **IB+**) gefiltert wird (**321**).

3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei die Filterung mittels eines Hochpassfilters und/oder eines Tiefpassfilters, vorzugsweise eines Moving Average Filters, und/oder eines entsprechenden Bandpassfilters erfolgt.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Evaluationswert (**300A**, **300B**, **300C**, **300D**) und/oder der Referenzwert (**300**) derart ermittelt wird, dass zumindest ein statistischer Wert des zeitlichen Verlaufs (**200**, **200A**, **200B**, **200C**, **200D**) des Anschlusswerts (**UB+**; **IB+**), insbesondere der Mittelwert und/oder die Varianz, bestimmt und der zeitliche Verlauf (**200**, **200A**, **200B**, **200C**, **200D**) des Anschlusswerts (**UB+**; **IB+**), insbesondere des gefilterten Anschlusswerts (**UB+**, **IB+**), mit dem statistischen Wert normiert wird (**322**).

5. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, wobei das Korrelationsergebnis (**400**, **400A**, **400B**, **400C**, **400D**) anhand einer Klassifikationsgröße (**K**, **KA**, **KB**, **KC**, **KD**) auf das Vorliegen eines Fehlerzustands (**100A**, **100B**, **100C**, **100D**) der elektrischen Maschine (**100**) hin bewertet wird und auf das Vorliegen eines Fehlerzustands (**100A**, **100B**, **100C**, **100D**) entschieden wird, wenn die Klassifikationsgröße (**K**, **KA**, **KB**, **KC**, **KD**) einen Schwellwert (**G**, **GA**, **GB**, **GC**, **GD**) über oder unterschreitet.

6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei anhand der Klassifikationsgröße (K, KA, KB, KC, KD) und/oder von Art und Umfang der Abweichung der Klassifikationsgröße (K, KA, KB, KC, KD) vom Schwellwert (G, GA, GB, GC, GD) auf Art, Umfang und/oder Fortschritt des jeweiligen Fehlerzustands (100A, 100B, 100C, 100D) geschlossen wird (343).

7. Verfahren nach Anspruch 5 oder 6, wobei die Klassifikationsgröße (K, KA, KB, KC, KD) eine Fläche (500, 500A, 500B, 500C, 500D) ist, die vom jeweiligen Korrelationsergebnis (400, 400A, 400B, 400C, 400D) eingeschlossen wird und/oder eine Einhüllende (600, 600A, 600B, 600C, 600D) ist, die das jeweilige Korrelationsergebnis (400, 400A, 400B, 400C, 400D) begrenzt.

8. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, wobei der Referenzwert aus einem Referenzverlauf (200) des Anschlusswerts (UB+, IB+), der insbesondere zumindest einen Spannungswert (UB+) oder zumindest einen Stromwert (IB+) oder eine aus diesen Größen (UB+, IB+) abgeleitete Größe (XB+) aufweist, bei einer fehlerfreien elektrischen Maschine (100) bestimmt wird.

9. Recheneinheit (150), die dazu eingerichtet ist, ein Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche durchzuführen.

10. Computerprogramm, das eine Recheneinheit (150) dazu veranlasst, ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8 durchzuführen, wenn es auf der Recheneinheit (150) ausgeführt wird.

11. Maschinenlesbares Speichermedium mit einem darauf gespeicherten Computerprogramm nach Anspruch 10.

Es folgen 9 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

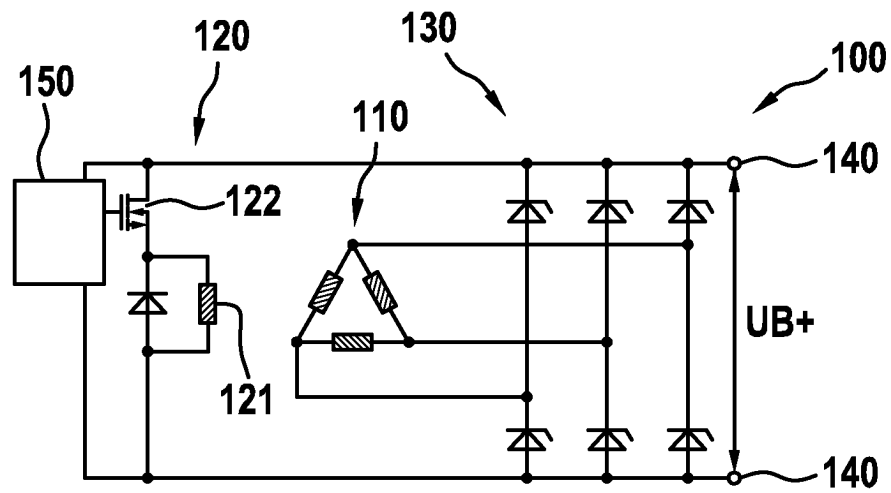


Fig. 2

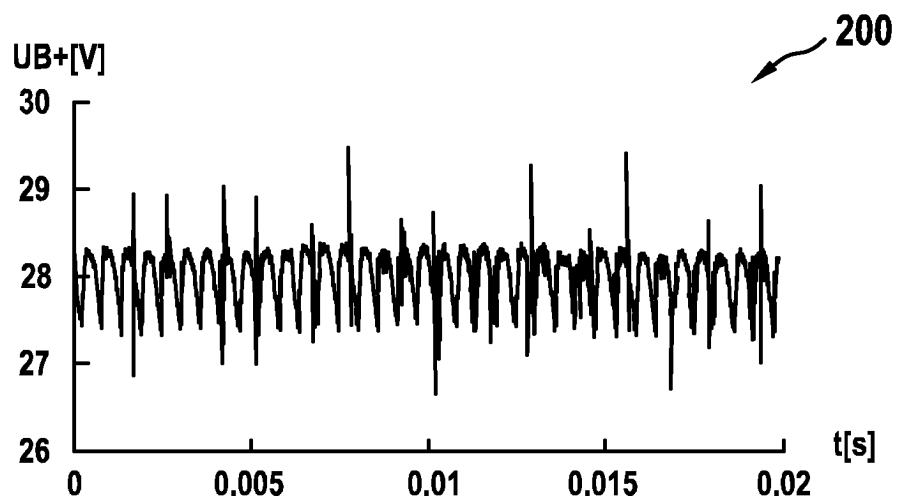


Fig. 3

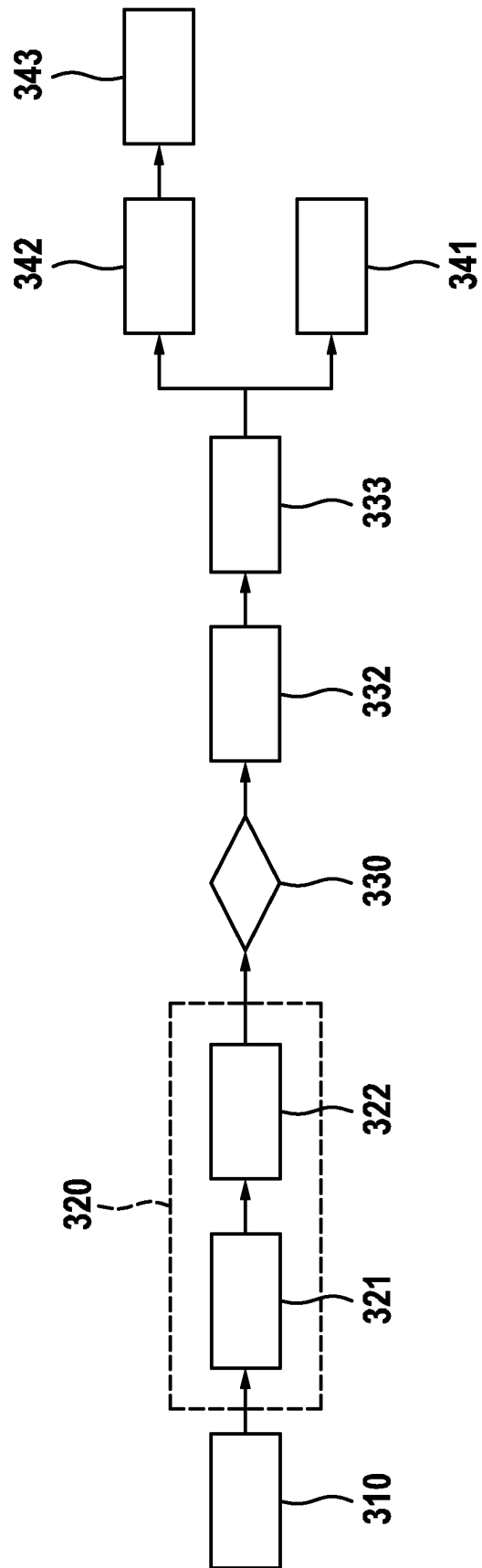


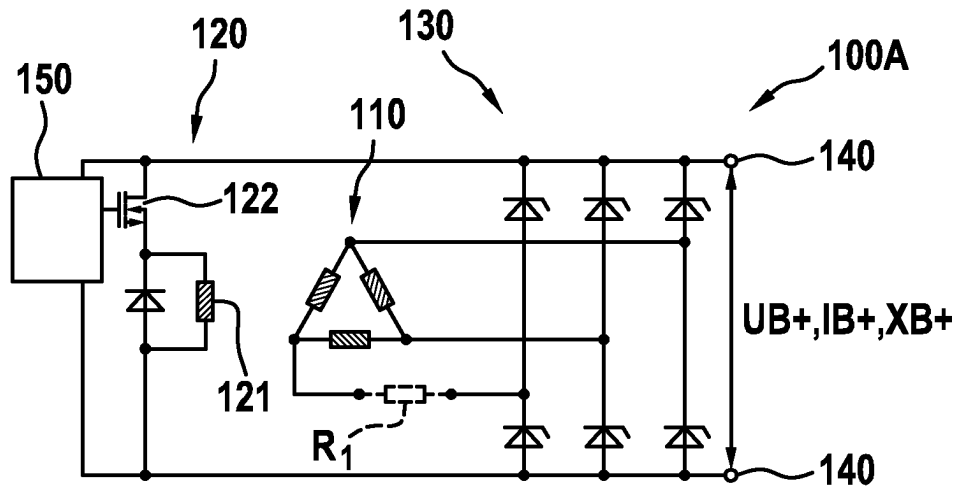
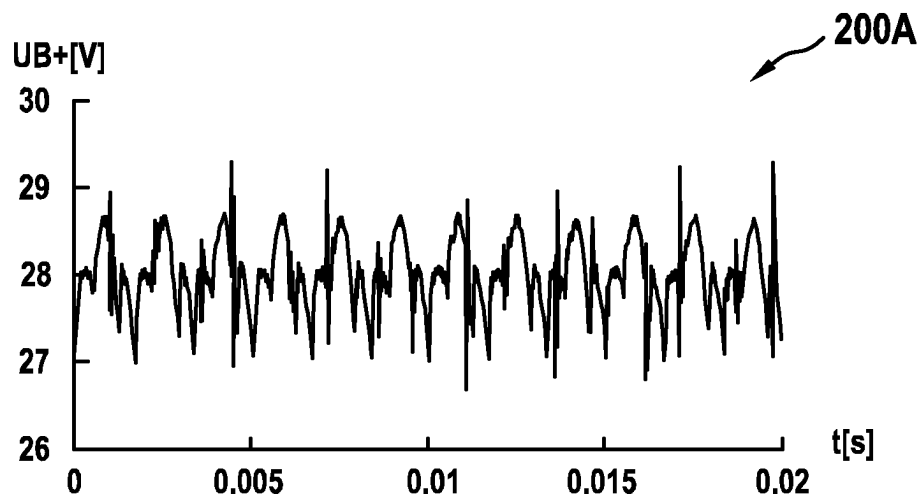
Fig. 4a**Fig. 4b**

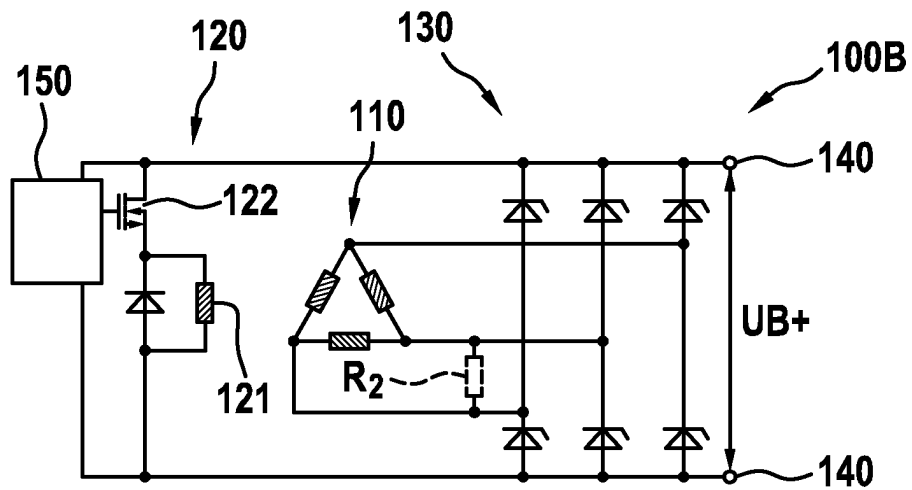
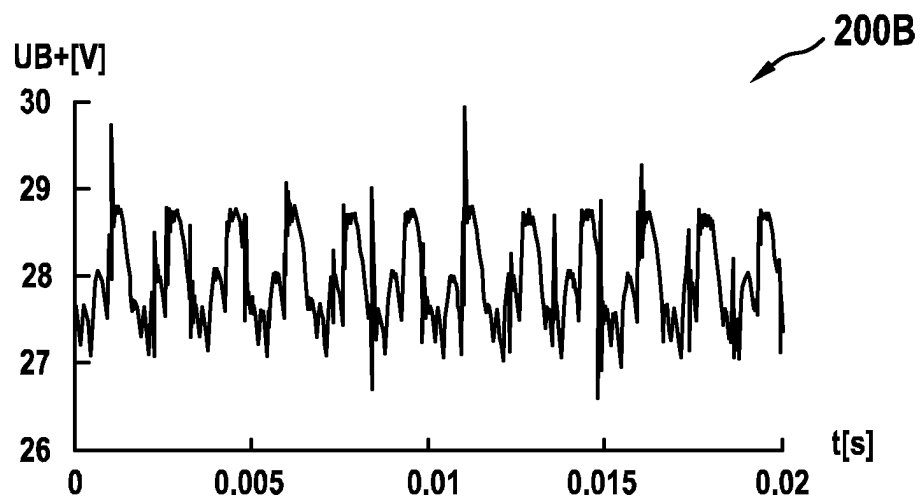
Fig. 5a**Fig. 5b**

Fig. 6a

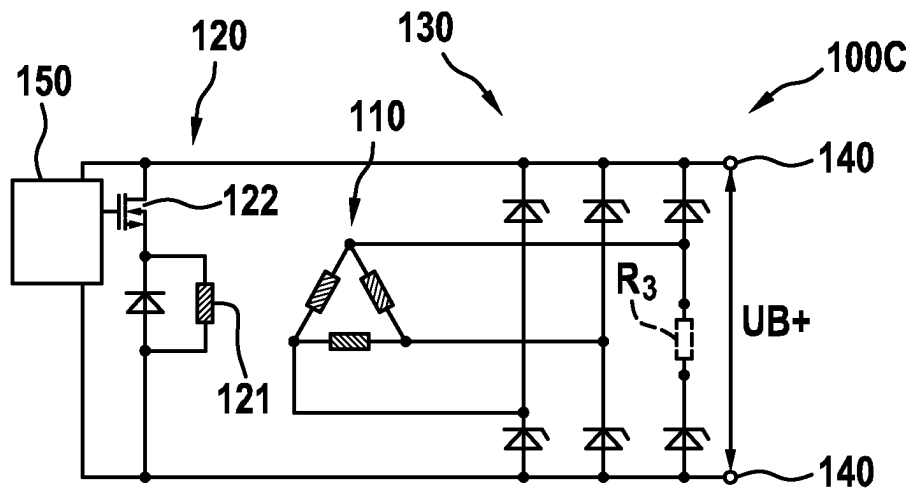


Fig. 6b

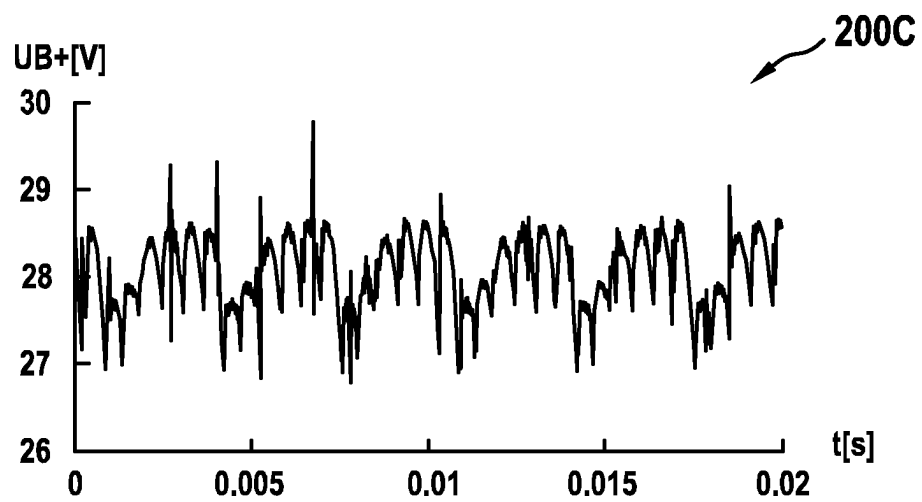


Fig. 7a

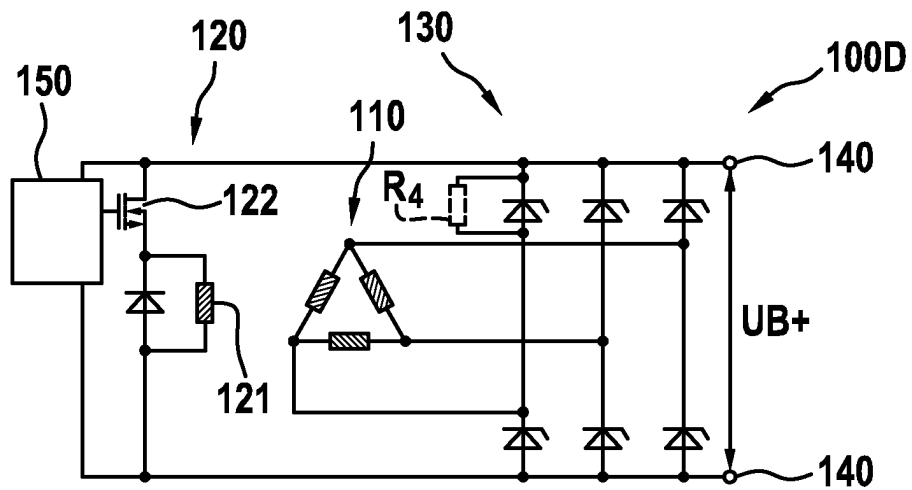
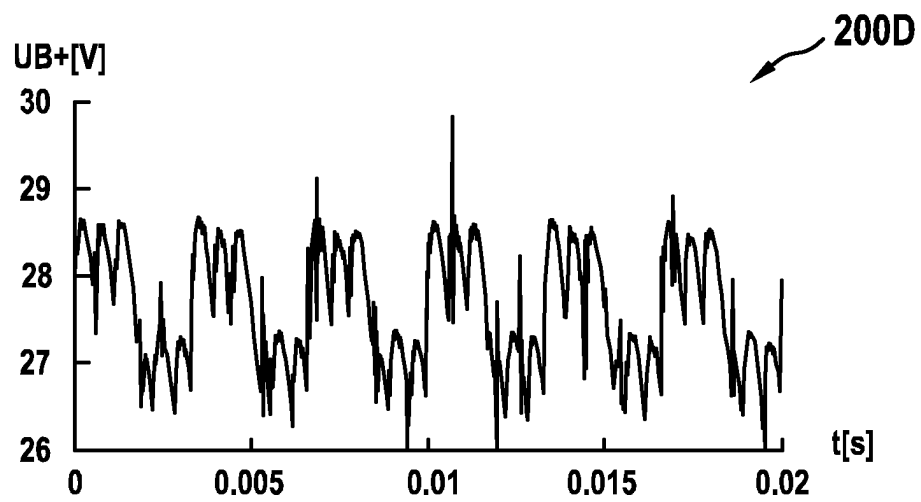
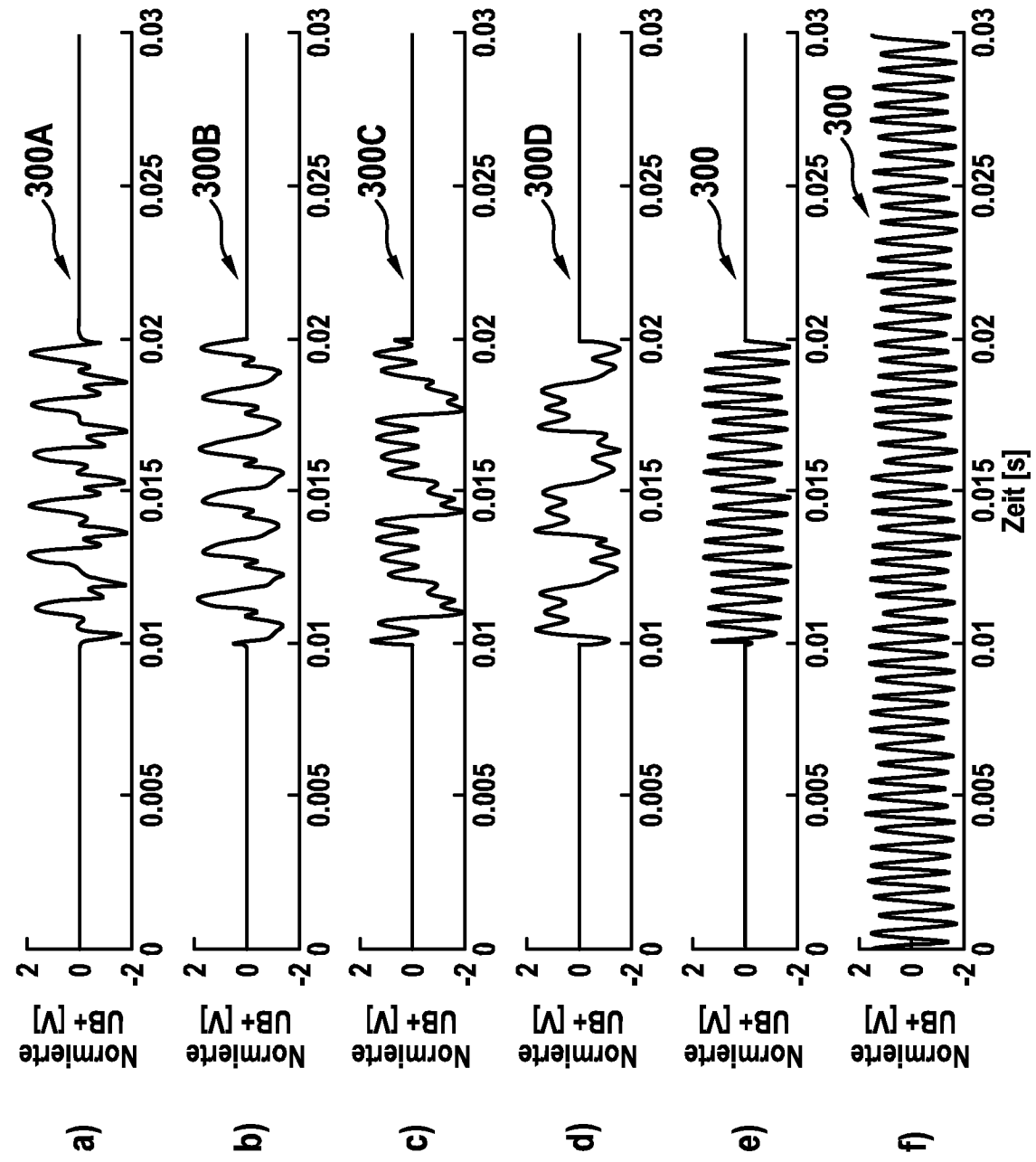


Fig. 7b





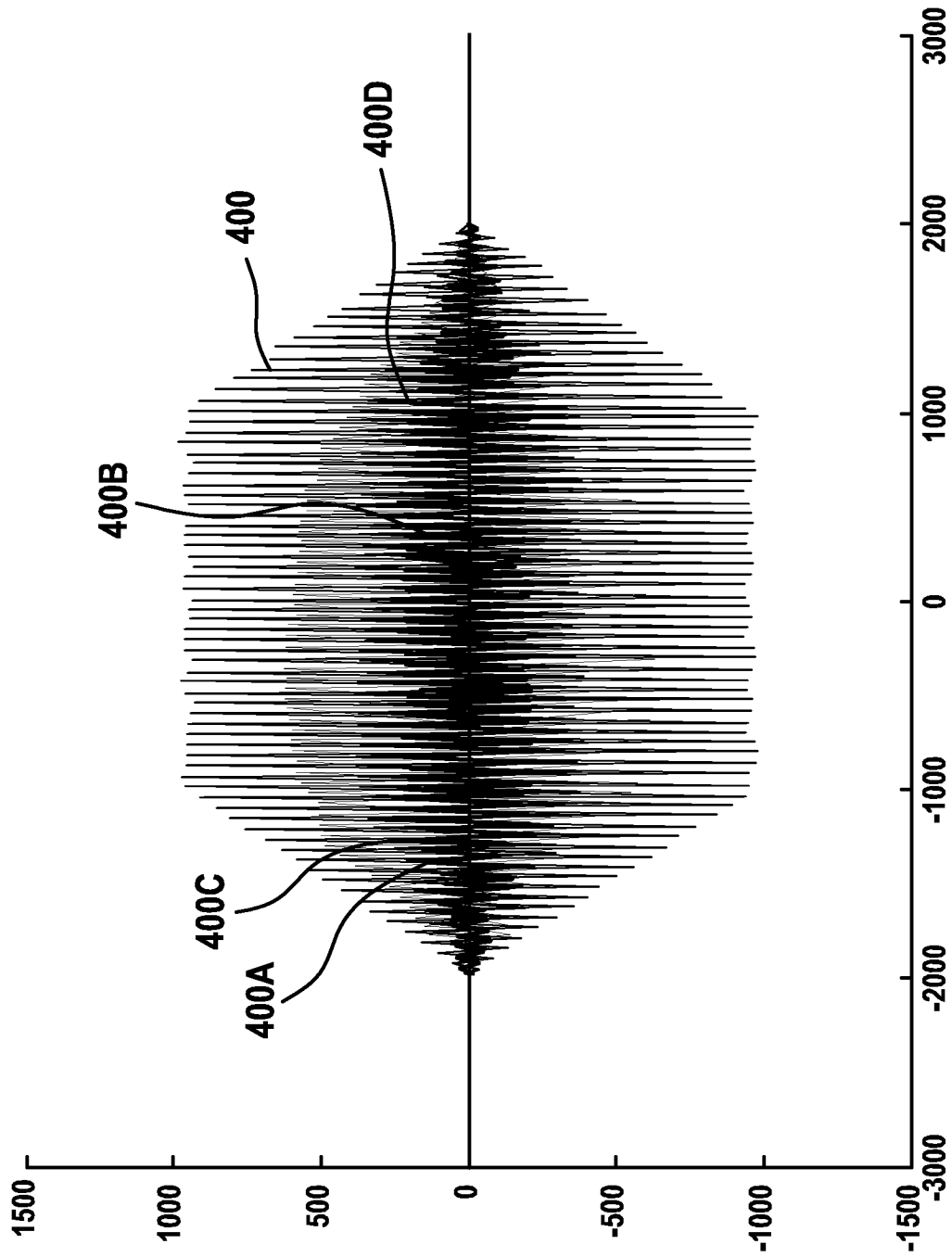


Fig. 9

