

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

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
22. August 2024 (22.08.2024)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2024/170262 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
B62D 5/04 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2024/052105

(22) Internationales Anmeldedatum:
29. Januar 2024 (29.01.2024)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2023 201 346.0
16. Februar 2023 (16.02.2023) DE

(71) Anmelder: **ZF FRIEDRICHSHAFEN AG** [DE/DE]; Lö-
wentaler Straße 20, 88046 Friedrichshafen (DE).

(72) Erfinder: **MEYER, Gerrit**; Eichhornring 15, 49401 Dam-
me (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DJ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG,
KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,
MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA,
NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO,
RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH,
TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS,
ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,

(54) Title: METHOD FOR CONTROLLING AN ELECTRIC MOTOR OF A STEERING SYSTEM OF A VEHICLE, AND STEER-
BY-WIRE STEERING

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR ANSTEUERUNG EINES ELEKTROMOTORS EINES LENKSYSTEMS EINES
FAHRZEUGS, UND STEER-BY-WIRE-LENKUNG

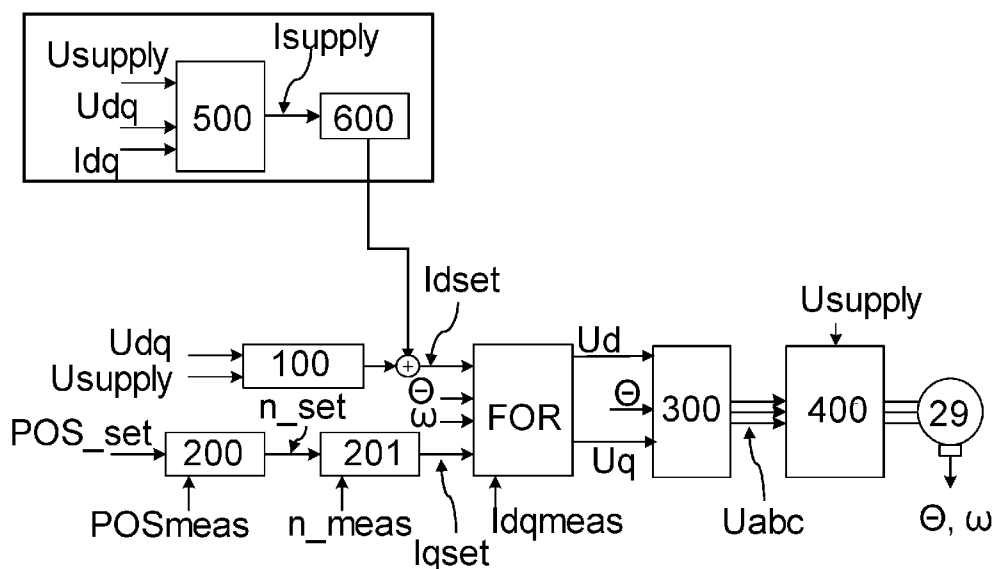


Fig. 2

(57) Abstract: The invention relates to a method for controlling an electric motor of a steering system of a vehicle, in particular a steer-by-wire steering system, wherein the electric motor is controlled by means of a field-oriented controller. A q-current is used to build up the torque of the electric motor, and a d-current, as a predetermined d-current, is zero during control operation. In the case of a field-weakening operation of the field-oriented controller, a negative d-current is supplied as a field-weakening portion in addition to the predetermined d-current. In the case of braking the electric motor, the level of feedback current flowing into the power supply network of the vehicle is detected. If a predetermined limit value of the feedback current is reached or exceeded, the field-weakening portion is increased by an additional negative d-current being supplied to the field-oriented controller in order to limit the feedback

CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

current to the predetermined limit value.

(57) Zusammenfassung: Vorgeschlagen wird ein Verfahren zur Ansteuerung eines Elektromotors eines Lenksystems eines Fahrzeugs, insbesondere eines Steer-by-wire-Lenksystems, wobei die Ansteuerung des Elektromotors mittels einer feldorientierten Regelung erfolgt. Dabei wird ein q-Strom zum Aufbau des Drehmoments des Elektromotors verwendet, und ein d-Strom als vorgegebener d-Strom ist im Regelbetrieb Null. Im Falle eines Feldschwächebetriebs der feldorientierten Regelung wird ein negativer d-Strom als Feldschwächungsanteil zusätzlich zum vorgegebenen d-Strom zugeführt. Im Falle eines Abbremsens des Elektromotors erfolgt eine Erfassung, in welcher Höhe ein Rückspeisestrom in das Versorgungsnetz des Fahrzeugs fließt. Im Falle, dass ein vorgegebener Grenzwert des Rückspeisestroms erreicht oder überschritten wird, wird der Feldschwächungsanteil erhöht, indem der feldorientierten Regelung ein zusätzlicher negativer d-Strom zur Begrenzung des Rückspeisestroms auf den vorgegebenen Grenzwert zugeführt wird.

Verfahren zur Ansteuerung eines Elektromotors eines Lenksystems eines
Fahrzeugs, und Steer-by-Wire-Lenkung

Die vorliegende Erfindung betrifft das Gebiet der Ansteuerung von Elektromotoren für Lenksysteme von Fahrzeugen, insbesondere der Hinterachslenkungen mit Steer-by-Wire-Technologie.

Permanent(magnet)erregte Synchronmaschinen, auch PSM genannt, werden z.B. an Bord eines Kraftfahrzeugs für unterschiedliche Zwecke verwendet, z.B. zur Lenkkraftunterstützung.

Elektromechanische Stellantriebe können beim Abbremsen aufgrund der in der Mechanik gespeicherten kinetischen Energie einen Energiefluss (Rückspeisestrom) zurück in das Versorgungsnetz (Rekuperation) erzeugen. Die Höhe dieses Energieflusses ist in automobilen Anwendungen oftmals begrenzt, um das Versorgungsnetz nicht zu überlasten. Als Lösung ist bereits die Verwendung von zusätzlicher Elektronik wie einen Einbau von Bremswiderständen bekannt. Diese benötigen zusätzlichen Bauraum und führen zu mehr Gewicht im System. Auch kann eine Limitierung der Stellerdynamik vorgesehen sein, was zu einer unerwünschten Limitierung der Performance des Gesamtsystems führen kann.

Es ist deshalb eine Aufgabe der Erfindung, ein verbessertes Verfahren zur Ansteuerung eines Elektromotors eines Lenksystems eines Fahrzeugs, bereitzustellen, das die zuvor beschriebenen Nachteile aus dem Stand der Technik überwindet.

Diese Aufgabe wird gelöst durch die Merkmale der unabhängigen Ansprüche. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche.

Vorgeschlagen wird ein Verfahren zur Ansteuerung eines Elektromotors eines Lenksystems eines Fahrzeugs, insbesondere eines Steer-by-wire-Lenksystems, wobei die Ansteuerung des Elektromotors mittels einer feldorientierten Regelung erfolgt. Dabei wird ein q -Strom zum Aufbau des Drehmoments des Elektromotors verwendet, und ein d -Strom als vorgegebener d -Strom ist im Regelbetrieb Null. Im Falle eines

Feldschwächebetriebs der feldorientierten Regelung wird ein negativer d-Strom als Feldschwächungsanteil zusätzlich zum vorgegebenen d-Strom zugeführt. Im Falle eines Abbremsens des Elektromotors erfolgt eine Erfassung, in welcher Höhe ein Rückspeisestrom in das Versorgungsnetz des Fahrzeugs fließt. Im Falle, dass ein vorgegebener Grenzwert des Rückspeisestroms erreicht oder überschritten wird, wird der Feldschwächungsanteil erhöht, indem der feldorientierten Regelung ein zusätzlicher negativer d-Strom zur Begrenzung des Rückspeisestroms auf den vorgegebenen Grenzwert zugeführt wird.

Durch das vorgeschlagene Verfahren kann unerwünschter Rückspeisestrom direkt im Elektromotor teilweise oder ganz vernichtet werden, indem er aufgrund des zusätzlichen negativen d-Stroms in Wärme umgewandelt wird.

In einer Ausführung wird die Höhe des negativen d-Stroms zur Begrenzung des Rückspeisestroms derart mittels einer proportionalen Steuerung angepasst, dass Rückspeiseströme in das Versorgungsnetz auf den vorgegebenen Grenzwert begrenzt werden. Somit kann der Rückspeisestrom in einfacher Weise begrenzt werden.

In einer Ausführung wird die Höhe des negativen d-Stroms zur Begrenzung des Rückspeisestroms mittels eines Reglers angepasst, der Rückspeiseströme in das Versorgungsnetz auf den vorgegebenen Grenzwert regelt. Somit kann der Rückspeisestrom auf den gewünschten Sollwert begrenzt werden.

In einer Ausführung ist eine zusätzliche Begrenzung gegen Überstrom und positive d-Ströme vorgesehen. Somit können Komponenten, welche den Elektromotor antreiben, vor zu hohen Strömen geschützt werden.

Ferner wird ein Computerprogramm vorgeschlagen, das dazu eingerichtet ist, einzelne oder sämtliche Schritte des Verfahrens mittels Programmcode auf einer Recheneinheit auszuführen, welche Teil einer elektronischen Steuereinrichtung ist.

Ferner wird ein maschinenlesbares Speichermedium vorgeschlagen, auf dem das Computerprogramm gespeichert ist.

Ferner wird eine Steuereinrichtung vorgeschlagen, die mit einem Versorgungsnetz eines Lenksystems eines Fahrzeugs und einem Elektromotor zum Antreiben des Lenksystems in Signalverbindung ist, und die dazu ausgebildet ist, das Verfahren zur Ansteuerung des Elektromotors auszuführen.

Unter eine Steuereinrichtung, auch Steuergerät genannt, kann vorliegend ein elektrisches Gerät verstanden werden, das Sensorsignale verarbeitet und in Abhängigkeit davon Steuer- und/oder Datensignale ausgibt. Das Steuergerät kann eine Schnittstelle aufweisen, die hard- und/oder softwaremäßig ausgebildet sein kann. Bei einer hardwaremäßigen Ausbildung können die Schnittstellen beispielsweise Teil eines sogenannten System-ASICs sein, der verschiedenste Funktionen des Steuergeräts beinhaltet. Es ist jedoch auch möglich, dass die Schnittstellen eigene, integrierte Schaltkreise sind oder zumindest teilweise aus diskreten Bauelementen bestehen. Bei einer softwaremäßigen Ausbildung können die Schnittstellen Softwaremodule sein, die beispielsweise auf einem Mikrocontroller neben anderen Softwaremodulen vorhanden sind.

Ferner wird ein Antriebssystem einer Lenkung eines Fahrzeugs vorgeschlagen, insbesondere einer Steer-by-Wire-Lenkung, aufweisend ein Versorgungsnetz und einen durch das Versorgungsnetz mit elektrischer Energie versorgbaren Elektromotor zur Ansteuerung einer Lenkstange der Lenkung, wobei das Antriebssystem ferner eine Steuereinrichtung zur Ansteuerung des Elektromotors aufweist.

In einer Ausführung ist das Versorgungsnetz ein Spannungsversorgungsnetz mit Spannungen von weniger als 1000V.

Ferner wird eine Steer-by-wire-Lenkung für ein Kraftfahrzeug vorgeschlagen, aufweisend das Antriebssystem. Eine Steer-by-wire-Lenkung ist eine von einer mechanischen Lenkhandhabe, z.B. einem Lenkrad entkoppelte, zumeist elektromechanische Einheit. Aufgrund von Lenksignalen und einem oder mehreren Parametern wie z.B.

Fahrzeuggeschwindigkeit, Lenkradwinkel, aktuell vorliegenden Lenkwinkeln an Vorder- und/oder Hinterachse, Gierbeschleunigung und/oder Querbearleunigung des Fahrzeugs etc., werden in einem Steuergerät Lenksignale generiert. Die Lenkbewegung erfolgt mittels zumindest eines Aktuators der Steer-by-wire-Lenkung, welcher vom Steuergerät Lenksignale erhält. Bspw. kann in dem Aktuator mittels eines Spindeltriebs eine Spindel oder Lenkstange axial verlagert werden, welche unmittelbar oder mittelbar mit Radträgern gelenkig gekoppelt ist.

Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen der Erfindung, anhand der Figuren, die erfindungsgemäße Einzelheiten zeigen. Die einzelnen Merkmale können je einzeln für sich oder zu mehreren in beliebiger Kombination bei einer Variante der Erfindung verwirklicht sein.

Bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung werden nachfolgend anhand der beigefügten Zeichnung näher erläutert.

- Figur 1 zeigt schematisch eine Regelung eines Elektromotors gemäß dem Stand der Technik.
- Figur 2 zeigt schematisch eine Regelung eines Elektromotors gemäß einer Ausführung der Erfindung.
- Figur 3 zeigt Zeit-Diagramme verschiedener Regelparameter eines Elektromotors als Vergleich von zwei Arbeitspunktstrategien.
- Figur 4 zeigt eine schematische Draufsicht auf eine Hinterachse eines Fahrzeugs.

In den nachfolgenden Figurenbeschreibungen sind gleiche Elemente bzw. Funktionen mit gleichen Bezugszeichen versehen.

Eine PSM ist eine Drehfeldmaschine mit einem auf oder im Läufer angeordneten Permanentmagneten. Der zumindest eine Stator umfasst Wicklungen dreier oder mehr Phasen und bildet sich aus den mit einem Winkel von 120 Grad verteilten Phasen. Die Spulen der Phasen sind auf einem Umfang um eine Drehachse verteilt, gegenüber welcher der Rotor bezüglich des Stators drehbar gelagert ist.

Die Zustandsgrößen der PSM wie z.B. Strom, Spannung, Fluss etc., können in dem Drei-Koordinatensystem (U, V, W) dargestellt werden. Für die Regelung der PSM werden die Zustandsgrößen der PSM in ein mit dem Rotor drehendes Koordinatensystem (d, q) transformiert, wobei die d-Achse in gleichem Sinn des Permanentflusses des Läufers gerichtet wird. Das sogenannte α , β – System ist das feste Zwei-Koordinatensystem des Stators. Mit der Transformation der Zustandsgrößen in das d, q-Koordinatensystem vereinfachen sich die differentiellen Gleichungen der PSM und die PSM kann wie eine Gleichstrommaschine geregelt werden. Dies wird als feldorientierte Regelung oder FOR (engl. FOC) bezeichnet. Bei einer feldorientierten Regelung FOR wird ein Gesamt-Soll-Strom, der durch die PSM fließen soll, bezüglich eines rotor(fluss)festen d, q-Koordinatensystems bestimmt, so dass einige Steuer- bzw. Regelungsvorgänge einfacher durchzuführen sind und einige Berechnungen vereinfacht werden.

Nachfolgend wird die Regelung einer PSM gemäß Stand der Technik anhand von Figur 1 beschrieben. Eingangsgrößen der feldorientierten Regelung (FOR) sind der d- und q-Strom I_{dset} , I_{qset} , I_{dqmeas} sowie Drehwinkel Θ und Winkelgeschwindigkeit ω (Drehzahl) des Elektromotors 29, wie in Figur 1 gezeigt. Dabei ist der I_{qset} ein festgelegter Eingangsstrom (q-Komponente), der wie folgt erhalten wird. In einer Positionskontrolleinrichtung 200 werden eine vorgegebene Position POS_{set} , z.B. aufgrund einer Lenkanforderung, und eine gemessene Position POS_{meas} des Elektromotors 29 erfasst und verarbeitet. Als Ausgangssignal entsteht eine festgelegte Drehzahl n_{set} für den Elektromotor 29. Diese wird in einer Drehzahlkontrolleinrichtung 201 zusammen mit einer gemessenen Drehzahl n_{meas} verarbeitet, so dass ein vorgegebener q-Strom I_{qset} an die FOR ausgegeben wird, der das Drehmoment bestimmt.

Des Weiteren ist I_{dset} ein festgelegter Eingangsstrom (d-Komponente), der wie folgt erhalten wird. Im Normalbetrieb ist bekanntermaßen I_{dset} gleich Null ($I_{dset}=0$). Bei hohen Drehzahlen wird ein negativer d-Anteil zusätzlich zu I_{dset} eingeprägt (Feldschwächung, Block 100 mit Eingangsspannungen U_{dq} und U_{supply}), um den Elektromotor 29 im Feldschwächebereich zu betreiben und dadurch die Drehzahl weiter zu erhöhen (Block 300). Dabei wird bekanntermaßen ein negativer d-Strom als I_{dset} an die FOR übergeben. Somit kann die geforderte Position schneller angefahren werden, auch wenn das maximale Drehmoment bereits erreicht ist. Im Feldschwächebereich muss das Drehmoment herabgesetzt werden, da durch den negativen d-Strom nicht mehr so viel q-Strom für die Drehmomentbildung zur Verfügung steht.

In der FOR werden die Strom-Eingangsgrößen I_{dset} , I_{qset} , I_{dqmeas} (gemessener d- und q-Strom), Drehwinkel Θ und Winkelgeschwindigkeit ω verarbeitet, so dass daraus die Spannungswerte U_d , U_q (d- und q-Komponente) resultieren. Diese werden zusammen mit dem Drehwinkel Θ in einem Umsetzer 300 verarbeitet, insbesondere in dreiphasige Wechselgrößen U_{abc} umgewandelt und an eine Leistungselektronik 400 als Eingangssignal übergeben, welche mit der Versorgungsspannung U_{supply} versorgt wird und den Elektromotor 29 ansteuert, der dann mit dem Drehwinkel Θ und der Winkelgeschwindigkeit ω (Drehzahl) wie vorgegeben die Lenkung umsetzt.

Die FOR läuft auf einer (oder mehreren) Verarbeitungseinrichtungen ab, die vorzugsweise mindestens einen programmierbaren Mikrocomputer umfasst bzw. umfassen.

Wie bereits einleitend erwähnt, erzeugen elektromechanische Stellantriebe beim Abbremsen aufgrund der in der Mechanik gespeicherten kinetischen Energie einen Energiefluss (Rückspeisestrom) zurück in das Versorgungsnetz (Rekuperation). Die Höhe dieses Energieflusses ist in automobilen Anwendungen oftmals begrenzt, um das Versorgungsnetz nicht zu überlasten. Es kann z.B. gefordert sein, dass nur eine sehr geringe oder keine Rückspeisung in die Batterie/den Akku gestattet ist. Diese Anforderung stellt eine zusätzliche Randbedingung bei der Auslegung des mechatronischen Systems, insbesondere der Ansteuerung (Regelung) des Elektromotors 29, dar und muss entsprechend beachtet werden. Dabei können sich Limitierungen hinsichtlich Performance oder erhöhte Systemkosten durch zusätzliche Elektronik wie

einen Einbau von Bremswiderständen ergeben. Auch kann eine Limitierung der Stellerdynamik nötig sein, also ein langsames Anfahren einer vorgegebenen Position, damit das System über einen längeren Zeitraum abbremst und damit geringere Rückspeiseströme entstehen. Allerdings führt dies zu einer unerwünschten Limitierung der Performance des Gesamtsystems.

Um keine zusätzliche Elektronik verbauen zu müssen und damit Bauraum zu benötigen, und um eine möglichst geringe Limitierung der Systemperformance in Kauf nehmen zu müssen, wird erfindungsgemäß vorgeschlagen, die Ansteuer- bzw. Regelstrategie des Elektromotors 29 anzupassen, wie in Figur 2 gezeigt, welche eine Erweiterung der in Figur 1 gezeigten Komponenten darstellt. Die bereits für Figur 1 beschriebenen Komponenten bleiben unverändert und werden deshalb nicht mehr beschrieben.

Ziel der Erfindung ist es, eine Reduzierung von generatorisch (durch Abbremsen des Elektromotors 29) erzeugten Energiemengen zu erreichen, um einen Rückfluss in das Versorgungsnetz des Fahrzeugs zu begrenzen. Es wird dabei Energie direkt im Elektromotor 29 vernichtet, also in Wärme umgewandelt. Hierfür wird zusätzlich zum negativen d-Strom der Feldschwächung ein zusätzlicher, negativer d-Strom I_d an die FOR übergeben. Dieser zusätzliche negative d-Strom I_d wird wie folgt erhalten. Der Versorgungsstrom I_{supply} (Ibat in Figur 3) des Energiespeichers (Batterie oder Akkumulator) des Fahrzeugs wird z.B. aus einer Messung oder einer Abschätzung aus intern vorhandenen Größen wie Versorgungsspannung U_{supply} , Ausgangsspannung U_{dq} , Eingangsstrom I_{dq} erhalten (Block 500). Dieser aktuelle Versorgungsstrom I_{supply} wird dann derart verarbeitet, dass eine Erfassung erfolgt, ob der aktuelle Versorgungsstrom I_{supply} ein Rückspeisestrom ist, der Energie (Strom) zurück in Richtung Versorgungsnetz speist. Wenn dies der Fall ist, wird weiter bestimmt, ob der Rückspeisestrom einen vorgegebenen Grenzwert erreicht oder überschreitet. Wenn dies der Fall ist, insbesondere wenn der Rückspeisestrom also den Grenzwert (Sollstrom) überschreitet, wird als Maßnahme mittels einer Kontrollstrategie 600 ein zusätzlicher negativer d-Strom I_d ermittelt und der FOR übergeben. Der zusätzliche negative d-Strom I_d wird dabei so gewählt, dass der Rückspeisestrom wieder unterhalb des Grenzwerts (Sollstrom) sinkt. Der zusätzliche d-Strom ist also ebenfalls ein

Feldschwächestrom, um die Feldschwächung zu erhöhen, wobei eine neue Abhängigkeit geschaffen wird, um den Rekuperationsstrom zu begrenzen.

Die Kontrollstrategie 600, um den zusätzlichen negativen d-Strom I_d an die FOR zu übergeben, kann als proportionale Steuerung (auch als Proportionalsteuerung bezeichnet) oder als Regelung erfolgen. Im Falle einer Steuerung wird ein Wert für den der FOR zu übergebenden negativen Strom I_d ermittelt, welcher den aufgrund des Abbremsens erzeugten Rückspeisestrom derart beeinflusst, dass dieser den vorgegebenen Grenzwert (Sollstrom) nicht (mehr) überschreitet. Im Falle einer Regelung werden die Rückspeiseströme auf den geforderten minimalen Grenzwert (Sollstrom) geregelt, also dynamisch in Abhängigkeit des Rückspeisestroms angepasst. Die Regelung kann unterschiedlich ausgestaltet sein und z.B. einen PID (Proportional-Integral-Differential-Regler)-Regler verwenden.

In beiden Fällen erfolgt eine Begrenzung gegen Überstrom und positive d-Ströme. Besonders vorteilhaft erfolgt die Begrenzung eines positiven d-Stroms auf 0 Ampere, was den energetisch besten Fall darstellt und im Normalfall eingestellt werden sollte.

Wie bereits beschrieben, wird durch die Erhöhung des Feldschwächeanteils, also des der FOR zugeführten (negativen) d-Stroms, Energie direkt im Elektromotor 29 vernichtet, also in Wärme umgewandelt. Dabei wird in der Regel nur ein Teil der Energie vernichtet, es erfolgt also eine Begrenzung, d.h. eine teilweise Reduzierung. In speziellen Anwendungsfällen kann aber auch die gesamte Energie vernichtet werden. Da die Bremsvorgänge im Lenkbereich relativ kurz sind, ist es unwahrscheinlich, dass durch diese Maßnahme eine Temperatur im Stellerantrieb, insbesondere im Elektromotor 29, zu hoch wird.

In Figur 3 sind Diagramme gezeigt, die einen Vergleich von zwei Arbeitspunktstrategien darstellen. Gezeigt sind Drehzahl n_{motor} (speed [rpm], oberstes Diagramm), Drehmoment T_{motor} (Torque [Nm], zweites Diagramm von oben), Ströme I_d (Currents [A], zweites Diagramm von unten) und Strom im Energiespeicher I_{bat} (Battery Current [A], unterstes Diagramm, entspricht I_{supply} in Figuren 1 und 2) über die Zeit (Time [s]). Als Betriebsszenario ist ein Bremsen des Elektromotors 29 mit

angeschlossenem Trägheitsmoment von 2000rpm in den Stillstand angenommen, wie im obersten Diagramm zu sehen. Die gestrichelte Linie (mit „Standard“ in den Diagrammen bezeichnet) zeigt jeweils die Werte bei Ausführung des Verfahrens gemäß Stand der Technik mit Feldschwächebetrieb, aber ohne zusätzlichen negativen d-Strom I_d . Die durchgezogene Linie (mit „Innovation“ in den Diagrammen bezeichnet) zeigt jeweils die Werte bei Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens. Drehmoment und Drehzahlverlauf sind in beiden Arbeitspunktstrategien identisch (in den Diagrammen Drehzahl und Drehmoment liegen die Linien übereinander). Es ist also zu sehen, dass die übergeordnete Drehzahlregelung von dem erfindungsgemäß vorgeschlagenen Verfahren nicht beeinflusst wird.

Um den Rückspeisestrom zu reduzieren, wird beim Bremsen ein erhöhter negativer d-Strom in dem Elektromotor 29 eingestellt, wie im zweiten Diagramm von unten gezeigt (I_q ist unverändert, die Linien liegen quasi übereinander). Der zusätzliche negative d-Strom verursacht erhöhte Stromwärmeverluste (gemäß $R \text{ (Widerstand)} \times I^2$) im Elektromotor 29, wie im untersten Diagramm gezeigt. Die zusätzlichen Verluste führen dazu, dass weniger mechanische Energie beim Bremsen ins Versorgungsnetz zurückgeführt werden muss. Bei konstanter Spannung im Energiespeicher lässt sich dadurch der auftretende negative Rückspeisestrom verringern.

Das Versorgungsnetz ist in diesem Falle ein Spannungsnetz bis zu 1000 V, , also z.B. 12V, 24V, 48V, 230V, 400V, 600V, 650V, 800V. Der Elektromotor 29 dient als Antriebsmaschine für eine Lenkung, insbesondere eine Steer-by-Wire-Lenkung. Als Elektromotor 29 können alle gängigen Elektromotoren 29 für Lenksysteme verwendet werden, auch sogenannte High-Cogging-Motoren, also Elektromotoren mit hohem Rastmoment. Besonders effektiv kann das Verfahren angewendet werden bei Systemen, welche bei niedriger Spannung, z.B. 12V, und hohen Strömen arbeiten, also z.B. im Bereich von 100A, wie es bei Lenksystemen häufig der Fall ist.

Das Verfahren wird in einem Lenksystem eines Fahrzeugs umgesetzt, wobei das Lenksystem insbesondere eine Steer-by-wire-Lenkung ist, wobei die Achse sowohl eine Vorder- als auch eine Hinterachse oder eine zwischen Vorder- und Hinterachse befindliche Achse eines Kraftfahrzeugs sein kann. Die Lenkung kann für ein

Kraftfahrzeug verwendet werden, das beispielsweise für einen Transport von Personen und zusätzlich oder alternativ von Gegenständen vorgesehen ist.

In der schematischen Darstellung gemäß Fig. 4 ist eine Fahrzeugachse gezeigt, hier dargestellt als eine Hinterachse (in Draufsicht) mit einem Hilfsrahmen 2, der an einem Fahrzeugaufbau befestigt ist bzw. diesen bildet und mit der Karosserie eines Kraftfahrzeuges verbunden ist. Die Erfindung ist jedoch nicht auf eine Lenkung einer Hinterachse beschränkt. Die Räder 5 und 6 sind mittels Lenkern 3, 4 als Teil einer Radaufhängung an dem Hilfsrahmen 2 angelenkt. An dem Hilfsrahmen 2 ist ein Aktuator 10 einer Steer-by-Wire-Lenkung 12 angeordnet. Der Aktuator 10 ist mit seinem Gehäuse 22 an dem Hilfsrahmen 2 befestigt. Der Aktuator 10 weist in der vorliegenden Ausführung eine durchgehende Lenkstange 24 auf, welche durch das Gehäuse 22 des Aktuators 10 hindurchgeführt ist. Der Antriebsmotor in Form eines Elektromotors 29 ist achsparallel zur Lenkstange 24 angeordnet, kann aber auch in anderer Art und Weise, z.B. als Hohlwellenmotor, ausgeführt sein. An den Enden der Lenkstange 24 sind Spurstangen 23, 25 angelenkt, welche mit dem von dem Aktuator 10 abgewandten Ende jeweils mit einem Radträger 7 der Räder 5 und 6 gelenkig verbunden sind. Die axiale Verlagerung der Lenkstange 24 erfolgt aufgrund eines Rotations- / Translationswandlers, welcher z.B. als ein Bewegungsgewinde eines Spindeltriebs dargestellt ist. Es ist offensichtlich, dass bei einer axialen Verlagerung, also einer Verlagerung der Lenkstange 24 entlang der Längsachse in die eine oder andere Richtung eine Veränderung des Radlenkwinkels 8, 9 erfolgt, weil die Spurstangen 23, 25 eine Zwangsverbindung zwischen Rad 5, 6 bzw. Radträger 7 und dem Aktuator 10 darstellen. Zur Lenkung der Räder 5, 6 sind diese um deren Hochachse drehbar über den Radträger 7 an der Radaufhängung 3, 4 angelenkt. Der Aktuator 10 ist mit anderen Worten eine Vorrichtung, welche ein Betreiben der Lenkung 12 ermöglicht. Bei Drehbewegung des Elektromotors bzw. Antriebsmotors 29 wird die Spindelmutter (bevorzugt schlupffrei) in Drehbewegung um die Längsachse versetzt wird. Je nach Drehrichtung der Spindelmutter erfolgt eine lineare Verlagerung der Lenkstange 24 in die eine oder andere Richtung entlang der Längsachse in Abhängigkeit der Drehrichtung des Elektromotors 29.

Ein Steer-by-Wire-Lenksystem weist eine Lenkstange 24 und ein Getriebe auf, das mit dem Elektromotor 29 in Wirkverbindung steht und in bekannter Art und Weise die vom Elektromotor 29 ausgegebene Rotationskraft mittels eines Zahnriementriebs bzw. Spindeltriebs gewandelt in eine Translationskraft zur Lenkstange 24 und damit auf die Räder 5, 6 zur Änderung des Radlenkwinkels 8, 9 überträgt. Der Elektromotor 29 weist einen (nicht gezeigten) Stator und einen (nicht gezeigten) Rotor auf. Die Ansteuerung (Regelung) des Elektromotors 29 erfolgt durch ein oder mehrere Steuereinrichtungen, die mit einem Versorgungsnetz eines Lenksystems eines Fahrzeugs und einem Elektromotor zum Antreiben des Lenksystems in Signalverbindung ist bzw. sind.

Das vorgeschlagene Verfahren ist in der bzw. den Steuereinrichtungen als Computerprogramm mit entsprechendem Programmcode implementiert. Ferner kann auch ein maschinenlesbares Speichermedium vorgesehen sein, auf welchem das Computerprogramm gespeichert ist. Eine Steuereinrichtung ist eine Recheneinheit, welche ausgelegt ist, um Signale wie Spannungssignale, Positionssignale von Sensoreinheiten und anderen Komponenten des Antriebssystems oder des Kraftfahrzeugs zu empfangen und derart zu verarbeiten, dass ein Signal ausgegeben wird, mit welchem eine Komponente, insbesondere ein Elektromotor 29 zur Ansteuerung eines Lenksystems wie eines Steer-by-Wire-Lenksystems angesteuert werden kann.

Bezugszeichen

2	Hilfsrahmen, Fahrzeugaufbau
3, 4	Lenker
5, 6	Rad
7	Radträger
8, 9	Radlenkwinkel
10	Aktuator
12	Lenkung, Steer-by-wire-Lenkung
22	Gehäuse
23, 25	Spurstange
24	Lenkstange
27, 28	Gelenkverbindungen
29	Elektromotor
100	Block Feldschwächebetrieb
200	Positionskontrolleinrichtung
201	Drehzahlkontrolleinrichtung
FOR	feldorientierte Regelung
300	Umsetzer
400	Leistungselektronik
500	Verarbeitungseinrichtung zur Erfassung des Versorgungsstroms
600	Kontrollstrategie

Patentansprüche

1. Verfahren zur Ansteuerung eines Elektromotors (29) eines Lenksystems eines Fahrzeugs, insbesondere eines Steer-by-wire-Lenksystems (12), wobei die Ansteuerung des Elektromotors (29) mittels einer feldorientierten Regelung (FOR) erfolgt, wobei ein q-Strom (I_{qset}) zum Aufbau des Drehmoments des Elektromotors (29) verwendet wird, und ein d-Strom als vorgegebener d-Strom (I_{dset}) im Regelbetrieb Null ist, und im Falle eines Feldschwächebetriebs der feldorientierten Regelung (FOR) ein negativer d-Strom als Feldschwächungsanteil zusätzlich zum vorgegebenen d-Strom (I_{dset}) zugeführt wird, und wobei

im Falle eines Abbremsens des Elektromotors (29) eine Erfassung erfolgt, in welcher Höhe ein Rückspeisestrom in das Versorgungsnetz des Fahrzeugs fließt, und im Falle, dass ein vorgegebener Grenzwert des Rückspeisestroms erreicht oder überschritten wird, der Feldschwächungsanteil erhöht wird, indem der feldorientierten Regelung (FOR) ein zusätzlicher negativer d-Strom (I_d) zur Begrenzung des Rückspeisestroms auf den vorgegebenen Grenzwert zugeführt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Höhe des negativen d-Stroms zur Begrenzung des Rückspeisestroms derart mittels einer proportionalen Steuerung angepasst wird, dass Rückspeiseströme in das Versorgungsnetz auf den vorgegebenen Grenzwert begrenzt werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Höhe des negativen d-Stroms zur Begrenzung des Rückspeisestroms mittels eines Reglers angepasst wird, der Rückspeiseströme in das Versorgungsnetz auf den vorgegebenen Grenzwert regelt.

4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, wobei eine zusätzliche Begrenzung gegen Überstrom und positive d-Ströme vorgesehen ist.

5. Computerprogramm, das dazu eingerichtet ist, einzelne oder sämtliche Schritte des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 4 mittels Programmcode auf einer Recheneinheit auszuführen, welche Teil einer elektronischen Steuereinrichtung ist.

6. Maschinenlesbares Speichermedium, auf dem das Computerprogramm nach Anspruch 5 gespeichert ist.
7. Steuereinrichtung, die mit einem Versorgungsnetz eines Lenksystems eines Fahrzeugs und einem Elektromotor (29) zum Antreiben des Lenksystems in Signalverbindung ist, und die dazu ausgebildet ist, das Verfahren zur Ansteuerung des Elektromotors (29) nach einem der vorhergehenden Ansprüche auszuführen.
8. Steuereinrichtung nach Anspruch 7, wobei das Versorgungsnetz ein Spannungsversorgungsnetz mit Spannungen von weniger als 1000V ist.
9. Antriebssystem einer Lenkung eines Fahrzeugs nach Anspruch 8, insbesondere einer Steer-by-Wire-Lenkung (12), aufweisend ein Versorgungsnetz und einen durch das Versorgungsnetz mit elektrischer Energie versorgbaren Elektromotor (29) zur Ansteuerung einer Lenkstange (24) der Lenkung, wobei das Antriebssystem ferner eine Steuereinrichtung zur Ansteuerung des Elektromotors nach Anspruch 7 oder 8 aufweist.
10. Steer-by-Wire-Lenkung (12) eines Fahrzeugs, aufweisend das Antriebssystem nach Anspruch 9.

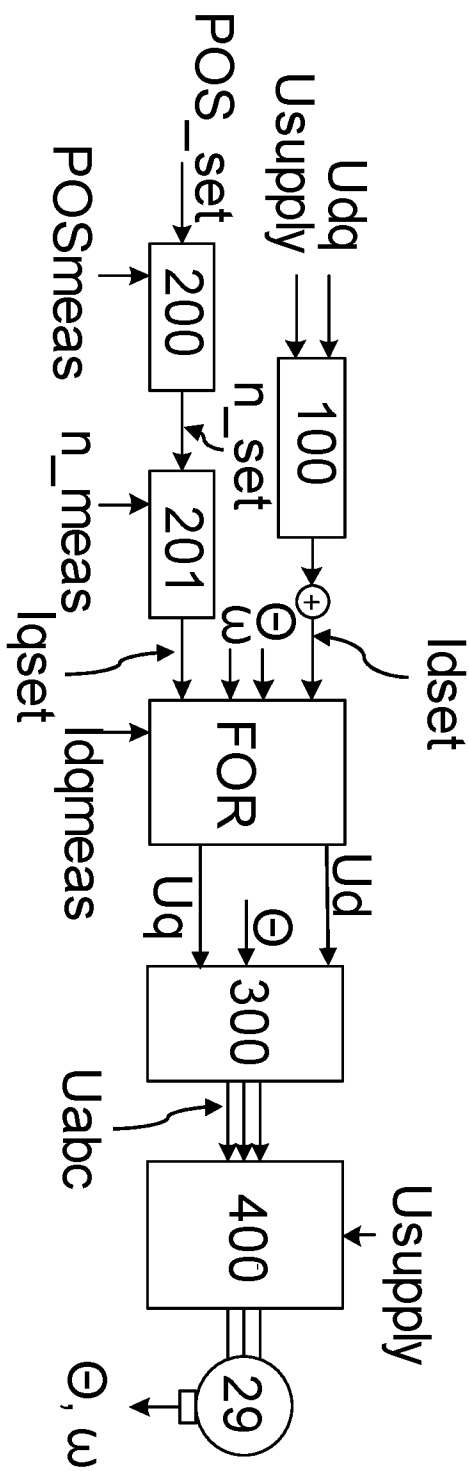
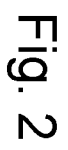


Fig. 1



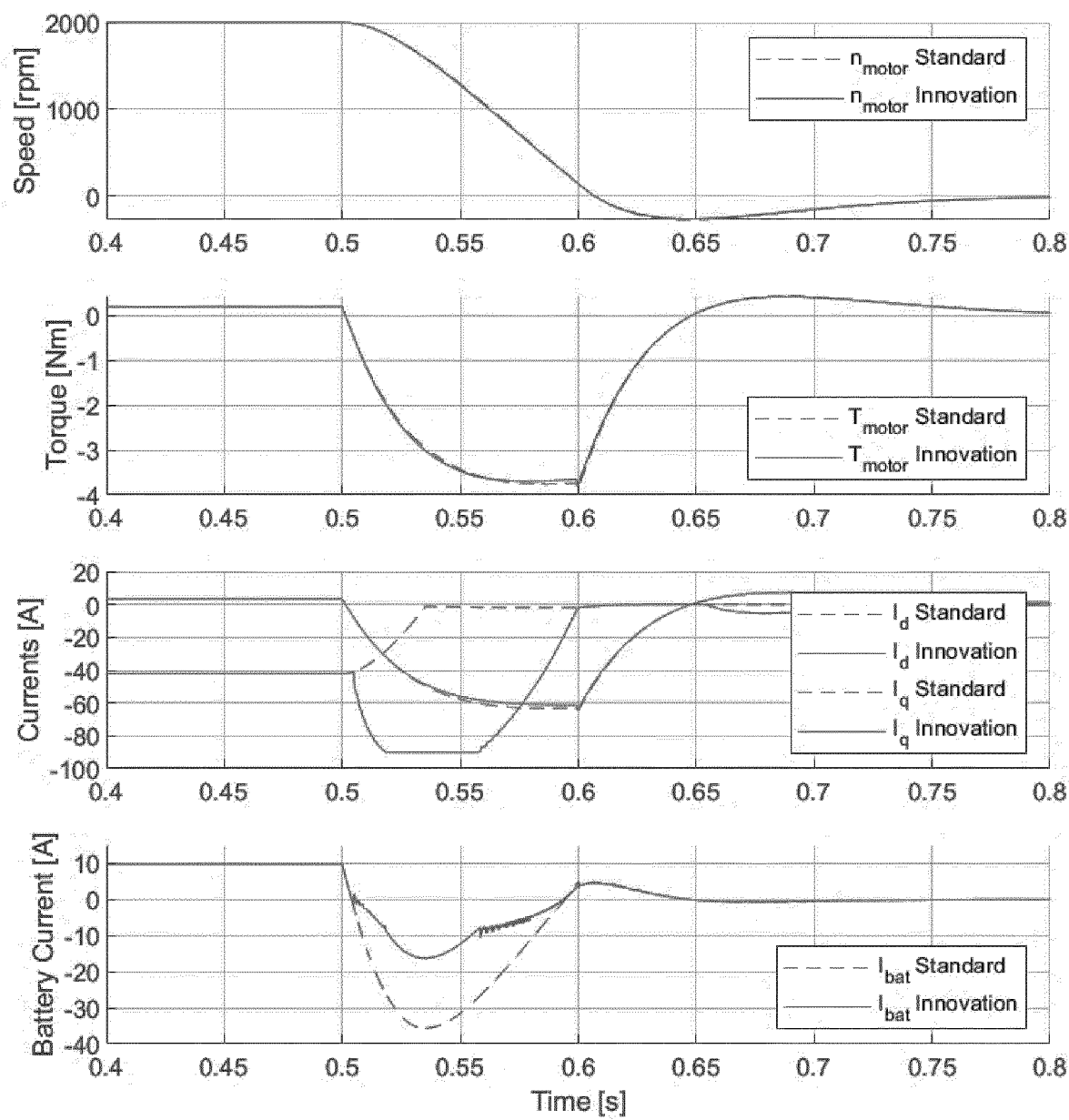
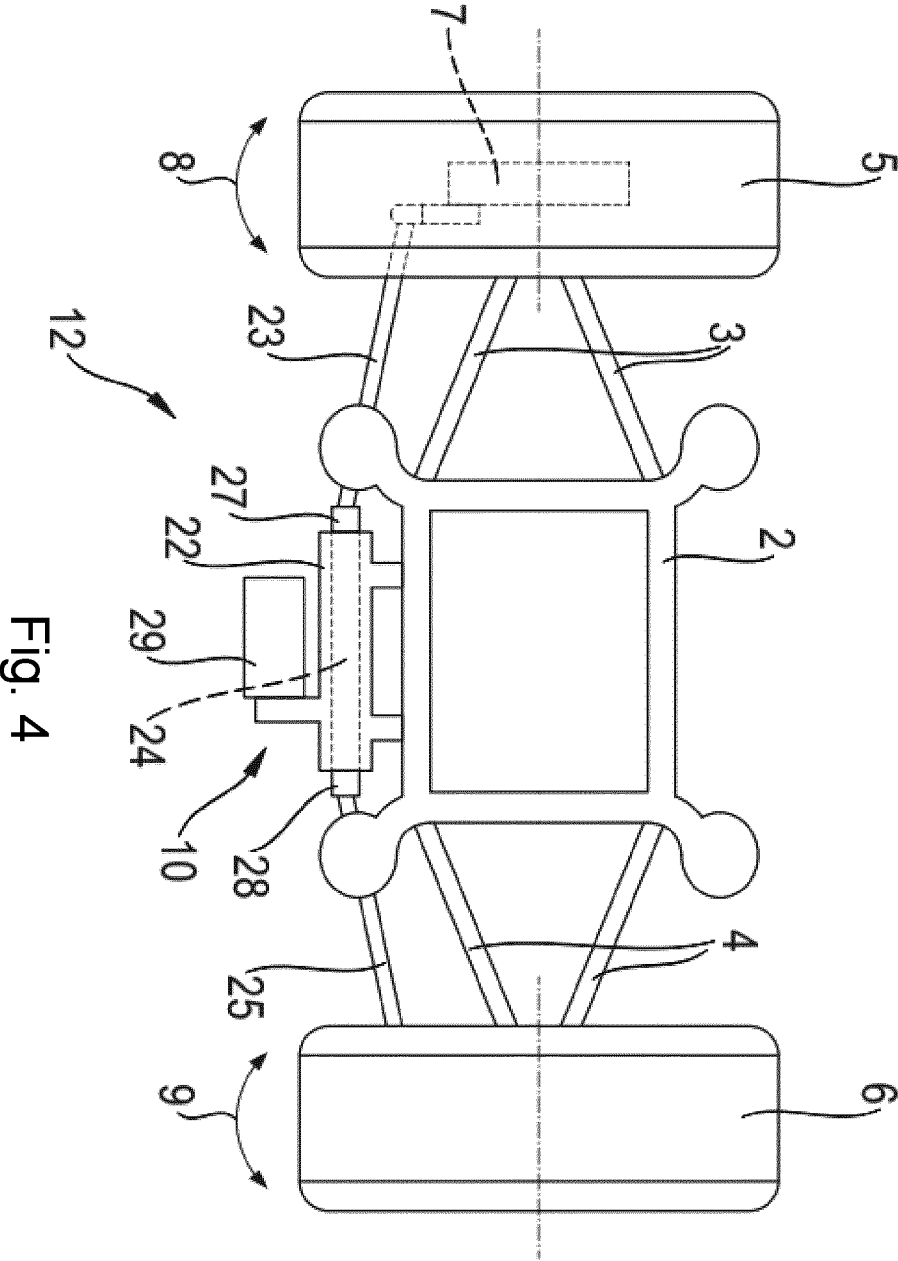


Fig. 3



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2024/052105

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**B62D 5/04**(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

B62D

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2005045414 A1 (TAKAGI MASANORI [JP] ET AL) 03 March 2005 (2005-03-03) paragraphs [0035], [0048], [0051]	1-10
A	US 2018244308 A1 (FURUKAWA AKIRA [JP] ET AL) 30 August 2018 (2018-08-30) paragraphs [0040] - [0042]; figure 1	1-10

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

15 April 2024

Date of mailing of the international search report

24 April 2024

Name and mailing address of the ISA/EP

European Patent Office
p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk
Netherlands (Kingdom of the)

Telephone No. (+31-70)340-2040

Facsimile No. (+31-70)340-3016

Authorized officer

Areal Calama, A

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/EP2024/052105

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	2005045414	A1	03 March 2005	CN	1497832	A	19 May 2004
				DE	60318630	T2	15 January 2009
				EP	1378419	A2	07 January 2004
				EP	1625991	A1	15 February 2006
				JP	3849979	B2	22 November 2006
				JP	2004040883	A	05 February 2004
				MY	136104	A	29 August 2008
				US	2005045414	A1	03 March 2005
US	2018244308	A1	30 August 2018	CN	108352800	A	31 July 2018
				EP	3373447	A1	12 September 2018
				JP	6395171	B2	26 September 2018
				JP	WO2017077567	A1	22 February 2018
				US	2018244308	A1	30 August 2018
				WO	2017077567	A1	11 May 2017

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. B62D5/04
ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
B62D

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)
EPO-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	US 2005/045414 A1 (TAKAGI MASANORI [JP] ET AL) 3. März 2005 (2005-03-03) Absätze [0035], [0048], [0051] -----	1-10
A	US 2018/244308 A1 (FURUKAWA AKIRA [JP] ET AL) 30. August 2018 (2018-08-30) Absätze [0040] - [0042]; Abbildung 1 -----	1-10

☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie

- * Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
- "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung:: die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung:: die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche 15. April 2024	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts 24/04/2024
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter Areal Calama, A

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2024/052105

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung		Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
US 2005045414	A1	03-03-2005	CN	1497832 A		19-05-2004
			DE	60318630 T2		15-01-2009
			EP	1378419 A2		07-01-2004
			EP	1625991 A1		15-02-2006
			JP	3849979 B2		22-11-2006
			JP	2004040883 A		05-02-2004
			MY	136104 A		29-08-2008
			US	2005045414 A1		03-03-2005

US 2018244308	A1	30-08-2018	CN	108352800 A		31-07-2018
			EP	3373447 A1		12-09-2018
			JP	6395171 B2		26-09-2018
			JP	WO2017077567 A1		22-02-2018
			US	2018244308 A1		30-08-2018
			WO	2017077567 A1		11-05-2017
