

(12)

Patentschrift

|      |                    |              |      |           |                   |           |
|------|--------------------|--------------|------|-----------|-------------------|-----------|
| (21) | Anmeldenummer:     | A 50260/2019 | (51) | Int. Cl.: | <b>H02P 21/00</b> | (2016.01) |
| (22) | Anmeldetag:        | 26.03.2019   |      |           | <b>H02P 15/00</b> | (2006.01) |
| (45) | Veröffentlicht am: | 15.12.2020   |      |           | <b>B60L 7/10</b>  | (2006.01) |
|      |                    |              |      |           | <b>B60L 7/16</b>  | (2006.01) |
|      |                    |              |      |           | <b>B60L 7/18</b>  | (2006.01) |

|      |                                                                         |      |                                                                                                                                                                                   |
|------|-------------------------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (56) | Entgegenhaltungen:<br>EP 2469702 A1<br>CN 103401489 A<br>JP H06105582 A | (73) | Patentinhaber:<br>AVL List GmbH<br>8020 Graz (AT)<br>AVL Software and Functions GmbH<br>93059 Regensburg (DE)                                                                     |
|      |                                                                         | (72) | Erfinder:<br>Deiml Mathias<br>93093 Donaustauf (DE)<br>Scharnagl Michael<br>92712 Pirk (DE)<br>Nuber Florian<br>93138 Lappersdorf (DE)<br>Davydov Vitaly<br>8301 Laßnitzhöhe (AT) |
|      |                                                                         | (74) | Vertreter:<br>Hartinger Mario Dipl.Ing.<br>8020 Graz (AT)                                                                                                                         |

(54) **Verfahren zum Betreiben einer Antriebsvorrichtung, Computerprogrammprodukt, Antriebsvorrichtung sowie Kraftfahrzeug**

(57) Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren (100) zum Betreiben einer Antriebsvorrichtung (10) mit einer elektrischen Maschine (11), die einen Stator (11.1) und einen Rotor (11.2) aufweist, wobei der Rotor (11.2) mit einem drehbaren magnetischen Statorfeld des Stators (11.1) magnetisch koppelbar ist, und das Statorfeld durch eine Mehrphasenschaltung (20) beeinflussbar ist. Ferner betrifft die Erfindung ein Computerprogrammprodukt (300), eine Antriebsvorrichtung (10) sowie ein Kraftfahrzeug (1).

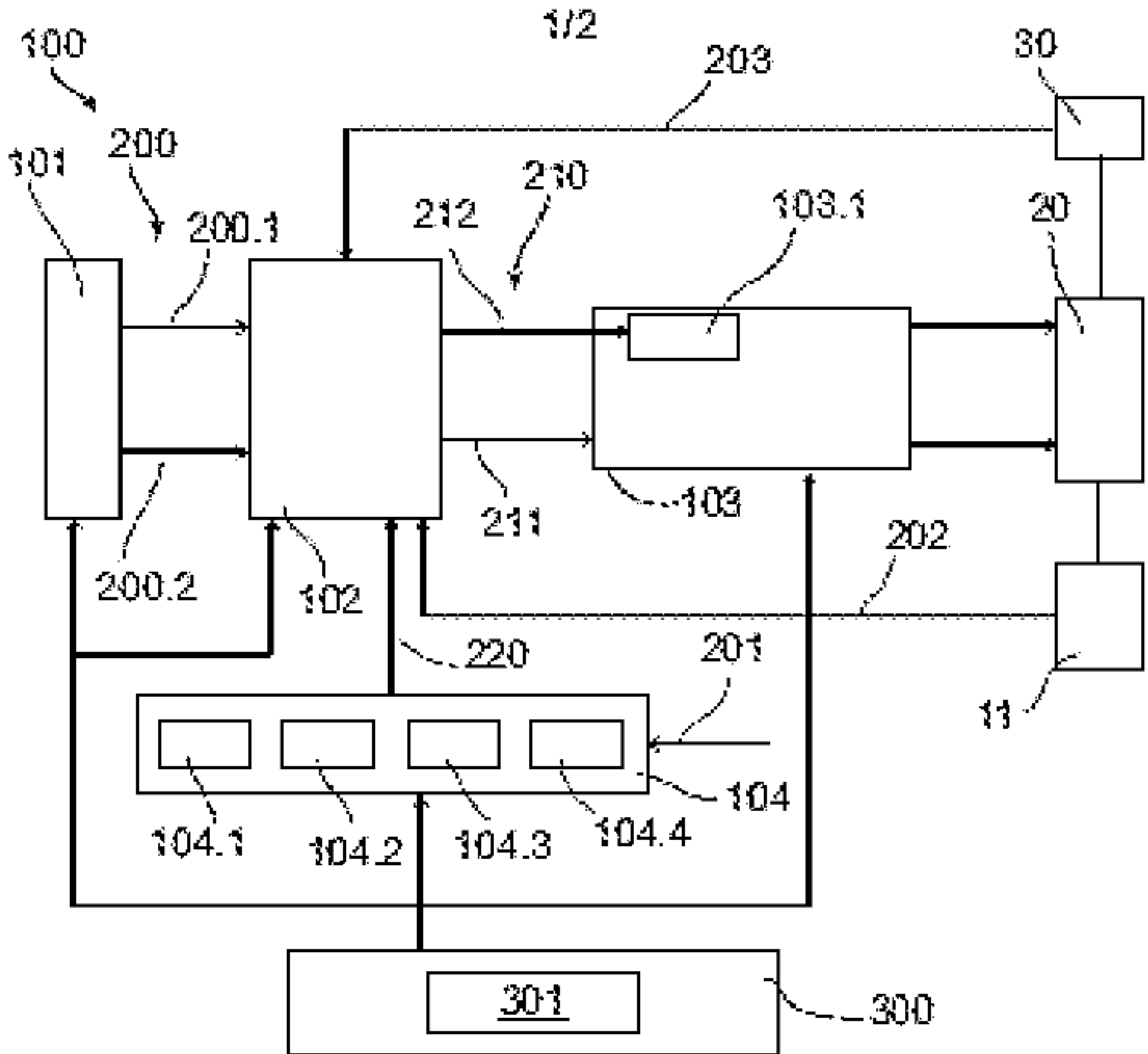


Fig. 1



## Beschreibung

### VERFAHREN ZUM BETREIBEN EINER ANTRIEBSVORRICHTUNG, COMPUTERPROGRAMMPRODUKT, ANTRIEBSVORRICHTUNG SOWIE KRAFTFAHRZEUG

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben einer Antriebsvorrichtung, ein Computerprogrammprodukt, eine Antriebsvorrichtung sowie ein Kraftfahrzeug mit einer Antriebsvorrichtung.

**[0002]** Aus dem Stand der Technik sind elektrische Maschinen in Form von Elektromotoren bekannt, bei denen ein Stator mit einem Rotor über ein drehbares magnetisches Statorfeld wirkt, um den Rotor anzutreiben oder abzubremesen. Dabei ist es in bestimmten Betriebssituationen wünschenswert ein hohes Drehmoment zu erzielen. Insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten können jedoch magnetische Effekte und hohe Ströme auftreten, welche sich schädlich auf die beteiligten Komponenten auswirken können.

**[0003]** Aus der DE 10 2014 203 612 A1 ist ferner ein Verfahren zum Regeln eines Elektromotors bekannt, bei welchem ein Soll-Schlupf vorgegeben wird, um den Betrieb des Elektromotors zu optimieren. Die Ermittlung eines Soll-Schlupfes anhand statischer Randbedingungen kann jedoch bei bestimmten Rotormaterialien zu Ungenauigkeiten bei der Ansteuerung des Drehmomentes führen.

**[0004]** Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, den Betrieb einer elektrischen Maschine in einer Antriebsvorrichtung zu verbessern.

**[0005]** Die voranstehende Aufgabe wird gelöst durch den Gegenstand der jeweiligen Patentansprüche. Insbesondere wird die voranstehende Aufgabe durch ein Verfahren zum Betreiben einer Antriebsvorrichtung gemäß Anspruch 1, ein Computerprogrammprodukt gemäß Anspruch 12, einer Antriebsvorrichtung gemäß Anspruch 13 sowie ein Kraftfahrzeug gemäß Anspruch 20 gelöst.

**[0006]** Weitere Vorteile der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen, der Beschreibung und den Zeichnungen. Dabei gelten Merkmale und Details, die im Zusammenhang mit dem erfindungsgemäßen Verfahren beschrieben worden sind, selbstverständlich auch im Zusammenhang mit dem erfindungsgemäßen Computerprogrammprodukt, der erfindungsgemäßen Antriebsvorrichtung und/oder dem erfindungsgemäßen Kraftfahrzeug und jeweils umgekehrt, so dass bezüglich der Offenbarung zu den einzelnen Erfindungsaspekten stets wechselseitig Bezug genommen wird bzw. werden kann.

**[0007]** Gemäß einem ersten Aspekt der vorliegenden Erfindung ist ein Verfahren zum Betreiben einer Antriebsvorrichtung mit einer elektrischen Maschine beansprucht. Die elektrische Maschine weist einen Stator und einen Rotor auf, wobei der Rotor mit einem drehbaren magnetischen Statorfeld des Stators magnetisch koppelbar ist. Das Statorfeld ist durch eine Mehrphasenschaltung beeinflussbar. Das Verfahren umfasst folgende Schritte:

- Bestimmen eines geforderten Betriebszustandes des Rotors,
- Bestimmen einer Kontrollvorgabe für das Statorfeld zum Erreichen des geforderten Betriebszustands unter Berücksichtigung wenigstens einer veränderlichen elektromagnetischen Zustandsgröße des Rotors, wobei die Kontrollvorgabe einen Soll-Schlupf und einen Soll-Strom der Mehrphasenschaltung umfasst,
- Regeln des Statorfeldes anhand der Kontrollvorgabe zur Regelung des Rotors auf den geforderten Betriebszustand.

**[0008]** Bei der elektrischen Maschine kann es sich vorzugsweise um einen Elektromotor und/oder eine elektromagnetische Bremse handeln. Vorzugsweise kann die elektrische Maschine als Hysteresemotor ausgebildet sein. Das Bestimmen des geforderten Betriebszustandes kann vorzugsweise durch Erfassen eines Wunsches eines Benutzers, z. B. zum Abbremsen des Rotors, umfassen. Weiterhin kann der geforderte Betriebszustand elektronisch vorgegeben sein oder vorgegeben werden, um auf eine bestimmte Betriebssituation der Antriebsvorrichtung zu reagieren.



Insbesondere kann dabei ein bestimmter Zielparameter einen geforderten Wert innerhalb des geforderten Betriebszustandes darstellen, wobei der Zielparameter beim Bestimmen des geforderten Betriebszustandes z. B. messtechnisch erfasst werden kann. Der Soll-Schlupf kann vorzugsweise einen bestimmten Wert umfassen, der im Rahmen der Kontrollvorgabe erforderlich und/oder sinnvoll ist, um den geforderten Betriebszustand zu erreichen. Insbesondere kann unter einem Schlupf eine Differenz aus einer Geschwindigkeit des Rotors und einer Geschwindigkeit des Statorfeldes verstanden werden. Unter der Drehung des Statorfeldes kann insbesondere eine geänderte Magnetisierung und/oder Richtung des Statorfeldes verstanden werden. Dazu wird insbesondere der Schlupf und/oder der Strom beim Regeln des Statorfeldes geändert.

**[0009]** Beim Regeln des Statorfeldes zur Regelung des Rotors auf den geforderten Betriebszustand kann vorzugsweise ein aktueller Betriebszustand erfasst werden und anhand der Kontrollvorgabe korrigiert bzw. angepasst werden. Das Bestimmen der Kontrollvorgabe und das Regeln des Statorfeldes können insbesondere iterativ in Abhängigkeit voneinander ausgeführt werden oder separat voneinander nacheinander. Insbesondere handelt es sich beim Regeln des Statorfeldes um eine Echtzeitregelung.

**[0010]** Der Soll-Strom kann insbesondere einen Einzelwert, einen Vektor und/oder ein Vektorfeld umfassen. Insbesondere kann der Soll-Strom Stromstärken und/oder Spannungswerte für einen D-Strom und/oder einen Q-Strom zum Ansteuern von Phasen der Mehrphasenschaltung umfassen. Die wenigstens eine veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße kann insbesondere von einem Rotormaterial des Rotors und/oder vom geforderten Betriebszustand abhängen. So ist es denkbar, dass die veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße vom aktuellen und/oder geforderten Betriebszustand abhängt. Insbesondere kann die Berücksichtigung der wenigstens einen veränderlichen elektromagnetischen Zustandsgröße somit eine Voraussage der veränderlichen elektromagnetischen Zustandsgröße für den geforderten Betriebszustand umfassen. Die veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße kann direkt oder indirekt beim Bestimmen der Kontrollvorgabe berücksichtigt werden. So ist es denkbar, dass eine Berücksichtigung der veränderlichen Zustandsgröße dadurch erfolgt, dass Effekte, die durch die veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße hervorgerufen werden, berücksichtigt werden.

**[0011]** Ferner kann die Kontrollvorgabe eine absolute und/oder eine relative Kontrollvorgabe sein. Bei einer absoluten Kontrollvorgabe kann beispielsweise der Soll-Schlupf und der Soll-Strom unabhängig von einem aktuellen Betriebszustand sein und z. B. an einen weiteren Regelprozessor übergeben werden, der die aktuellen Betriebsparameter entsprechend der Kontrollvorgabe verändert. Ferner kann die Kontrollvorgabe eine relative Kontrollvorgabe sein, bei welcher ein aktueller Betriebszustand berücksichtigt wird, wobei der Soll-Schlupf und der Soll-Strom der Mehrphasenschaltung vom aktuellen Betriebszustand abhängen können.

**[0012]** Durch die Berücksichtigung der veränderlichen elektromagnetischen Zustandsgröße wird eine höhere Genauigkeit zum Erreichen des geforderten Betriebszustandes, z.B. bei einer Verwendung spezieller Rotormaterialien und/oder bei einem geforderten Betriebszustand mit hohen Rotorverlusten, z. B. einer hohen Wärmedissipation aufgrund hoher Ströme am Rotor erzielt. Insbesondere kann ferner eine Berücksichtigung von arbeitspunktabhängigen und/oder temperaturabhängigen Betriebsparametern der elektrischen Maschine vorgesehen sein. Durch die Vorgabe des Soll-Schlupfes können ferner Betriebszustände mit besonders hohen Drehmomenten und/oder hohen Geschwindigkeiten des Rotors angefahren werden. Vorzugsweise kann der Rotor ein Rotormaterial in Form zumindest eines Rotormagneten, insbesondere zumindest eines Permanentmagneten, aufweisen. Bei dem Rotormaterial kann es sich insbesondere um AlNiCo, d.h. insbesondere eine Legierung mit Eisen, Aluminium, Nickel, Cobalt und Kupfer, handeln.

**[0013]** Weiterhin ist es beim erfindungsgemäßen Verfahren denkbar, dass beim Bestimmen der Kontrollvorgabe ein Regelungszusammenhang zwischen einem Schlupf des Rotors, der veränderlichen elektromagnetischen Zustandsgröße des Rotors, und insbesondere dem Soll-Strom und/oder einem weiteren Stromparameter der Mehrphasenschaltung, berücksichtigt wird. Vorzugsweise kann es sich bei dem Regelungszusammenhang um einen nichtlinearen Zusammenhang handeln. So ist es denkbar, dass aufgrund nichtlinearen Materialverhaltens eines Rotorma-



terials die veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße vom Schlupf und vom Soll-Strom und/oder dem weiteren Stromparameter abhängt. Der Regelungszusammenhang kann beispielsweise ein analytisches oder numerisches Modell umfassen, nach welchem der Schlupf die veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße und der Soll-Strom und/oder der weitere Stromparameter miteinander zusammenhängen. Dadurch kann die Genauigkeit beim Erreichen des geforderten Betriebszustands verbessert sein. Ferner kann dadurch ermöglicht sein, dass das Betreiben der elektrischen Maschine für bestimmte Anwendungsbereiche mit einigen Rotormaterialien überhaupt möglich ist.

**[0014]** Vorzugsweise kann zum Bestimmen des geforderten Betriebszustands bei einem erfindungsgemäßen Verfahren ein gefordertes Betriebsparameter der elektrischen Maschine, und/oder eine geforderte Energierückgewinnung erfasst werden. Bei dem geforderten Betriebsparameter kann es sich um ein gefordertes elektrisches Drehmoment des Rotors, einen geforderten Strom und/oder eine geforderte Drehzahl des Rotors handeln. Insbesondere kann es sich bei dem geforderten elektrischen Drehmoment um ein gefordertes elektrisches Bremsdrehmoment handeln. So ist es denkbar, dass eine Pedalstellung in einem Fahrzeug messtechnisch erfasst wird, um eine Drehmomentanforderung zu bestimmen. Ferner ist es denkbar, dass ein gefordertes elektrisches Drehmoment durch ein Fahrassistenzsystem bestimmt wird, insbesondere in Abhängigkeit von der aktuellen Fahrsituation. Zusätzlich oder alternativ kann die Energierückgewinnung Teil des geforderten Betriebszustands sein. Unter der Energierückgewinnung kann insbesondere eine Energierekuperation verstanden werden. Beispielsweise kann aufgrund einer Fahrsituation eines Fahrzeugs ein bestimmtes Bremsdrehmoment für den geforderten Betriebszustand erforderlich sein. Wenn gleichzeitig jedoch ein Energiespeicher des Fahrzeugs bereits vollständig aufgeladen ist, kann es erforderlich sein, dass eine Energierückgewinnung minimiert wird. Besonders bevorzugt werden, insbesondere bei einer normalen Betriebssituation der Antriebsvorrichtung, die Energierückgewinnung und das elektrische Drehmoment maximiert. Durch eine Maximierung der Energierückgewinnung kann insbesondere möglichst viel Energie dem Energiespeicher zugeführt und gespeichert werden. Somit kann das Betreiben der Antriebsvorrichtung entsprechend der geforderten Betriebssituation verbessert sein. Weiterhin können auch Limitierungen des Drehmomentes und/oder der Energierückgewinnung beim Bestimmen des geforderten Betriebszustands und/oder der Kontrollvorgabe berücksichtigt werden.

**[0015]** Weiterhin ist es bei einem erfindungsgemäßen Verfahren denkbar, dass durch die veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße ein Rotorverlust beim Bestimmen der Kontrollvorgabe berücksichtigt wird und/oder dass die veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße am Rotor auftretende Wirbelströme zumindest teilweise abbildet. Unter dem Rotorverlust kann insbesondere ein Hystereseverlust, insbesondere in Form eines Wärmeverlustes, und/oder ein Verlust durch Wirbelströme, insbesondere in Form eines sog. Eisenverlustes, verstanden werden. Der sog. Eisenverlust kann beispielsweise durch Ummagnetisierung entstehen und z. B. zu einem Wärmeverlust führen. Insbesondere führt eine Ummagnetisierung des Rotormaterials zu Verlusten im Rotor und einer Wärmeentwicklung. Dies kann über den Schlupf gesteuert und/oder geregelt werden. Je nach geforderten Betriebszustand kann ein unterschiedlicher Rotorverlust angestrebt werden. Soll nur eine geringe Energierückgewinnung erfolgen, kann z. B. auch vorgesehen sein, den Rotorverlust zu erhöhen. Die durch die veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße abgebildeten Wirbelströme können insbesondere aus einem magnetischen D-Achsen-Fluss und/oder einem magnetischen Q-Achsen-Fluss resultieren. So können ein Strom und/oder ein Schlupf am Stator variiert werden, wobei sich eine resultierende Rotorflussachse, d.h. insbesondere eine DQ-Aufteilung, aus den Maschineneigenschaften ergibt. Insbesondere kann beim Bestimmen der Kontrollvorgabe berücksichtigt sein, dass die Wirbelströme den Rotorverlust bedingen. Die Wirbelströme können dabei abhängig vom Betriebspunkt sein und messtechnisch erfasst oder initial für bestimmte Betriebspunkte vorgegeben sein.

**[0016]** Vorzugsweise kann bei einem erfindungsgemäßen Verfahren vorgesehen sein, dass beim Regeln des Statorfeldes am Rotor ein Magnetisierungsprozess in Form einer Hysterese durchgeführt wird. Insbesondere kann die elektrische Maschine somit einen Hysteresemotor umfassen. Vorzugsweise kann das Prinzip eines Hysteresemotors mit weiteren Prinzipien, wie z. B. einem



Motor mit zumindest einem Permanentmagneten, kombiniert sein. Der Magnetisierungsprozess im Rahmen der Hysterese kann dabei eine Aufmagnetisierung und/oder eine Demagnetisierung des Rotors umfassen. Dadurch kann z.B. im asynchronen Betrieb das Drehmoment vorteilhaft erzeugt werden. Insbesondere findet über den Rotorumfang ein kontinuierliches Auf- und Demagnetisieren statt.

**[0017]** Insbesondere kann bei einem erfindungsgemäßen Verfahren vorgesehen sein, dass beim Bestimmen der Kontrollvorgabe ein vorgegebener Schlupfbereich berücksichtigt wird, der Schlupfwerte von  $\geq 5\%$ , vorzugsweise  $\geq 10\%$ , besonders bevorzugt bis zu  $100\%$  umfasst. Der Schlupfbereich kann z. B. durch einen Maximalparameter vorgegeben sein und somit elektronisch begrenzt sein. Ferner kann der Schlupfbereich auch durch die Hardware begrenzt sein. Bei einem Schlupfbereich von bis zu  $100\%$  kann vorgesehen sein, dass eine elektronische Vorgabe eines Maximalschlupfes nicht existiert. Insbesondere kann der Schlupf somit eine normierte Differenz von Rotorgeschwindigkeit und Startorfeldgeschwindigkeit umfassen, wobei von einem Schlupf von  $100\%$  sich der Rotor vollständig im Leerlauf befindet. Insbesondere kann ein Schlupf von  $100\%$  durch einen Gleichstrom am Stator erreicht werden. Aufgrund der Verbesserung der Kontrollvorgabe im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens können konstruktive Freiheiten bei der Materialauswahl für den Rotor verbessert sein, sodass auch Materialien und Konstruktionsparameter verwendet werden können, die einen derartig hohen Schlupf und damit insbesondere hohe Ströme im Rotor zulassen. Somit sind Bereiche von hohen Momenten auch bei hohen Geschwindigkeiten möglich, ohne dass eine Schädigung an den Komponenten der Antriebsvorrichtung auftritt.

**[0018]** Weiterhin kann bei einem erfindungsgemäßen Verfahren vorgesehen sein, dass beim Bestimmen der Kontrollvorgabe eine Temperatur der elektrischen Maschine, insbesondere am Rotor, und/oder ein Leistungsparameter eines Energiespeichers zur Energieversorgung der elektrischen Maschine berücksichtigt wird. Der Leistungsparameter kann beispielsweise einen aktuellen Ladestatus des Energiespeichers umfassen. Bei dem Energiespeicher kann es sich z. B. um eine Fahrzeugbatterie, insbesondere eine Traktionsbatterie oder eine Bordnetzbatterie handeln. Somit kann die Energieversorgung, z. B. nicht nur im geforderten Betriebszustand berücksichtigt werden, sondern auch in der Kontrollvorgabe, bzw. im Regelungszusammenhang. Die Berücksichtigung der Temperatur beim Bestimmen der Kontrollvorgabe kann ebenfalls im Rahmen des Regelungszusammenhangs erfolgen. So ist es denkbar, dass für bestimmte Temperaturen und/oder Leistungsparameter separate Regelungszusammenhänge erstellt werden, welche zum Bestimmen der Kontrollvorgabe abgerufen werden, nachdem ein aktueller Zustand der Temperatur und/oder des Leistungsparameters erfasst wurde. Somit können durch weitere Daten zur Bestimmung der Kontrollvorgabe verbesserte Genauigkeiten erzielt werden, um den geforderten Betriebszustand möglichst exakt zu erreichen bzw. einregeln zu können.

**[0019]** Im Rahmen der Erfindung ist es ferner denkbar, dass die Kontrollvorgabe zumindest zwei Stromparameter des Soll-Stroms umfasst, die beim Regeln des Statorfeldes zur Ansteuerung der Mehrphasenschaltung voneinander entkoppelt werden. So kann jeder Stromparameter z. B. einen Phasenstrom umfassen, sodass durch die Entkopplung der beiden Stromparameter die Phasenströme unabhängig voneinander geregelt werden können. Insbesondere kann dadurch z. B. einer der beiden Stromparameter auf 0 gesetzt werden und der andere Stromparameter kann auf einen Sollwert geregelt werden, um den geforderten Betriebszustand zu ermöglichen. Insbesondere kann einer der Stromparameter einen D-Phasenstrom und der andere Stromparameter einen Q-Phasenstrom zur Ansteuerung der Mehrphasenschaltung umfassen. Die Transformation der D- und Q-Phasenströme kann im Rahmen der Mehrphasenschaltung und/oder der Regelung des Statorfeldes anhand der Kontrollvorgabe durchgeführt werden. Insbesondere werden dazu Ströme am Stator gemessen und in das DQ-System transformiert. Dadurch kann eine vorteilhafte Möglichkeit geschaffen sein den geforderten Betriebszustand zu erreichen.

**[0020]** Vorzugsweise ist bei einem erfindungsgemäßen Verfahren vorgesehen, dass zum Bestimmen der Kontrollvorgabe des Statorfeldes ein analytisches und/oder numerisches Modell verwendet wird. Unter einem analytischen Modell kann z. B. ein Satz analytischer Gleichungen verstanden werden, nach welchem unter Berücksichtigung der veränderlichen elektromagnetischen



Zustandsgröße der Soll-Schlupf und der zumindest eine Soll-Strom bestimmt werden können. Ein numerisches Modell kann z. B. Messergebnisse, Tabellen, Maps, eine Simulation und/oder Simulationsergebnisse umfassen, aus welchen der Soll-Schlupf und der Soll-Strom anhand der veränderlichen elektromagnetischen Zustandsgröße und vorzugsweise anhand weiterer Parameter abgelesen werden können. Weiterhin ist es denkbar, dass das numerische Modell Parameterschätzungen umfasst. Vorzugsweise können sogenannte Maps und/oder Polynome hinterlegt sein, welche für bestimmte vorliegende Betriebszustände eine Vorgabe für den Soll-Schlupf und den zumindest einen Soll-Strom umfassen. Die veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße kann im Rahmen des analytischen und/oder numerischen Modells insbesondere indirekt berücksichtigt sein, indem z.B. für einen bestimmten geforderten Betriebszustand ein bestimmter Soll-Schlupf und der Soll-Strom hinterlegt sein kann, die z.B. aus initial durchgeführten Versuchen resultieren, bei denen entsprechend die veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße aufgetreten ist. Insbesondere kann die Berücksichtigung der veränderlichen elektromagnetischen Zustandsgröße somit dadurch realisiert sein, dass diese nicht im Rahmen des analytischen und/oder numerischen Modells vernachlässigt wird. So ist es denkbar, dass die veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße indirekt, z.B. durch Interpretation eines auftretenden Phänomens und Rückschluss auf die veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße, berücksichtigt wird. Vorzugsweise wird die veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße direkt berücksichtigt.

**[0021]** Weiterhin kann bei einem erfindungsgemäßen Verfahren vorgesehen sein, dass das Verfahren folgenden Schritt umfasst:

- Erstellen eines Regelungszusammenhangs zwischen dem Soll-Schlupf, der veränderlichen elektromagnetischen Zustandsgröße des Rotors und dem geforderten Betriebszustand, insbesondere wobei mehrere Regelungszusammenhänge für unterschiedliche Temperaturen erstellt werden.

**[0022]** Das Erstellen des Regelungszusammenhangs kann initial vor Inbetriebnahme der Antriebsvorrichtung und/oder der elektrischen Maschine durchgeführt werden. Insbesondere kann das Erstellen des Regelungszusammenhangs einen Kalibriervorgang umfassen, der z. B. beim Einbau der elektrischen Maschine in die Antriebsvorrichtung durchgeführt wird oder zuvor im Labor durchgeführt wurde. Weiterhin ist es denkbar, dass das Erstellen des Regelungszusammenhangs während des Betriebs der Antriebsvorrichtung bzw. der elektrischen Maschine durchgeführt wird. So ist es denkbar, dass für jeden geforderten Betriebszustand ein neuer Regelungszusammenhang z.B. anhand analytischer Gleichungen erstellt wird. Wird der Regelungszusammenhang initial vor Inbetriebnahme der Antriebsvorrichtung erstellt, hat dies den Vorteil, dass auch solche Regelungszusammenhänge berücksichtigt werden können, die nicht durch analytische Gleichungen ausgedrückt werden können. Ferner können in diesem Fall kontrollierte Betriebsbedingungen vorliegen, um eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Wird der Regelungszusammenhang während des Betriebes durchgeführt, kann auf unterschiedliche geforderte Betriebszustände dynamisch reagiert werden. Insbesondere kann der Regelungszusammenhang nichtlinear sein.

**[0023]** Weiterhin ist es bei einem erfindungsgemäßen Verfahren denkbar, dass beim Erstellen des Regelungszusammenhangs zumindest einer der folgenden Schritte durchgeführt wird, vorzugsweise sämtliche folgende Schritte durchgeführt werden:

- Variieren zumindest eines Phasenstroms und/oder eines Schlupfes, insbesondere für verschiedene Rotorgeschwindigkeiten,
- Messen zumindest eines Stromparameters des Stators, eines Rotorparameters und/oder eines Leistungsparameters einer Energiequelle zur Energieversorgung der elektrischen Maschine,
- Bestimmen eines Einflusses der Variation des zumindest eines Phasenstroms und/oder des Schlupfes auf die veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße und/oder den geforderten Betriebszustand,



- Erstellen eines analytischen und/oder numerischen Modells für den Regelungszusammenhang.

**[0024]** Der Phasenstrom kann insbesondere ein rotorwinkelabhängiger Phasenstrom sein und/oder ein D-Phasenstrom und/oder ein Q-Phasenstrom. Der Rotorparameter kann insbesondere einen Rotorwinkel und/oder ein Rotordrehmoment umfassen. Der Leistungsparameter der Energiequelle kann z. B. eine zur Verfügung stehende Kapazität zur Aufnahme von Energie des Energiespeichers umfassen, eine aktuelle Leistungsabgabe und/oder dergleichen. Insbesondere können die Schritte zum Erstellen des Regelungszusammenhangs während des Betriebs der Antriebsvorrichtung durchgeführt werden oder initial vor dem erstmaligen Betreiben der Antriebsvorrichtung im Anwendungsbetrieb.

**[0025]** Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung ist ein Computerprogrammprodukt beansprucht. Das Computerprogrammprodukt umfasst Befehle, die bei einer Ausführung, insbesondere der Befehle und/oder des Programms, durch eine Kontrolleinheit die Kontrolleinheit veranlassen, ein erfindungsgemäßes Verfahren auszuführen.

**[0026]** Damit bringt ein erfindungsgemäßes Computerprogrammprodukt die gleichen Vorteile mit sich, wie sie ausführlich mit Bezug auf das erfindungsgemäße Verfahren beschrieben worden sind. Vorzugsweise kann das Computerprogrammprodukt in eine Kontrolleinheit, insbesondere in Form eines Steuergerätes und/oder Mikrocontrollers, implementiert sein. Das Computerprogrammprodukt kann als computerlesbarer Anweisungscode in jeder geeigneten Programmiersprache wie beispielsweise in JAVA oder C++ implementiert sein. Das Computerprogrammprodukt kann auf einem computerlesbaren Speichermedium wie einer Datendisk, einem Wechsellaufwerk, einem flüchtigen oder nichtflüchtigen Speicher, oder einem eingebauten Speicher/Prozessor abgespeichert sein. Der Anweisungscode kann einen Computer oder andere programmierbare Geräte wie die Kontrolleinheit derart programmieren, dass die gewünschten Funktionen ausgeführt werden. Ferner kann das Computerprogrammprodukt in einem Netzwerk wie beispielsweise dem Internet bereitgestellt werden bzw. sein, von dem es bei Bedarf von einem Nutzer heruntergeladen werden kann. Das Computerprogrammprodukt kann sowohl mittels eines Computerprogramms, d. h. einer Software, als auch mittels einer oder mehrerer spezieller elektronischer Schaltungen, d. h. in Hardware, oder in beliebig hybrider Form, d. h. mittels Software-Komponenten und Hardware-Komponenten, realisiert werden bzw. sein.

**[0027]** Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung ist eine Antriebsvorrichtung beansprucht, die eine elektrische Maschine mit einem Stator und Rotor aufweist, wobei der Rotor mit einem drehbaren magnetischen Statorfeld des Stators magnetisch koppelbar ist. Ferner weist die Antriebsvorrichtung eine Mehrphasenschaltung auf, durch welche das Statorfeld beeinflussbar ist. Weiterhin umfasst die Antriebsvorrichtung eine Kontrolleinheit, durch welche die Mehrphasenschaltung kontrollierbar und dadurch das Statorfeld zum Erreichen eines geforderten Betriebszustandes regelbar ist. Die Kontrolleinheit weist ein Vorgabemodul zum Bestimmen einer Kontrollvorgabe mit einem Soll-Schlupf und einem Soll-Strom der Mehrphasenschaltung unter Berücksichtigung wenigstens einer veränderlichen elektromagnetischen Zustandsgröße des Rotors zum Regeln des Statorfeldes, insbesondere durch ein Regelungsmodul der Kontrolleinheit, auf.

**[0028]** Somit bringt eine erfindungsgemäße Antriebsvorrichtung die gleichen Vorteile mit sich, wie sie ausführlich mit Bezug auf ein erfindungsgemäßes Verfahren und/oder ein erfindungsgemäßes Computerprogrammprodukt beschrieben worden sind. Unter dem Kontrollieren kann insbesondere ein Ansteuern und/oder Regeln verstanden werden. Vorzugsweise kann die Antriebsvorrichtung für ein Kraftfahrzeug ausgebildet sein. Die Kontrolleinheit kann insbesondere einen Prozessor, vorzugsweise einen Mikroprozessor, umfassen. Insbesondere kann ein erfindungsgemäßes Computerprogrammprodukt durch die Kontrolleinheit ausführbar sein. Die Kontrolleinheit kann insbesondere als zentrales Fahrzeugsteuergerät ausgeführt sein oder verschiedene räumlich voneinander getrennte Steuergeräte umfassen. Durch die erfindungsgemäße Antriebsvorrichtung kann somit insbesondere eine Genauigkeit der Ansteuerung zum Erreichen des geforderten Betriebszustands verbessert sein.

**[0029]** Insbesondere ist es bei einer erfindungsgemäßen Antriebsvorrichtung denkbar, dass die



Kontrolleinheit ein Erfassungsmodul zum Bestimmen des geforderten Betriebszustands anhand eines geforderten Betriebsparameters der elektrischen Maschine, insbesondere eines geforderten elektrischen Bremsdrehmomentes des Rotors, und/oder anhand einer geforderten Energierückgewinnung aufweist. Bei dem geforderten Betriebsparameter kann es sich um ein gefordertes elektrisches Drehmoment, einen geforderten Strom und/oder eine geforderte Drehzahl des Rotors handeln. Das Erfassungsmodul kann insbesondere mit einem Sensor verbunden sein, um aktuelle Betriebsparameter zu erfassen, aus denen sich der erforderliche Betriebszustand ergeben kann. So ist es denkbar, dass ein Wegsensor an einem Pedal des Kraftfahrzeugs vorgegeben ist und durch das Erfassungsmodul aus den Signalen des Wegsensors ein geforderter Betriebszustand, insbesondere in Verbindung mit weiteren Betriebsdaten, wie einer aktuellen Geschwindigkeit des Fahrzeugs und/oder dergleichen, ermittelt werden kann.

**[0030]** Im Rahmen der Erfindung kann ferner vorgesehen sein, dass die Kontrolleinheit ein Rotorverlustmodul zur Berücksichtigung der veränderlichen elektromagnetischen Zustandsgröße durch einen Rotorverlust und/oder zur zumindest teilweisen Abbildung am Rotor auftretender Wirbelströme durch die veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße aufweist. Das Rotorverlustmodul kann somit mit einem Sensor zum Erfassen der Rotorverluste und/oder der Wirbelströme verbunden sein oder mit einem Speichermodul, in welchem bestimmte Regelungszusammenhänge für eine Abschätzung der veränderlichen elektromagnetischen Zustandsgröße hinterlegt sind.

**[0031]** Im Rahmen der Erfindung kann ferner vorgesehen sein, dass die Kontrolleinheit ein Speichermodul aufweist, in welchem ein analytisches und/oder numerisches Modell zum Bestimmen der Kontrollvorgabe des Statorfeldes abgespeichert ist. Das Speichermodul kann vorzugsweise mit dem Rotorverlustmodul in Kommunikationsverbindung stehen. Das numerische Modell kann z. B. in Form von Tabellen vorliegen und/oder das analytische Modell kann in Form von analytischen Gleichungen vorliegen. Dadurch können z. B. unterschiedliche numerische Modelle oder analytische Modelle bereits initial hinterlegt werden und beim Betreiben der Antriebsvorrichtung im Anwendungsbetrieb zur Verfügung stehen.

**[0032]** Weiterhin ist es bei einer erfindungsgemäßen Antriebsvorrichtung denkbar, dass die Kontrolleinheit ein Kalibriermodul zum Erstellen eines Regelungszusammenhangs zwischen dem Soll-Schlupf, der veränderlichen elektromagnetischen Zustandsgröße des Rotors und dem geforderten Betriebszustand aufweist. So ist es denkbar, dass der Regelungszusammenhang im Betrieb erstellt wird, um in Abhängigkeit von einem aktuellen Betriebszustand den geforderten Betriebszustand zu erreichen. Ferner ist es denkbar, dass das Erstellen des Regelungszusammenhangs durch Abrufen eines Modells aus dem Speichermodul durchführbar ist, so dass der Regelungszusammenhang dem Vorgabemodul zur Verfügung gestellt werden kann.

**[0033]** Weiterhin ist es bei einer erfindungsgemäßen Antriebsvorrichtung denkbar, dass die Kontrolleinheit mit einem Temperatursensor zum Erfassen einer Temperatur der elektrischen Maschine verbunden ist, wobei das Vorgabemodul dazu ausgebildet ist, die erfasste Temperatur beim Bestimmen der Kontrollvorgabe zu berücksichtigen. Insbesondere kann es sich bei der Temperatur um eine Temperatur des Rotors handeln, die durch den Temperatursensor erfassbar ist. Dadurch kann ein aktueller Betriebszustand in die Kontrollvorgabe einbezogen werden, um z. B. eine Schädigung der Antriebsvorrichtung durch einen Betrieb der elektrischen Maschine bei zu hohen Temperaturen zu vermeiden.

**[0034]** Vorzugsweise ist bei einer erfindungsgemäßen Antriebsvorrichtung die Kontrolleinheit, insbesondere das Vorgabemodul, zum Ausführen eines erfindungsgemäßen Verfahrens ausgebildet. Dadurch können die Schritte des Verfahrens durch die Kontrolleinheit initiiert, insbesondere durchgeführt werden. Dafür kann die Kontrolleinheit insbesondere dazu ausgebildet, das erfindungsgemäße Computerprogrammprodukt auszuführen.

**[0035]** Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung ist ein Kraftfahrzeug mit einer erfindungsgemäßen Antriebsvorrichtung zum Betreiben zumindest eines Rades des Kraftfahrzeugs beansprucht. Vorzugsweise kann die Antriebsvorrichtung mehrere elektrische Maschinen umfassen, die zum Antreiben jeweils eines oder mehrerer Räder des Kraftfahrzeugs angeordnet und/oder



ausgebildet sind. Bei der elektrischen Maschine kann es sich vorzugsweise um den Primärantrieb des Fahrzeugs handeln oder um einen Sekundärtrieb. So ist es denkbar, dass die elektrische Maschine in einem Hybridfahrzeug eingesetzt wird, um im Stadtverkehr das Rad anzutreiben und/oder abzubremesen, während für weitere Strecken ein Verbrennungsmotor eingesetzt wird.

**[0036]** Weitere, die Erfindung verbessernde Maßnahmen ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung zu verschiedenen Ausführungsbeispielen der Erfindung, welche in den Figuren schematisch dargestellt sind. Sämtliche aus den Ansprüchen, der Beschreibung oder den Figuren hervorgehende Merkmale und/oder Vorteile, einschließlich konstruktiver Einzelheiten und räumlicher Anordnungen können sowohl für sich als auch in den verschiedenen Kombinationen erfindungswesentlich sein.

**[0037]** Es zeigen jeweils schematisch:

**[0038]** Fig. 1 ein erfindungsgemäßes Verfahren zum Betreiben einer Antriebsvorrichtung in schematischer Darstellung der Verfahrensschritte,

**[0039]** Fig. 2 eine elektrische Maschine der Antriebsvorrichtung in schematischer Darstellung,

**[0040]** Fig. 3 einen Regelungszusammenhang für das Verfahren zum Betreiben der Antriebsvorrichtung in schematischer Darstellung,

**[0041]** Fig. 4 ein erfindungsgemäßes Kraftfahrzeug.

**[0042]** Elemente mit gleicher Funktion und Wirkungsweise sind in den Fig. 1 bis 4 jeweils mit denselben Bezugszeichen versehen.

**[0043]** In Fig. 1 ist schematisch ein erfindungsgemäßes Verfahren 100 dargestellt. Vorzugsweise kann das Verfahren 100 durch ein erfindungsgemäßes Computerprogrammprodukt 300 ausgeführt werden, wobei das Computerprogrammprodukt 300 Befehle 301 umfasst, die bei einer Ausführung des Programms durch eine Kontrolleinheit 12 die Kontrolleinheit 12 veranlassen das Verfahren 100 auszuführen.

**[0044]** Das Verfahren 100 ist zum Betreiben einer Antriebsvorrichtung 10 geeignet, die z. B. in Fig. 4 mit einem erfindungsgemäßen Kraftfahrzeug 1 dargestellt ist. Die Antriebsvorrichtung 10 weist dabei eine elektrische Maschine 11 mit einem Stator 11.1 und einem Rotor 11.2 auf, um ein Rad 2 des Kraftfahrzeugs zu betreiben, d.h. insbesondere anzutreiben und/oder abzubremesen. Der Rotor 11.2 ist mit einem drehbaren magnetischen Statorfeld des Stators 11.1 magnetisch koppelbar. Die elektrische Maschine 11 ist beispielsweise in Fig. 2 dargestellt. Zur magnetischen Kopplung kann der Rotor 11.2 vorzugsweise zumindest einen Rotormagneten in Form eines Permanentmagneten umfassen. Ein Material des Rotormagneten kann vorzugsweise aus AlNiCo gebildet sein. Ferner kann der Rotormagnet als Ringmagnet ausgeführt sein. Durch eine Mehrphasenschaltung 20 der Antriebsvorrichtung 10 ist das Statorfeld beeinflussbar. Zum Ausführen des Verfahrens 100 weist die Antriebsvorrichtung die Kontrolleinheit 12 auf.

**[0045]** Im Rahmen des Verfahrens 100 ist ein Bestimmen 101 eines geforderten Betriebszustands 200 des Rotors 11.2 vorgesehen. Das Bestimmen 101 des geforderten Betriebszustands 200 ist insbesondere durch ein Erfassungsmodul 14 der Kontrolleinheit 12 ausführbar. Der geforderte Betriebszustand 200 umfasst vorzugsweise ein gefordertes elektrisches Drehmoment 200.1, das z. B. ein gefordertes elektrisches Bremsdrehmoment sein kann. Weiterhin kann der geforderte Betriebszustand 200 eine Energierückgewinnung 200.2 umfassen. Die Energierückgewinnung 200.2 kann insbesondere eine Energierückgewinnung umfassen, bei welcher ein Energiespeicher 30 der Antriebsvorrichtung 10 mit Energie gespeist wird. Vorzugsweise kann der Energiespeicher 30 als Fahrzeugbatterie ausgeführt sein. Somit definieren insbesondere das elektrische Drehmoment 200.1 und die Energierückgewinnung 200.2 den geforderten Betriebszustand 200.

**[0046]** Auf Grundlage des geforderten Betriebszustands 200 erfolgt ein Bestimmen 102 einer Kontrollvorgabe 210 für das Statorfeld zum Erreichen des geforderten Betriebszustands 200 unter Berücksichtigung einer veränderlichen elektromagnetischen Zustandsgröße 201 des Rotors 11.2. Dazu weist die Kontrolleinheit 12 ein Vorgabemodul 13 auf, welches zum Bestimmen 102



der Kontrollvorgabe 210 ausgebildet ist. Die Kontrollvorgabe 210 umfasst einen Soll-Schlupf 211 und zumindest einen Soll-Strom 212 der Mehrphasenschaltung 20. Der Soll-Strom 212 kann einen oder mehrere Phasenströme 212.1 umfassen, mit denen Phasen 11.4 der Mehrphasenschaltung 20 zum Betreiben des Statorfeldes der elektrischen Maschine 11 kontrolliert, d. h. insbesondere gesteuert und/oder geregelt werden.

**[0047]** Das Bestimmen 102 der Kontrollvorgabe 210 kann insbesondere anhand eines Regelungszusammenhangs 220 erfolgen, der beispielhaft in Fig. 3 dargestellt ist. So ist es denkbar, dass der Regelungszusammenhang 220 ein analytisches und/oder numerisches Modell umfasst, welches einen mathematischen und/oder physikalischen Zusammenhang zwischen einem Schlupf 220.1 und einem Drehmoment 220.2 umfasst. Dabei kann ein Schlupfbereich 213 vorgegeben sein, der Schlupfwerte von  $\geq 5\%$ , vorzugsweise  $\geq 10\%$ , besonders bevorzugt bis zu 100% umfasst. Insbesondere sind die Schlupfwerte im Schlupfbereich 213 dabei frei wählbar. Das Modell kann insbesondere in einem Speichermodul 16 der Kontrolleinheit 12 abgespeichert sein. Unter Berücksichtigung der veränderlichen elektromagnetischen Zustandsgröße 201 kann dabei vorgesehen sein, dass sich das Drehmoment 220.2 in Abhängigkeit vom Schlupf 220.1 nichtlinear verhält, wenn die Phasen 11.4 mit Phasenströmen 212.1 belegt werden. Insbesondere wird der nichtlineare Regelungszusammenhang 220 durch einen Rotorverlust 201.1 bedingt. Aufgrund auftretender Wirbelströme am Rotor 20 können während des Betriebs der elektrischen Maschine 11 Wärmeverluste, insbesondere durch eine Veränderung der Magnetisierung des Rotormaterials, entstehen. Das Rotormaterial und/oder der Permanentmagnet können dabei Rotorwiderstände 11.3 darstellen, welche zum Rotorverlust 201.1 führen. Der Rotorverlust 201.1 kann vorzugsweise durch ein Rotorverlustmodul 15 der Kontrolleinheit 12 bestimmt und/oder bereitgestellt werden.

**[0048]** Dies ist beispielsweise der Fall, wenn bei einem Regeln 103 des Statorfeldes am Rotor 20 ein Magnetisierungsprozess in Form einer Hysterese durchgeführt wird. Wird ein gefordertes Drehmoment 200.1 durch den geforderten Betriebszustand 200 vorgegeben, können sich z. B. mehrere Einstellmöglichkeiten des Schlupfes 220.1 in Abhängigkeit von dem gewählten Phasenstrom 212.1 ergeben. Somit kann der Soll-Schlupf 211 beispielsweise für unterschiedliche Geschwindigkeiten unterschiedliche Werte aufweisen, um das geforderte Drehmoment 200.1 zu erreichen. Die Auswahl des Soll-Schlupfes 211 aus diesen Werten kann z.B. anhand der geforderten Energierückgewinnung 200.2 erfolgen. Dementsprechend können die Phasen 11.4 angesteuert werden. Vorzugsweise können unterschiedliche Regelungszusammenhänge 220 für unterschiedliche Temperaturen 202 vorgesehen sein. So ist es denkbar, dass die Antriebsvorrichtung 10 einen Temperatursensor 22 aufweist, über welchen eine Temperatur 202 der elektrischen Maschine 11 ermittelbar ist und zum Bestimmen 102 der Kontrollvorgabe 210 abrufbar ist. Anhand der Temperatur 202 kann ein entsprechendes numerisches Modell z. B. ausgewählt werden, welches den jeweiligen Regelungszusammenhang 220 darstellt. Ferner kann beim Bestimmen 101 des geforderten Betriebszustands 200, insbesondere um die Energierückgewinnung 200.2 zur berücksichtigen, und/oder beim Bestimmen 102 der Kontrollvorgabe 210 ein Leistungsparameter 203 des Energiespeichers 30 der Antriebsvorrichtung 10 berücksichtigt werden.

**[0049]** Fig. 3 zeigt ferner exemplarisch in gestrichelter Darstellung den Zusammenhang zwischen dem Schlupf 220.1 und dem Drehmoment 220.2 bei Vernachlässigung von Wirbelströmen beim Einsatz bestimmter Rotormaterialien. Dabei wird ein nichtlineares Verhalten nicht abgebildet und folglich kann eine Drehmomenteinstellung nur mit reduzierter Genauigkeit erfolgen.

**[0050]** Um den Regelungszusammenhang 220 zu erhalten, kann ein Erstellen 104 des Regelungszusammenhangs 220, insbesondere durch ein Kalibriermodul 17 der Kontrolleinheit 12, vorgesehen sein, wie gemäß Fig. 1 dargestellt. Demnach kann das Erstellen 104 des Regelungszusammenhangs 220 ein Variieren 104.1 zumindest eines Phasenstroms 212.1 und/oder eines Schlupfes 220.1, insbesondere für verschiedene Rotorgeschwindigkeiten umfassen. Ferner kann vorzugsweise ein Messen 104.2 zumindest eines Stromparameters des Stators 11.1, eines Rotorparameters und/oder des Leistungsparameters 203 der Energiequelle 30 vorgesehen sein. So kann z. B. eine Spannung und/oder die Stromstärke an einer Phase 11.4, der Rotationswinkel des Rotors 11.2 oder der Leistungsparameter 203, z. B. in Form eines Ladestatus des Energie-



speichers 30 gemessen werden. Anschließend kann ein Bestimmen 104.3 eines Einflusses der Variation 104.1 des Phasenstroms 212.1 und/oder des Schlupfes 220.1 auf die veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße 201 erfolgen. Insbesondere wird dies indirekt durchgeführt, indem das Drehmomentverhalten bestimmt wird, wobei der nichtlineare Anteil zumindest teilweise auf die veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße 201 zurückführbar sein kann. Ferner ist ein Erstellen 104.4 eines analytischen und/oder numerischen Modells für den Regelungszusammenhang 220 vorgesehen, indem z. B. Kurven, wie in Fig. 3 gezeigt, erstellt werden. Der Regelungszusammenhang 220 kann daraufhin für die Kontrollvorgabe 210 genutzt werden. Das Erstellen 104 des Regelungszusammenhangs 220 kann initial zum Betreiben der Antriebseinrichtung 10 durchgeführt werden, indem Messwerte in einem Labor erhoben werden, oder das Erstellen 104 des Regelungszusammenhangs 220 kann für eine Betriebssituation individuell erfolgen.

**[0051]** Anhand der Kontrollvorgabe 210 kann ferner das Regeln 103 des Statorfeldes erfolgen, um den Rotor 11.2 auf den geforderten Betriebszustand 200 zu regeln. Das Regeln 103 kann durch die Kontrolleinheit 12, insbesondere ein Regelungsmodul 18 der Kontrolleinheit 12, und/oder die Mehrphasenschaltung 20 durchgeführt werden. Dabei kann ein Entkoppeln 103.1 zweier Stromparameter des Soll-Stroms 212 erfolgen, wenn die Kontrollvorgabe 210 z. B. zumindest zwei Stromparameter des Soll-Stroms 212 umfasst. So ist es insbesondere denkbar, dass ein D-Phasenstrom und ein Q-Phasenstrom getrennt voneinander behandelt werden, wobei insbesondere einer der Ströme dazu eingesetzt wird, das Statorfeld zu regeln. Dazu kann die Mehrphasenschaltung 20 angesteuert werden, die durch den Energiespeicher 30 versorgt wird und die Phasen 11.4 der elektrischen Maschine 11, z. B. mittels einer Umrichtereinheit 21, d. h. insbesondere eines Inverters, ansteuert.

**[0052]** Die Erfindung lässt neben den dargestellten Ausführungsformen weitere Gestaltungsgrundsätze zu. Die Erfindung soll nicht auf die mit Bezug auf die Figuren erläuterten Ausführungsbeispiele beschränkt betrachtet werden.



## BEZUGSZEICHENLISTE

- 1 Kraftfahrzeug
- 2 Rad
  
- 10 Antriebsvorrichtung
- 11 elektrische Maschine
  - 11.1 Stator
  - 11.2 Rotor
  - 11.3 Rotorwiderstand
  - 11.4 Phase
- 12 Kontrolleinheit
- 13 Vorgabemodul
- 14 Erfassungsmodul
- 15 Rotorverlustmodul
- 16 Speichermodul
- 17 Kalibriermodul
- 18 Regelungsmodul
  
- 20 Mehrphasenschaltung
- 21 Umrichtereinheit
- 22 Temperatursensor
  
- 30 Energiespeicher
  
- 100 Verfahren
  - 101 Bestimmen von 200
  - 102 Bestimmen von 210
  - 103 Regeln des Statorfeldes
    - 103.1 Entkoppeln
  - 104 Erstellen von 220
    - 104.1 Variieren zumindest eines Phasenstroms
    - 104.2 Messen
    - 104.3 Bestimmen eines Einflusses von 104.1
    - 104.4 Erstellen eines Modells für 220



- 200 geforderter Betriebszustand
  - 200.1 elektrisches Drehmoment
  - 200.2 Energierückgewinnung
- 201 veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße
  - 201.1 Rotorverlust
- 202 Temperatur
- 203 Leistungsparameter
  
- 210 Kontrollvorgabe
  - 211 Soll-Schlupf
  - 212 Soll-Strom
    - 212.1 Phasenstrom
  - 213 Schlupfbereich
  
- 220 Regelungszusammenhang
  - 220.1 Schlupf
  - 220.2 Drehmoment
  
- 300 Computerprogrammprodukt
  - 301 Befehle



## Patentansprüche

1. Verfahren (100) zum Betreiben einer Antriebsvorrichtung (10) mit einer elektrischen Maschine (11), die einen Stator (11.1) und einen Rotor (11.2) aufweist, wobei der Rotor (11.2) mit einem drehbaren magnetischen Statorfeld des Stators (11.1) magnetisch koppelbar ist, und das Statorfeld durch eine Mehrphasenschaltung (20) beeinflussbar ist, wobei das Verfahren (100) folgende Schritte umfasst:
  - Bestimmen (101) eines geforderten Betriebszustands (200) des Rotors (11.2),
  - Bestimmen (102) einer Kontrollvorgabe (210) für das Statorfeld zum Erreichen des geforderten Betriebszustands (200) unter Berücksichtigung wenigstens einer veränderlichen elektromagnetischen Zustandsgröße (201) des Rotors (11.2), wobei die Kontrollvorgabe (210) einen SollSchlupf (211) und zumindest einen Soll-Strom (212) der Mehrphasenschaltung (20) umfasst,
  - Regeln (103) des Statorfeldes anhand der Kontrollvorgabe (210) zur Regelung des Rotors (11.2) auf den geforderten Betriebszustand (200).
2. Verfahren (100) nach Anspruch 1,  
**dadurch gekennzeichnet**, dass  
beim Bestimmen (102) der Kontrollvorgabe (210) ein, insbesondere nichtlinearer, Regelungszusammenhang (220) zwischen einem Schlupf (220.1) des Rotors (11.2), der veränderlichen elektromagnetischen Zustandsgröße (201) des Rotors (11.2) und dem Soll-Strom (212) der Mehrphasenschaltung (20) berücksichtigt wird.
3. Verfahren (100) nach Anspruch 1 oder 2,  
**dadurch gekennzeichnet**, dass  
zum Bestimmen (101) des geforderten Betriebszustand (200) ein geforderter Betriebsparameter der elektrischen Maschine, insbesondere ein gefordertes elektrisches Bremsdrehmoment des Rotors (11.2), und/oder eine geforderte Energierückgewinnung (200.2) erfasst wird.
4. Verfahren (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet**, dass  
durch die veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße (201) ein Rotorverlust (201.1) beim Bestimmen (102) der Kontrollvorgabe (210) berücksichtigt wird, und/oder dass die veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße (201) am Rotor (11.2) auftretende Wirbelströme zumindest teilweise abbildet.
5. Verfahren (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet**, dass  
beim Regeln (103) des Statorfeldes am Rotor (11.2) ein Magnetierungsprozess in Form einer Hysterese durchgeführt wird.
6. Verfahren (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet**, dass  
beim Bestimmen (102) der Kontrollvorgabe (210) ein vorgegebener Schlupfbereich (213) berücksichtigt wird, der Schlupfwerte von größer oder gleich 5%, vorzugsweise größer oder gleich 10%, besonders bevorzugt bis zu 100% umfasst.
7. Verfahren (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet**, dass  
beim Bestimmen (102) der Kontrollvorgabe (210) eine Temperatur (202) der elektrischen Maschine (11), insbesondere am Rotor (11.2), und/oder ein Leistungsparameter (203) eines Energiespeichers (30) zur Energieversorgung der elektrischen Maschine (11) berücksichtigt wird.
8. Verfahren (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet**, dass  
die Kontrollvorgabe (210) zumindest zwei Stromparameter des Soll-Stroms (212) der Mehr-



- phasenschaltung (20) umfasst, die beim Regeln (103) des Statorfeldes zur Ansteuerung der Mehrphasenschaltung (20) voneinander entkoppelt werden.
9. Verfahren (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet**, dass  
zum Bestimmen (102) der Kontrollvorgabe (210) des Statorfeldes ein analytisches und/oder numerisches Modell verwendet wird.
  10. Verfahren (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet**, dass  
das Verfahren (100) folgenden Schritt umfasst:
    - Erstellen (104) eines Regelungszusammenhangs (220) zwischen dem Soll-Schlupf (211), der veränderlichen elektromagnetischen Zustandsgröße (201) des Rotors (11.2) und dem geforderten Betriebszustand (200), insbesondere wobei mehrere Regelungszusammenhänge (220) für unterschiedliche Temperaturen (202) erstellt werden.
  11. Verfahren (100) nach einem der Ansprüche 10,  
**dadurch gekennzeichnet**, dass  
beim Erstellen (104) des Regelungszusammenhangs (220) zumindest einer der folgenden Schritte durchgeführt wird:
    - Variieren (104.1) zumindest eines Phasenstroms und/oder eines Schlupfes, insbesondere für verschiedene Rotorgeschwindigkeiten,
    - Messen (104.2) zumindest eines Stromparameters des Stators (11.1), eines Rotorparameters und/oder eines Leistungsparameters (203) einer Energiequelle (30) zur Energieversorgung der elektrischen Maschine (11),
    - Bestimmen (104.3) eines Einflusses der Variation (104.1) des zumindest einen Phasenstroms und/oder des Schlupfes auf die veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße (201) und/oder den geforderten Betriebszustand (200),
    - Erstellen (104.4) eines analytischen und/oder numerischen Modells für den Regelungszusammenhang (220).
  12. Computerprogrammprodukt (300), umfassend Befehle (301), die bei einer Ausführung durch eine Kontrolleinheit (12) die Kontrolleinheit (12) veranlassen, ein Verfahren (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche auszuführen.
  13. Antriebsvorrichtung (10), insbesondere für ein Kraftfahrzeug (1), aufweisend eine elektrische Maschine (11) mit einem Stator (11.1) und einem Rotor (11.2), der mit einem drehbaren magnetischen Statorfeld des Stators (11.1) magnetisch koppelbar ist, eine Mehrphasenschaltung (20), durch welche das Statorfeld beeinflussbar ist, und eine Kontrolleinheit (12), durch welche die Mehrphasenschaltung (20) kontrollierbar und dadurch das Statorfeld zum Erreichen eines geforderten Betriebszustands (200) regelbar ist,  
**dadurch gekennzeichnet**, dass  
die Kontrolleinheit (12) ein Vorgabemodul (13) zum Bestimmen (102) einer Kontrollvorgabe (210) mit einem Soll-Schlupf (211) und einem Soll-Strom (212) der Mehrphasenschaltung (20) unter Berücksichtigung wenigstens einer veränderlichen elektromagnetischen Zustandsgröße (201) des Rotors (11.2) zum Regeln (103) des Statorfeldes aufweist.
  14. Antriebsvorrichtung (10) nach Anspruch 13,  
**dadurch gekennzeichnet**, dass  
die Kontrolleinheit (12) ein Erfassungsmodul (14) zum Bestimmen (101) des geforderten Betriebszustands (200) anhand eines geforderten Betriebsparameters der elektrischen Maschine (11), insbesondere eines geforderten elektrischen Bremsdrehmomentes des Rotors (11.2), und/oder anhand einer geforderten Energierückgewinnung (200.2) aufweist.
  15. Antriebsvorrichtung (10) nach einem der Ansprüche 13 oder 14,  
**dadurch gekennzeichnet**, dass  
die Kontrolleinheit (12) ein Rotorverlustmodul (15) zur Berücksichtigung der veränderlichen

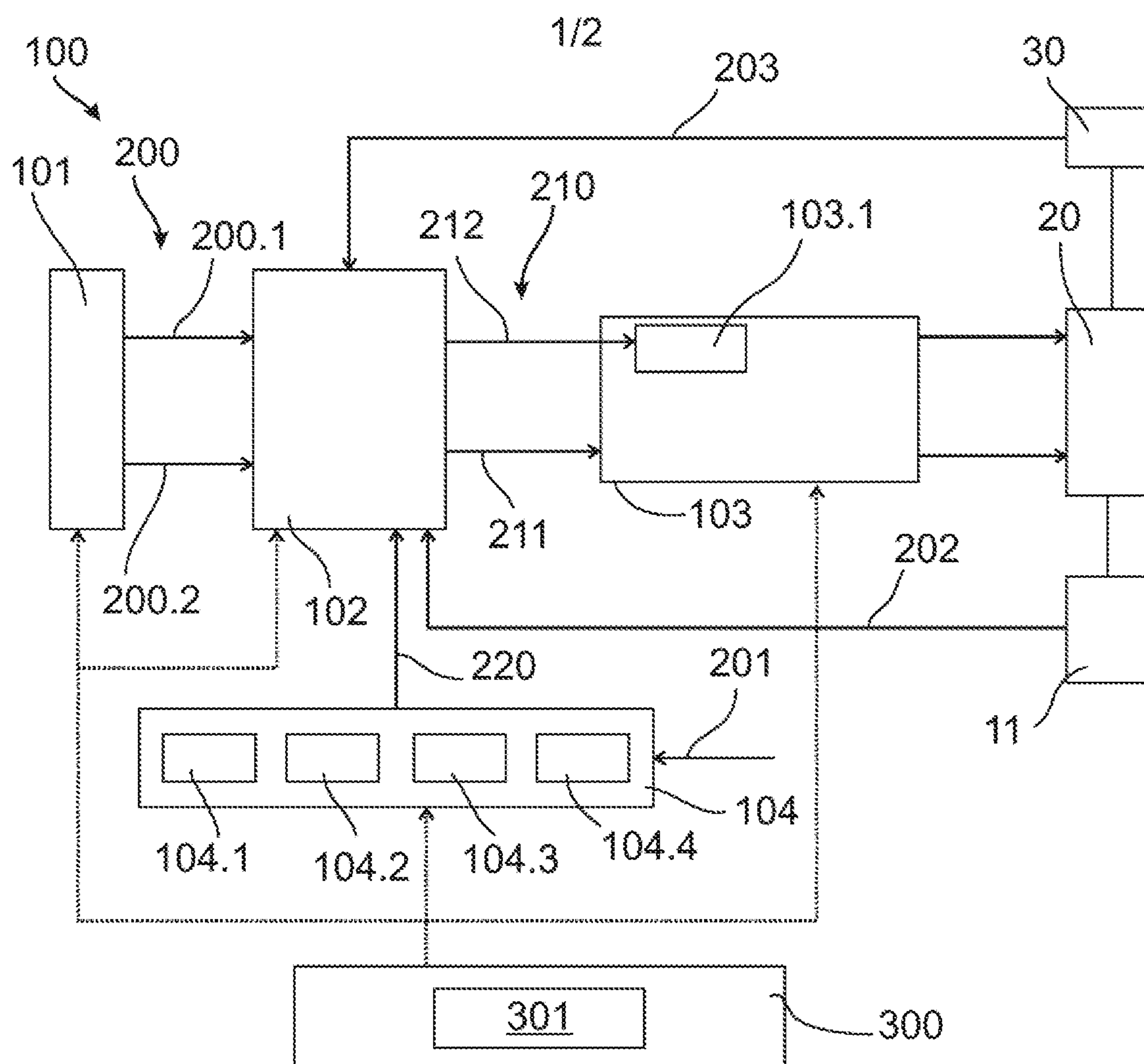


elektromagnetischen Zustandsgröße (201) durch einen Rotorverlustes (201.1) und/oder zur zumindest teilweisen Abbildung am Rotor (11.2) auftretender Wirbelströme durch die veränderliche elektromagnetische Zustandsgröße (201) aufweist.

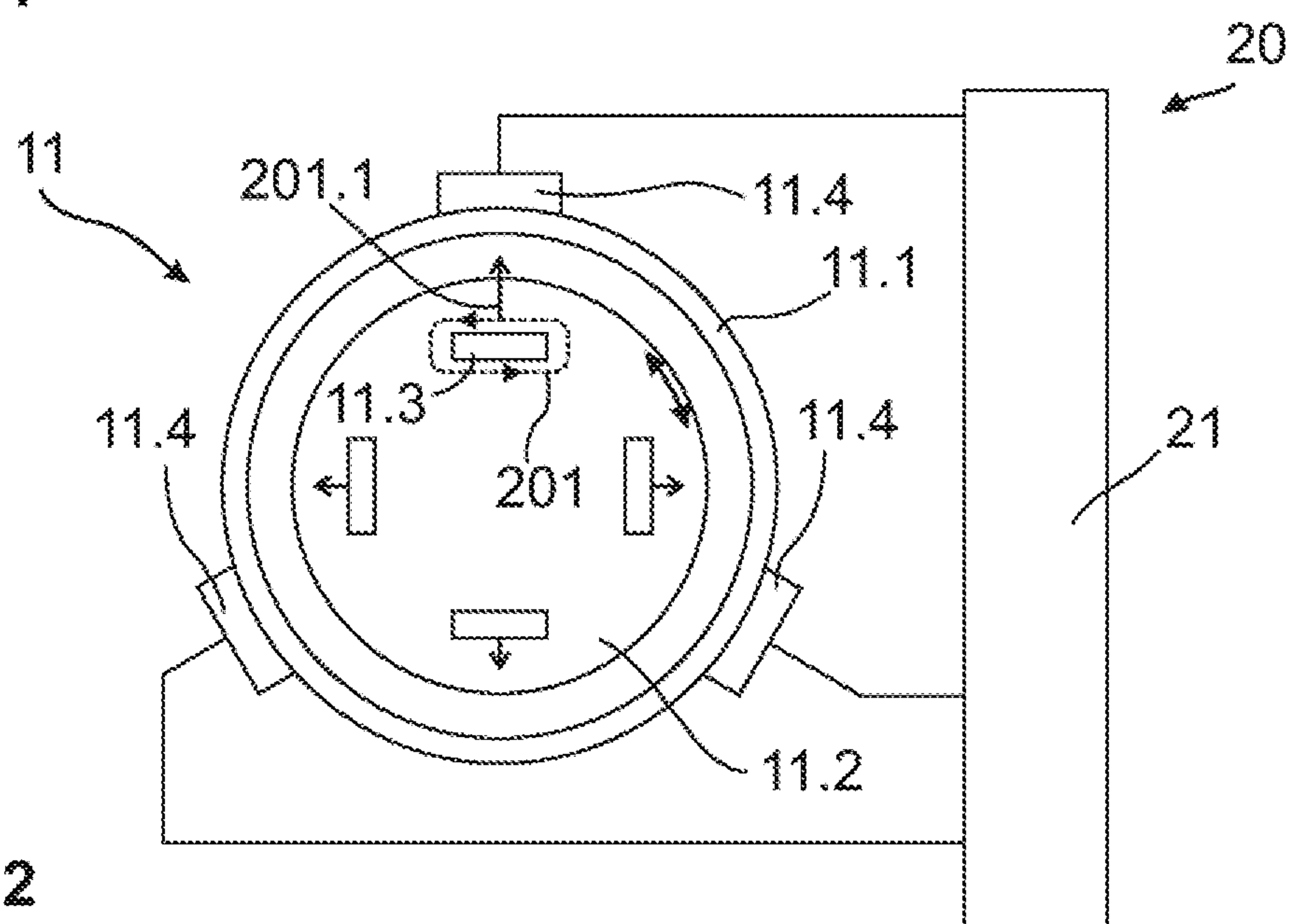
16. Antriebsvorrichtung (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kontrolleinheit (12) ein Speichermodul (16) aufweist, in welchem ein analytisches und/oder numerisches Modell zum Bestimmen (102) der Kontrollvorgabe (210) des Statorfeldes abgespeichert ist.
17. Antriebsvorrichtung (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kontrolleinheit (12) ein Kalibriermodul (17) zum Erstellen eines Regelungszusammenhangs (220) zwischen dem Soll-Schlupf (211), der veränderlichen elektromagnetischen Zustandsgröße (212) des Rotors (11.2) und dem geforderten Betriebszustand (200) aufweist.
18. Antriebsvorrichtung (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kontrolleinheit (12) mit einem Temperatursensor (22) zum Erfassen einer Temperatur (202) der elektrischen Maschine (11) verbunden ist, wobei das Vorgabemodul (13) dazu ausgebildet ist, die erfasste Temperatur (202) beim Bestimmen (102) der Kontrollvorgabe (210) zu berücksichtigen.
19. Antriebsvorrichtung (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kontrolleinheit (12), insbesondere das Vorgabemodul (13), zum Ausführen eines Verfahrens (100) nach einem der Ansprüche 1 bis 11 ausgebildet ist.
20. Kraftfahrzeug (1) mit einer Antriebsvorrichtung (10) nach einem der Ansprüche 13 bis 19 zum Betreiben zumindest eines Rades (2) des Kraftfahrzeugs (1).

**Hierzu 2 Blatt Zeichnungen**





**Fig. 1**



**Fig. 2**



