

(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  
16. Mai 2019 (16.05.2019)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2019/091652 A1**

(51) Internationale Patentklassifikation:  
*H02K 3/28* (2006.01) *H02K 3/47* (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2018/075555

(22) Internationales Anmeldedatum:  
21. September 2018 (21.09.2018)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
10 2017 219 735.8  
07. November 2017 (07.11.2017) DE

(71) Anmelder: **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT**  
[DE/DE]; Werner-von-Siemens-Straße 1, 80333 München (DE).

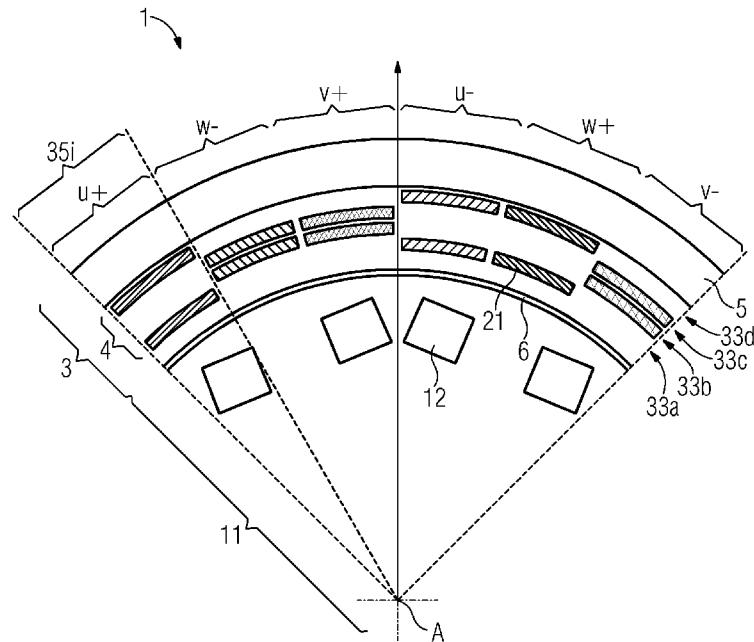
(72) Erfinder: **FRANK, Michael**; Erlanger Straße 27C, 91080 Uttenreuth (DE). **GRUNDMANN, Jörn**; Waldstr. 39, 91091 Großenseebach (DE). **WILKE, Markus**; Eskilstunastr. 38, 91054 Erlangen (DE).

(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, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, 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, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(54) Title: STATOR WINDING WITH INCREASED POWER DENSITY

(54) Bezeichnung: STATORWICKLUNG MIT ERHÖHTER LEISTUNGSDICHTE

FIG 4



(57) Abstract: A stator (3) for an electric AC machine (1) is specified, - wherein the stator (3) has a stator winding (4) arranged about a central axis (A) and comprising a plurality of conductor windings, - wherein said conductor windings are grouped to form a plurality n of electrical phases (u,v,w), - wherein the stator winding (4) has a plurality m of winding layers (33a,33b,33c,33d) - wherein the conductor windings of a phase (u,v,w) each have a plurality i of axially oriented conductor limbs (21), which are connected to one another in their two axial end regions (17) in pairs by in each case two winding heads (23a) so that a plurality k of individual coils (31) is formed for each phase (u,v,w), - wherein, as seen in the circumferential direction, the axial conductor limbs (21) of the individual phases (u,v,w) follow one another in alternation in the same order, - wherein the two winding heads (23a) of a given individual coil (31) run within



WO 2019/091652 A1

**(84) Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, 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, 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)

---

a winding layer (33a,33b,33c,33d) - and wherein the sequence of the axial conductor limbs (21) of the respective phases (u,v,w) and the distribution of the individual coils (31) on the individual winding layers (33a,33b,33c,33d) are selected so that crossovers within the individual winding layers (33a,33b,33c,33d) are prevented in the region of the winding heads (23a). A machine (1) comprising such a stator (3) is also specified.

**(57) Zusammenfassung:** Es wird ein Stator (3) für eine elektrische Wechselstrommaschine (1) angegeben, - wobei der Stator (3) eine um eine zentrale Achse (A) angeordnete Statorwicklung (4) mit einer Mehrzahl von Leiterwindungen aufweist, - wobei diese Leiterwindungen zu einer Mehrzahl n elektrischer Stränge (u,v,w) gruppiert sind, - wobei die Statorwicklung (4) eine Mehrzahl m von Wicklungslagen (33a,33b,33c,33d) aufweist - wobei die Leiterwindungen eines Strangs (u,v,w) jeweils eine Mehrzahl i von axial ausgerichteten Leiterschekeln (21) aufweisen, welche in ihren beiden axialen Endbereichen (17) paarweise durch jeweils zwei Wickelköpfe (23a) miteinander verbunden sind, so dass für jeden Strang (u,v,w) eine Mehrzahl k von Einzelspulen (31) gebildet ist, - wobei in Umfangsrichtung betrachtet die axialen Leiterschekel (21) der einzelnen Stränge (u,v,w) in gleichbleibender Reihenfolge abwechselnd aufeinanderfolgen, - wobei die beiden Wickelköpfe (23a) einer gegebenen Einzelspule (31) innerhalb einer Wicklungslage (33a,33b,33c,33d) verlaufen - und wobei die Abfolge der axialen Leiterschekel (21) der jeweiligen Stränge (u,v,w) und die Verteilung der Einzelspulen (31) auf die einzelnen Wicklungslagen (33a,33b,33c,33d) so gewählt sind, dass im Bereich der Wickelköpfe (23a) Überkreuzungen innerhalb der einzelnen Wicklungslagen (33a,33b,33c,33d) vermieden werden. Weiterhin wird eine Maschine (1) mit einem solchen Stator (3) angegeben.

Beschreibung

Statorwicklung mit erhöhter Leistungsdichte

5 Die vorliegende Erfindung betrifft einen Stator für eine elektrische Wechselstrommaschine, wobei der Stator eine um eine zentrale Achse angeordnete Statorwicklung mit einer Mehrzahl von Leiterwindungen aufweist, wobei diese Leiterwin-  
10 dungen zu einer Mehrzahl elektrischer Stränge gruppiert sind und wobei die Statorwicklung eine Mehrzahl von Wicklungslagen aufweist. Weiterhin betrifft die Erfindung eine elektrische Maschine mit einem solchen Stator.

Nach dem Stand der Technik sind typische Statorwicklungen der  
15 eingangs genannten Art meist als verteilte, ungeschrägte Wicklungen ausgeführt, in denen eine Vielzahl von axial orientierten Leiterschenkeln vorliegt, die den wesentlichen für die elektrische Induktion wirksamen Teil der Wicklung ausmachen. Diese axialen Leiterschenkel sind häufig auf mehrere  
20 Wicklungslagen verteilt und typischerweise in Nuten eines Eisenjoch angeordnet. Diese geraden Abschnitte werden dann in ihren axialen Endbereichen durch sogenannte Wickelköpfe verbunden, wobei durch die Wickelköpfe die geraden Abschnitte der einzelnen Windungen in Umfangsrichtung überbrückt werden,  
25 wobei häufig auch ein Wechsel zwischen den einzelnen Wicklungslagen stattfindet. Nachteilig bei einer solchen klassischen Geometrie ist, dass diese Wickelköpfe einerseits einen hohen Gewichtsbeitrag zum Gesamtgewicht des Stators leisten und andererseits schwer zu kühlen und auch schwer zu fertigen  
30 sind. Die Wickelköpfe haben auch einen hohen Platzbedarf, insbesondere in axialer Richtung, was das Bauvolumen der elektrischen Maschine insgesamt vergrößert und somit auch ein größeres Gehäuse nötig macht. Besonders weit ausladende Wickelköpfe liegen oft dann vor, wenn die Biegeradien der vor-  
35 liegenden Leiter nicht besonders klein gewählt werden können und/oder wenn viele Leiter mit einem großen Wickelschritt (einem großen durch den Wickelkopf zu überbrückenden Umfangsbereich) aneinander vorbei geführt werden müssen. Auch die

Dicke der Leiterisolation und gegebenenfalls vorliegende Kühlkanäle zur Kühlung der Wicklung können zu einem großen Platzbedarf für die Wicklungsköpfe beitragen. Auch die elektrischen Verluste einer Maschine mit großen Wickelköpfen sind unvorteilhaft hoch, da hier ein großer Anteil an für die Induktion nicht genutztem Leitermaterial vorliegt, welches aber zu den ohmschen Leitungsverlusten beiträgt. Um eine Maschine mit hoher Leistungsdichte zu erreichen, ist es daher allgemein vorteilhaft, die Wickelköpfe möglichst kompakt zu gestalten.

Andererseits hat es sich gezeigt, dass eine Optimierung der Leistungsdichte einer Maschine allein aufgrund von zweidimensionalen Überlegungen (also ohne die Berücksichtigung der dreidimensionalen Ausgestaltung der Wicklungsköpfe) häufig zu Bauformen mit vergleichsweise großen Durchmessern und entsprechend kurzer axialer Länge führt. Gerade bei kurzen axialen Baulängen und großen Durchmessern treten aber zwei ungünstige Effekte im Zusammenhang mit den Wicklungsköpfen auf: einerseits tragen die Wicklungsköpfe dann überdurchschnittlich stark zur gesamten Leitermenge des Stators bei und andererseits ist ihr Beitrag zum Drehmoment, verglichen mit dem geraden, axialen Teil der Wicklung, besonders niedrig. Damit wirken sich die großen Wicklungsköpfe hier besonders negativ sowohl auf die Massenbilanz als auch auf die Verlustleistungsbilanz aus. Ebenso ist mit den großen Wicklungsköpfen eine große Wickelkopfstreuinduktivität verknüpft, welche weitere negative Auswirkungen auf das elektromagnetische Verhalten der Maschine hat.

Aufgabe der Erfindung ist es daher, einen Stator für eine elektrische Wechselstrommaschine anzugeben, welcher die genannten Nachteile überwindet. Insbesondere soll ein Stator mit einer Statorwicklung zur Verfügung gestellt werden, bei welcher der Platzbedarf der Wicklungsköpfe, vor allem in axialer Richtung, möglichst klein ist. Hierdurch soll insgesamt eine erhöhte Leistungsdichte erreicht werden. Eine weitere

Aufgabe ist es, eine elektrische Maschine mit einem derartig verbesserten Stator anzugeben.

5 Diese Aufgaben werden durch den in Anspruch 1 beschriebenen Stator und die in Anspruch 14 beschriebene elektrische Maschine gelöst.

10 Der erfindungsgemäße Stator ist als Stator für eine elektrische Wechselstrommaschine ausgelegt. Der Stator umfasst eine um eine zentrale Achse angeordnete Statorwicklung mit einer Mehrzahl von Leiterwindungen, wobei diese Leiterwindungen zu einer Mehrzahl  $n$  elektrischer Stränge gruppiert sind. Die Statorwicklung weist eine Mehrzahl  $m$  von Wicklungslagen auf. Die Leiterwindungen eines Stranges weisen jeweils eine Mehr-

15 zahl  $i$  von axial ausgerichteten Leiterschekeln auf, welche in ihren beiden axialen Endbereichen paarweise durch jeweils zwei Wickelköpfe miteinander verbunden sind, sodass für jeden Strang eine Mehrzahl  $k$  von Einzelspulen gebildet ist. In Umfangsrichtung betrachtet folgen dabei die axialen Leiterschekel der einzelnen Stränge insgesamt abwechselnd auf-

20 einander, und zwar in gleichbleibender Reihenfolge. Die beiden Wickelköpfe einer gegebenen Einzelspule verlaufen dabei innerhalb einer gemeinsamen Wicklungslage. Dabei sind sowohl die Abfolge der axialen Leiterschekel der jeweiligen Stränge

25 als auch die Verteilung der Einzelspulen auf die einzelnen Wicklungslagen so gewählt, dass im Bereich der Wickelköpfe Überkreuzungen innerhalb der einzelnen Wicklungslagen vermieden werden.

30 Mit anderen Worten ist die Statorwicklung hier nicht als verteilte Wicklung im klassischen Sinn ausgebildet (bei der häufig jede Wicklungsgruppe durch Wickeln eines ausgedehnten Leiters „an einem Stück“ über viele axiale Schenkel und viele Wickelköpfe hinweg hergestellt wird). Stattdessen ist sie aus

35 einer Vielzahl von Einzelspulen zusammengesetzt, ähnlich wie bei einer Schleifen- oder Zahnspulenwicklung. Jeder Strang umfasst mehrere solche Einzelspulen, welche insbesondere untereinander elektrisch miteinander zu einer Wicklungsgruppe

verbunden sind. Diese diskreten Einzelspulen können insbesondere als vorgefertigte Bauteile vorliegen, welche erst nachträglich elektrisch miteinander verbunden werden. Das Vorliegen diskreter Einzelspulen innerhalb jeder Wicklungsgruppe ermöglicht im Zusammenspiel mit den übrigen erfindungsgemäßen Merkmalen eine besonders kompakte Ausgestaltung der Wickelköpfe. Dabei ist es wesentlich, dass für eine gegebene Einzelspule beide Wickelköpfe innerhalb einer gemeinsamen Wicklungslage verlaufen. Dies soll auch bedeuten, dass auch jeder Wickelkopf für sich seine vorgegebene Wicklungslage nicht verlässt. Im Gegensatz zu typischen verteilten Wicklungen nach dem Stand der Technik wird hier also im Bereich der Wickelköpfe kein Lagenwechsel zwischen den zu verbindenden Leiterzweigen bewirkt.

15

Die Anzahl  $n$  der Stränge kann insbesondere bei drei oder einem ganzzahligen Vielfachen von drei liegen.

20

25

30

35

Unter dem Merkmal, dass „in Umfangsrichtung betrachtet die axialen Leiterschlenkel der einzelnen Stränge in gleichbleibender Reihenfolge abwechselnd aufeinanderfolgen“ soll verstanden werden, dass für verschiedene aufeinanderfolgende azimutale Winkel (über den ganzen Umfang des Stators hinweg) ein festes Muster von Strang-Besetzungen periodisch aufeinander folgt. Beispielsweise kann der Aufbau so sein, dass im axial innen liegenden Bereich der Maschine, in dem die axialen Leiterschlenkel angeordnet sind, für jeden vorgegebenen Winkel immer nur höchstens ein Strang durch einen oder mehrere zugehörige Leiterschlenkel vertreten ist. Zwischen diesen besetzten Positionen können gegebenenfalls auch azimutale Lücken vorliegen. Beim Durchlaufen der aufeinanderfolgenden azimutalen Winkel in Umfangsrichtung wechselt dann die Besetzung mit einzelnen Strängen in einer vorgegebenen, wiederkehrenden Reihenfolge ab. Ein gegebener Strang ist dabei jedoch nicht auf eine bestimmte Wicklungslage eingeschränkt, sondern die Leiterschlenkel des jeweiligen Stranges können bei einer gegebenen azimutalen Position auf mehrere Lagen verteilt sind und/oder die Besetzung der Lagen kann für einen gegebenen

Strang bei verschiedenen azimutalen Winkeln zwischen verschiedenen Lagen hin und her wechseln.

Prinzipiell ist es jedoch auch möglich, dass für manche azimutale Winkel auch mehrere Stränge (aus verschiedenen Lagen überlappend) vertreten sind. Solche Überlappbereiche können insbesondere mit anderen azimutalen Bereichen abwechseln, in denen wie oben beschrieben jeweils nur ein Strang vertreten ist. Auch in einem solchen Fall mit einem azimutalen Überlapp der Stränge soll jedoch allgemein gelten, dass die Reihenfolge der Besetzung der Winkelpositionen mit den einzelnen Strängen in einem regelmäßig wiederkehrenden Muster wechselt. Auch hier sollen innerhalb des wiederkehrenden Musters von Strangbesetzungen Lagenwechsel zwischen den Einzelspulen eines Stranges nicht ausgeschlossen sein, wie im Zusammenhang mit den späteren Beispielen noch deutlicher werden wird.

Wesentlich im Zusammenhang mit der vorliegenden Erfindung ist, dass innerhalb einer jeweiligen vorgegebenen Wicklungslage Überkreuzungen im Bereich der Wickelköpfe vermieden werden. Mit anderen Worten sind innerhalb jeder Wicklungslage die Einzelspulen auf ihren zugeordneten azimutalen Positionen nebeneinander angeordnet und durchdringen sich beziehungsweise überlappen sich innerhalb der jeweiligen Lage nicht. Ein Überlapp der Einzelspulen (in radialer Projektion betrachtet) ergibt sich jeweils nur bei einer gemeinsamen Betrachtung mehrerer übereinanderliegende Wicklungslagen. Dies wird insbesondere dadurch erreicht, dass innerhalb einer gegebenen Wicklungslage der Bereich zwischen den beiden axialen Leiterschenkeln einer gegebenen Einzelspule nicht durch die axialen Leiterschenkel anderer Einzelspulen aufgefüllt wird. Um trotzdem in azimutaler Richtung einen häufigen Wechsel zwischen den axialen Leiterschenkeln der einzigen Stränge zu erreichen, ist stattdessen ein Überlapp zwischen Einzelspulen unterschiedlicher Stränge über verschiedene Lagen hinweg vorgesehen. Mit anderen Worten weichen die Einzelspulen, die nach dem oben beschriebenen azimutalen Besetzungsschema mit einer gegebenen Einzelspule kreuzen würden, hier auf eine an-

dere radiale Wicklungslagen aus. Dadurch wird erreicht, dass Leiterkreuzungen innerhalb einer Lage vermieden werden und trotzdem insgesamt die Besetzung azimuthaler Positionen mit einzelnen Strängen häufiger wechselt, als die Besetzung der  
5 einzelnen Stränge innerhalb einer Lage wechselt.

Durch die beschriebene Vermeidung von Überkreuzungen innerhalb einer Wicklungslage wird hier der zusätzliche Vorteil erzielt, dass die Wickelköpfe vor allem in axialer Richtung  
10 sehr kompakt ausgeführt werden können, da keine zusätzliche axiale Länge dafür bereitgestellt werden muss, um Leiterzweige unterschiedlicher Stränge innerhalb einer Wicklungslage dreidimensional aneinander vorbeizuführen. Hierdurch können die Wickelköpfe innerhalb ihrer jeweils zugeordneten Lage mit  
15 einem vergleichsweise engen Biegeradius und einer vergleichsweise kurzen axialen Länge des Wickelkopfes ausgeführt werden. Hierdurch kann die Maschine insgesamt vergleichsweise kompakt (und insbesondere axial kurz) ausgeführt werden, was wiederum eine vergleichsweise hohe Leistungsdichte der Ma-  
20 schine ermöglicht.

Die erfindungsgemäße elektrische Maschine ist eine Wechselstrommaschine mit einem erfindungsgemäßen Stator. Die Vorteile der erfindungsgemäßen Maschine ergeben sich analog zu den  
25 oben angegebenen Vorteilen des erfindungsgemäßen Stators.

Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung gehen aus den von den Ansprüchen 1 und 14 abhängigen Ansprüchen sowie der folgenden Beschreibung hervor. Dabei können die beschriebenen Ausgestaltungen des Stators und der  
30 elektrischen Maschine allgemein vorteilhaft miteinander kombiniert werden.

Gemäß einer allgemein bevorzugten Ausführungsform liegen alle  
35 Einzelspulen jeweils vollständig innerhalb einer ihnen jeweils zugeordneten Wicklungslage. Mit anderen Worten wird ein Wechsel der Wicklungslage also nicht nur im Bereich der Wickelköpfe, sondern im Bereich der gesamten Einzelspule ver-

mieden. Dies soll vorteilhaft insbesondere für alle Einzelspulen der Statorwicklung gelten. Eine solche Ausführungsform ist allgemein besonders geeignet, um einen kompakten Wicklungsaufbau mit möglichst einfachem Aufbau der Einzelspulen zu erreichen. Kreuzungen und Überlagerungen von Leiterzweigen in einer Lage werden insgesamt vermieden, da in jeder Wicklungslage nur die dieser jeweils eindeutig zugeordneten Einzelspulen in Umfangsrichtung nebeneinander angeordnet sind. Die Einzelspulen können vorteilhaft jeweils als Sattelspulen ausgebildet sein, mit anderen Worten können die Einzelspulen zumindest in Teilbereichen aus einer flachen Spulenebene heraus gekrümmt sein. Diese sattelförmigen Spulen können insbesondere so geformt sein, dass sie jeweils an die Konturen eines Zylindersegments angepasst sind. Insbesondere können sie jeweils so geformt sein, dass sie zwischen zwei konzentrischen kreisförmigen Hohlzylindern liegen. Der Bereich zwischen diesen beiden Hohlzylindern definiert dann die entsprechende zylindermantelförmige Wicklungslage mit einer entsprechenden radialen Lagendicken.

Besonders vorteilhaft kann bei dieser allgemeinen Ausführungsform für jede ausgewählte Einzelspule, die in einer zugeordneten Wicklungslage liegt, ein axialer Schenkel dieser Einzelspule in radialer Projektion gesehen mit einem innenliegenden Bereich einer anderen Einzelspule überlappt, wobei diese andere Einzelspule in einer anderen Wicklungslage angeordnet ist. Der innenliegende Bereich einer Einzelspule - also der Bereich der zwischen zwei axialen Schenkeln liegt - wird hier allgemein auch als „Auge“ einer Spule bezeichnet. Besonders vorteilhaft im Zusammenhang mit der vorliegenden Erfindung ist es, wenn zusätzlich auch das Auge jeder Einzelspule mit wenigstens einem axialen Schenkel aus einer anderen Wicklungslage überlappt. Durch diese Art der Überlappung (wiederum in radialer Projektion gesehen) kann vorteilhaft erreicht werden, dass eine komplexe Wicklungstopologie mit einer komplexen Zonenfolge - insbesondere einem häufigen Wechsel der Besetzung der azimuthalen Positionen mit einzelnen

Strängen - bei gleichzeitiger Vermeidung von Leiterkreuzungen innerhalb einer Wicklungslage erreicht werden kann.

Allgemein bevorzugt kann die Statorwicklung als Luftspalt-  
5 wicklung ausgestaltet sein. Eine solche Luftspaltwicklung ist also nicht in Nuten eines Eisenkerns oder eines anderen weichmagnetischen Materials eingebettet. Sie ist stattdessen in der Luftspalt-Region der Maschine angeordnet. Solche Luftspaltwicklungen im Stator sind vor allem dann vorteilhaft,  
10 wenn die erzeugten Magnetfelder beim Betrieb der Maschine so stark sind, dass es bei einer herkömmlich aufgebauten Maschine zu einer Sättigung des weichmagnetischen, flussführenden Statormaterials kommen würde. Dies ist vor allem im Zusammenhang mit supraleitenden Rotorwicklungen der Fall. Ein weiter-  
15 rer Vorteil der Verwendung von als Luftspaltwicklungen ausgeführten Statorwicklungen ist, dass der Platz und der Gewichtsbeitrag einer herkömmlichen flussführenden Struktur eingespart werden. Durch das Wegfallen der weichmagnetischen Zähne zwischen den axialen Leiterschekeln kann also prinzi-  
20 piell ein höherer Füllfaktor der Wicklung erreicht werden.

Die Ausführung als Luftspaltwicklung ist gerade im Zusammenhang mit den wesentlichen Merkmalen der vorliegenden Erfindung besonders bevorzugt, da durch das beschriebene „Verlagern“ von Überlappungen zwischen Einzelspulen auf verschiedene  
25 Wicklungslagen prinzipiell Füllfaktor eingebüßt wird. Dies kommt dadurch zustande, dass durch die Verschiebung des Überlapps auf andere Wicklungslagen in jeder Wicklungslage unbesetzte Positionen vorliegen. Bei einer klassischen Stator-  
30 wicklung, bei der die axialen Schenkel in Nuten zwischen Eisenzähnen eingebettet sind, würde dies unter Umständen zu einem insgesamt sehr niedrigen Füllfaktor der Statorwicklung führen, was wiederum die Gesamtleistungsdichte der Maschine negativ beeinflusst. Bei einer Luftspaltwicklung jedoch ent-  
35 fällt der Platzverlust durch die weichmagnetischen Zähne und der Füllfaktor kann somit trotz der unbesetzten Positionen der axialen Leiterschekel immer noch ausreichend hoch sein. Bei der Ausführung als Luftspaltwicklung soll dabei nicht

grundsätzlich ausgeschlossen sein, dass die Statorwicklung Stützstrukturen aufweist, welche sich ähnlich wie die klassischen Statorzähne in radialer Richtung erstrecken und welche azimuthal zwischen den einzelnen axialen Schenkeln der Wicklung angeordnet sind. Solche Stützstrukturen können sich radial über mehrere Wicklungslagen erstrecken und so die ganze Wicklung abstützen. Bei der Ausführung als Luftspaltwicklung sind solche Stützstrukturen entsprechend aus amagnetischem Material ausgebildet.

10

Alternativ zu der genannten Ausführungsform als Luftspaltwicklung ist es prinzipiell aber auch möglich, dass die beschriebenen radialen Stützstrukturen aus weichmagnetischem Material gebildet sind und daher als Zähne eines Statorjochs wirken können. Vorteilhaft handelt es sich bei solchen Zähnen aber nur um sehr schmale Zähne, die also in Umfangsrichtung deutlich schmaler ausgebildet sind als klassische Statorzähne. Bevorzugt weisen solche „minimalen Statorzähne“ in azimuthaler Richtung eine Breite auf, welche wesentlich geringer ist als die azimuthale Breite der einzelnen axialen Leiterschlenkel. Beispielsweise kann die Breite der Statorzähne bei höchstens einem Fünftel, insbesondere sogar nur bei höchstens einem Zehntel der Breite der einzelnen Leiterschlenkel liegen. Die angegebenen vorteilhaften Maximalbreiten können im Übrigen auch analog für die weiter oben beschriebenen Stützstrukturen aus amagnetischem Material gelten.

20

25

30

35

Gemäß einer alternativen und unter Umständen zu bevorzugende Ausführungsform liegen jedoch sogar gar keine Stützstrukturen oder Zähne vor, welche sich in radialer Richtung über mehrere Wicklungslagen erstrecken. Diese Ausführungsform ist besonders vorteilhaft im Zusammenspiel mit der Ausführung der Einzelspulen als flache Sattelspulen, welche durch ihre flache Form gut in mehreren Wicklungslagen übereinander gestapelt werden können, ohne durch dazwischen liegende Zähne besonders abgestützt werden zu müssen. Dabei können die unbesetzten Positionen der einzelnen Wicklungslagen optional durch passende andere flache Strukturen aufgefüllt werden.

Allgemein wird durch das Vorliegen von unbesetzten Positionen in der Wicklung die Packungsdichte (also der Füllfaktor) reduziert, was für sich allein genommen prinzipiell zu einer niedrigeren Leistungsdichte führt als bei einem höheren Füllfaktor. Allerdings wird durch die Merkmale der vorliegenden Erfindung die axiale Ausdehnung der Wickelköpfe im Vergleich zum Stand der Technik deutlich reduziert. So kann insgesamt einer Maschine zur Verfügung gestellt werden, welche trotzdem eine höhere Leistungsdichte aufweist als eine Maschine nach dem Stand der Technik.

Allgemein kann es vorteilhaft sein, wenn die axialen Schenkel der einzelnen Einzelspulen über ein regelmäßiges Besetzungsmuster aus radialen und azimuthalen Positionen verteilt sind. Mit anderen Worten kann ein regelmäßiges zweidimensionales Muster vorliegen, welches zweckmäßig als Anordnung von besetzten und unbesetzten Positionen in Polarkoordinaten wiedergegeben werden kann. Dabei sind die besetzten Positionen in einer charakteristischen Anordnung durch die axialen Schenkel der einzelnen Stränge besetzt. Eine solche besetzte Position erstreckt sich dabei über den gesamten axialen Bereich der Statorwicklung, der zwischen den beiden endständigen Wickelkopfbereichen liegt. Unter dem genannten regelmäßigen Besetzungsmuster soll verstanden werden, dass das Muster der Besetzungspositionen für die einzelnen Stränge sich als Muster von besetzten und unbesetzten Positionen ergibt, wobei diese Muster ein regelmäßiges Raster aus radialen Positionen (also Wicklungslagen) und azimuthalen Positionen zu Grunde liegt. Dieses Muster kann insbesondere als Ganzes eine Symmetrie aufweisen. Insbesondere kann sich das Muster in Umfangsrichtung nach einem bestimmten Winkel wiederholen - mit anderen Worten es liegt dann eine Rotationssymmetrie vor. Besonders vorteilhaft kann es sich dabei um eine zweizählige Rotationssymmetrie handeln, so dass eine Drehung um  $180^\circ$  das Besetzungsmuster in sich selbst überführt. Grundsätzlich ist aber auch eine höherzählige Rotationssymmetrie (mit geradzahligem oder ungeradzahligem Zähligkeit) möglich. Hervorzuheben

ist, dass hierbei nicht notwendigerweise eine Spiegelsymmetrie vorliegen muss. Insbesondere kann vorteilhaft eine zwei-  
zählige und/oder höherzählige Rotationssymmetrie vorliegen,  
ohne dass eine Symmetrieebene für das Besetzungsmuster existiert.  
5

Bevorzugt weist das regelmäßige Besetzungsmuster eine Mehrzahl von unbesetzten Positionen auf. Mit anderen Worten liegen in dem regelmäßigen Raster Lücken vor, also einzelne Positionen des Rasters mit azimuthalen und radialen Koordinaten,  
10 welche nicht durch einen axialen Schenkel einer Einzelspule besetzt sind. Derartige Lücken können dadurch entstehen, dass - in radialer Projektion gesehen - die Augen bestimmter Einzelspulen sich mit der Längsschenkeln anderer Einzelspulen  
15 überlagern, dass aber wie weiter oben beschrieben eine Durchdringung der Spulen durch Ausweichen auf andere Wicklungslagen vermieden wird. Durch dieses Ausweichen entstehen zwangsläufig Lücken in dem Besetzungsmuster. Beispielsweise kann jede der Wicklungslagen eine oder mehrere solche Lücken aufweisen.  
20 Alternativ oder zusätzlich können auch für jede azimuthale Position des Rasters eine oder mehrere Lücken vorliegen. Diese Ausgestaltung ist vor allem bei einer ungesehenen Wicklung vorteilhaft. Bei einer solchen ungesehenen Wicklung kann beispielsweise der Anteil der unbesetzten Positionen bei  
25 50% oder sogar noch höher liegen, um den räumlichen Überlapp der Einzelspulen innerhalb einer Wicklungslage vermeiden zu können. Beispielsweise kann der Anteil der unbesetzten Positionen für eine Strangzahl von  $n=3$  vorteilhaft bei 50 % liegen. Für höhere Strangzahlen kann der Anteil der unbesetzten  
30 Positionen sogar noch größer ausfallen. Hierdurch liegt auch der Füllfaktor der Wicklung dann gegebenenfalls nur bei höchstens 50 %, da noch weitere Verluste im Füllfaktor - beispielsweise durch Stützstrukturen - hinzu kommen können. Bei einer gesehenen Wicklung kann der Verlust an Füllfaktor durch  
35 die unbesetzten Positionen jedoch auch geringer als 50 % sein, da die Breite der einzelnen Zonen gegenüber der Breite der dazwischenliegenden Lücke dort vergrößert sein kann.

Besonders vorteilhaft können im Bereich der beschriebenen unbesetzten Positionen jeweils ein oder mehrere Kühlmittelkanäle angeordnet sein. Solche Kühlmittelkanäle können genutzt werden, um mit einem fluiden Kühlmittel, dass diese durchströmt, die Statorwicklung besonders effektiv zu kühlen. Dies ist insbesondere bei Maschinen mit besonders hohen Leistungsdichten der Fall, für die die Erfindung ja gerade besonders relevant ist. Bei elektrischen Maschinen mit sehr hohen Leistungsdichten ist unter Umständen ohnehin eine Kühlung der Wicklung durch Anbringung von Kühlkanälen zwischen den einzelnen Leiterschekeln zweckmäßig. Um hierfür keine zusätzlichen Einbußen im Füllfaktor der Wicklung in Kauf nehmen zu müssen, können die unbesetzten Positionen besonders vorteilhaft für solche Kühlkanäle genutzt werden. Gerade bei der Ausgestaltung der Einzelspulen als Flachspulen ist eine solche Anordnung besonders vorteilhaft, da dann eine gegebene Einzelspule jeweils durch wenigstens einen Kühlmittelkanal gekühlt werden kann, welcher in einer benachbarten Wicklungslage angeordnet ist. Durch die flache Ausgestaltung der Spulen - und die entsprechend analoge flache Geometrie der jeweils unbesetzten Positionen - ergibt sich dann eine entsprechend hohe Kontaktfläche und ein kurzer Abstand zwischen der gegebenen Spule und dem unbesetzten Platz in der benachbarten Lage, der durch ein oder mehrere Kühlmittelkanäle genutzt werden kann. So ergibt sich ein entsprechend guter Wärmeübergang zwischen Einzelspulen und Kühlmittel.

Die Statorwicklung kann insbesondere eine gerade Anzahl  $m$  von Wicklungslagen aufweisen, die insbesondere bei  $m=2$  oder  $m=4$  liegen kann. Bei einer solchen geraden Anzahl von Wicklungslagen kann die Statorwicklung in zusammengehörige Paare von Wicklungslagen strukturiert sein, wobei für eine gegebene azimutale Position beispielsweise immer eine Wicklungslage besetzt und die andere Wicklungslage desselben Paares unbesetzt ist. So wird das weiter oben beschriebene Ausweichen von miteinander überlappenden Einzelspulen auf unterschiedliche Wicklungslagen erreicht und insgesamt bleibt die Hälfte der vorhandenen Positionen unbesetzt. Dabei müssen die zusam-

mengehörigen Paare von Wicklungslagen nicht notwendigerweise radial benachbart angeordnet sein. In analoger Weise ist es alternativ auch möglich, dass immer vier Wicklungslagen zu einer Gruppe zusammengehören und dass entsprechend für jede  
5 azimuthale Position nur eine Lage aus dieser Gruppe besetzt ist.

Allgemein vorteilhaft können die Wickelköpfe der Einzelspulen jeweils annähernd U-förmig ausgestaltet sein. Unter einer  
10 solchen Form soll dabei nicht nur eine U-Form im strengen Sinn (also die Verbindung zweier axialer Schenkel durch einen halbkreisartigen Bogen), sondern auch jede andere Form verstanden werden, durch die zwei parallele axiale Schenkel durch einen insgesamt abgerundeten Verbindungsbereich miteinander  
15 verbunden werden. Dieser Verbindungsbereich kann insbesondere auch einen Verbindungsschenkel aufweisen, welcher über zwei abgerundete Ecken mit den axialen Schenkeln verbunden ist. Ein solcher Verbindungsschenkel kann (wie im Übrigen auch der halbkreisartige Bogen) insgesamt so gekrümmt sein,  
20 dass er die Konturen einer zylindermantelförmigen Wicklungslage nachbildet und so innerhalb einer solchen Lage zu liegen kommt.

Allgemein kann durch die U-förmige Ausgestaltung erreicht  
25 werden, dass die Wickelköpfe insgesamt eine besonders kurze axiale Ausdehnung aufweisen. Der kleinste Krümmungsradius des Leiters, der im Bereich eines Wickelkopfes auftritt kann allgemein unterhalb von 500 mm liegen, insbesondere unter 100 mm oder sogar unter 10 mm, beispielsweise in einem Bereich zwischen  
30 1 mm und 50 mm. Derart niedrige Krümmungsradius werden einer Statorwicklung gemäß der vorliegenden Erfindung allgemein dadurch ermöglicht, dass Durchdringung und Überlappungen von Einzelspulen innerhalb einer Lage vermieden werden und dadurch die einzelnen Leiter hier nicht durch ausladende Leiterpfade in den Wickelköpfen aneinander vorbei geführt werden  
35 müssen. Bei jedem Wickelkopf handelt es sich dagegen vorteilhaft nur um eine Verbindung zweier axialer Leiterschlenkel, die innerhalb einer gemeinsamen Wicklungslage angeordnet sind

und in dieser Wicklungslage benachbart (das heißt nicht durch Leiterschekeln anderer Stränge beabstandet) zueinander geführt werden. Bei dieser Wicklungstopologie wird der Biegeradius im Bereich der Wickelköpfe nach unten hin vorteilhaft  
5 nur durch die Biegeeigenschaften der Leiter begrenzt und nicht durch die zu vermeidende Durchdringung der Wickelköpfe wie beim Stand der Technik. Bei den Leitern kann es sich beispielsweise um Litzenleiter handeln, deren einzelne Litzen aus Kupfer bestehen oder zumindest Kupfer umfassen. Mit einem  
10 solchen Litzenleiter können vergleichsweise geringe minimale Biegeradien erreicht werden, welche beispielsweise bei dem etwa Dreifachen der innerhalb der Krümmungsebene vorliegenden Leiterbreite liegen können.

15 Die Einzelspulen können allgemein vorteilhaft jeweils als sattelförmige Flachspulen ausgestaltet sein. Unter einer Flachspule soll im vorliegenden Zusammenhang eine solche Spule verstanden werden, bei der die Breite der Leiterschekel innerhalb der jeweiligen Wicklungslage wesentlich größer ist  
20 als die Höhe der Leiterschekel (also deren Dicke senkrecht zur lokalen Ausrichtung der Wicklungslage). Vorteilhaft kann die Breite der Leiterschekel wenigstens zweimal so groß und insbesondere sogar wenigstens fünfmal so groß wie deren Höhe sein. Die Ausbildung der Einzelspulen als Flachspulen ist  
25 allgemein vorteilhaft, um im Zusammenspiel mit der beschriebenen Verteilung der Wicklung auf mehrere Wicklungslagen und der speziellen Anordnung, bei der durch unbesetzte Positionen eine Überkreuzungen innerhalb der lagen vermieden wird, einen mechanisch stabilen Wicklungsverband zu erreichen. Ein solcher mit Wicklungsverband kann besonders vorteilhaft auch ohne  
30 Statorzähne oder andere radiale Stützstrukturen mechanisch stabil ausgeführt werden. Hierzu können beispielsweise die nicht von Leiterzweigen besetzten Positionen des Rasters von entsprechend geformten anderen Strukturen ausgefüllt sein, um  
35 zusätzlichen mechanischen Halt zu gewähren. Diese Füllstrukturen können beispielsweise nicht leitend ausgebildet sein und/oder optional Kühlmittelkanäle umfassen. Allgemein ist die hier beschriebene flache Form der Spulen auch elektromag-

netisch vorteilhaft, da so eine verteilte Wicklung mit einer Lochzahl größer als 1 nachgebildet werden kann. Im Unterschied dazu verhält sich eine Wicklung mit in azimuthaler Richtung schmal und in radialer Richtung hoch ausgebildeten Spulen eher wie eine konzentrierte Wicklung mit einer Lochzahl von 1 und hätte einen unvorteilhaft hohen Gehalt an harmonischen Wicklungsoberwellen.

Allgemein kann die Statorwicklung beispielsweise als ungesehnte Wicklung ausgestaltet sein. Bei einer solchen ungesehnten Wicklung kann vorteilhaft ein sogenanntes „reines Zonenschema“ eingehalten werden, bei welchem der Umfang der Statorwicklung in einzelne azimuthale Bereiche („Zonen“) unterteilt ist, die jeweils nur mit Leiterschenkeln eines ausgewählten Stranges besetzt sind (und zusätzlich die unbesetzten Lücken aufweisen). Es liegt jedoch hier insbesondere keine Überlagerung von Leiterschenkeln unterschiedlicher Stränge innerhalb einer gegebenen Umfangsposition vor. Bei einer solchen ungesehnten Wicklung kann gemäß den übrigen Merkmalen der vorliegenden Erfindung eine neuartige Statorwicklung zur Verfügung gestellt werden, welche aber in ihren Zonenplan mit dem Zonenplan einer klassischen Statorwicklung in den Nuten von Statorzähnen übereinstimmt.

Alternativ zu der vorhergehenden Ausführungsform kann die Statorwicklung aber auch als gesehnte Wicklung ausgestaltet sein. Eine Sehnung der Wicklung kann beispielsweise durch einen Versatz in Umfangsrichtung zwischen den einzelnen Wicklungslagen erreicht werden. Mit anderen Worten können übereinanderliegenden Leiterschenkel, welche einem gemeinsamen Strang aber unterschiedlichen Wicklungslagen angehören, azimuthal leicht gegeneinander versetzt sein. Ein solcher „leichter Versatz“ kann zweckmäßig geringer gewählt sein als der geringste azimuthale Abstand zwischen nebeneinanderliegenden axialen Leiterschenkeln innerhalb einer Wicklungslage. Alternativ oder zusätzlich zu einem derartigen azimuthalen Versatz kann eine Sehnung aber auch dadurch erreicht werden, dass die azimuthal nebeneinanderliegenden Zonen einer Wicklungslage un-

terschiedlich breit gewählt werden. Bei dieser Ausführungsform können insbesondere auch die unbesetzten Positionen mit einer geringeren Breite ausgeführt sein als die besetzten Positionen, was im Unterschied zu ungesehnten Wicklung einen leicht verbesserten Füllfaktor ermöglicht.

Innerhalb der Statorwicklung können die Einzelspulen eines jeweiligen Stranges in einem oder beiden axialen Endbereichen elektrisch miteinander zu einer übergeordneten Wicklungsgruppe verbunden sein. Eine solche elektrische Verbindung kann beispielsweise über einen sogenannten Schaltring realisiert sein.

Der Stator kann bevorzugt so ausgestaltet sein, dass seine axiale Länge (inklusive der Wickelköpfe) kürzer ist als der Außendurchmesser des Stators. Insbesondere kann das Verhältnis zwischen axialer Länge und Außendurchmesser sogar kleiner als 0,4 sein. Ein derartiges Aspektverhältnis wird durch die Wicklungstopologie gemäß der vorliegenden Erfindung erleichtert und unter Umständen überhaupt erst ermöglicht, da nur bei der Vermeidung von ausladenden Wickelköpfen ein entsprechend kurzer Stator realisiert werden kann.

Die elektrische Maschine kann allgemein zusätzlich zu dem beschriebenen Stator noch einen Rotor aufweisen, der zur Erzeugung eines Magnetfeldes mit  $p$  Polen ausgebildet ist. Im Zusammenspiel mit einem solchen Rotor kommen die beschriebenen Vorteile des erfindungsgemäßen Stators besonders zum Tragen.

Insbesondere kann ein solcher Rotor mit einer supraleitenden Erregerwicklung ausgestattet sein. Eine solche Ausführung ist besonders vorteilhaft, um mit der Maschine eine sehr hohe Leistungsdichte zu erreichen. Die elektrische Maschine ist allgemein vorteilhaft für eine Nennleistung von wenigstens 2 MW, insbesondere sogar wenigstens 5 MW ausgelegt. Alternativ oder zusätzlich kann sie vorteilhaft eine Leistungsdichte von wenigstens 10 kW/kg, insbesondere sogar wenigstens 20 kW/kg aufweisen. Dies ist besonders für Generatoren oder

Motoren in Fahrzeugen relevant, die beim Antrieb eines solchen Fahrzeuges mit bewegt werden müssen. Ganz besonders kritisch ist die Leistungsdichte bei elektrischen Maschinen in Luftfahrzeugen. Unabhängig von der genauen Anwendung der Maschine kann diese allgemein entweder als Motor und/oder als Generator betrieben werden. Besonders vorteilhaft kann die Maschine als Synchronmaschine ausgebildet sein.

Die magnetische Polzahl  $p$  der elektrischen Maschine kann vorteilhaft zwischen 2 und 12, insbesondere zwischen 6 und 12 und besonders vorteilhaft bei genau 8 liegen. Eine derartige Ausgestaltung ist besonders vorteilhaft, um eine hohe Leistungsdichte zu erreichen. Der bevorzugte Bereich ergibt sich dabei daraus, dass einerseits mit steigender Polzahl das radiale Luftspaltfeld und somit die induzierte Spannung sinkt, dass aber andererseits mit steigender Polzahl die elektrische Frequenz bei gleicher Drehzahl steigt. Der zweite Effekt steigert die induzierte Spannung, so dass sich insgesamt bei typischen Geometrien ein Optimum für die Leistung innerhalb der genannten Bereiche ergibt. Zusätzlich gibt es noch weitere Effekte, beispielsweise dass bei kleinen Polzahlen eine größere Jochdicke gewählt werden muss, was wiederum das Gewicht beeinflusst. Solche Faktoren bestimmen ebenfalls den bevorzugten Polzahlbereich für eine optimale Leistungsdichte.

Nachfolgend wird die Erfindung anhand einiger bevorzugter Ausführungsbeispiele unter Bezugnahme auf die angehängten Zeichnungen beschrieben, in denen:

30

Figur 1 eine schematische Schnittdarstellung eines Teils einer elektrischen Maschine nach dem Stand der Technik zeigt,

35

Figur 2 eine Darstellung eines Teils der Statorwicklung aus der Maschine der Figur 1 zeigt,

Figur 3 eine schematische Schnittdarstellung eines Teils einer elektrischen Maschine nach einem ersten Ausführungsbeispiel zeigt,

Figur 4 einen Ausschnitt für einen Winkelsegment der Maschine der Figur 3 zeigt,  
Figur 5 eine axiale Aufsicht des Stators der Maschine der Figur 3 zeigt,  
5 Figur 6 eine dreidimensionale schematische Darstellung eines Teils der Maschine der Figur 3 zeigt,  
Figur 7 eine dreidimensionale schematische Darstellung einer einzelnen sattelförmigen Flachspule zeigt,  
Figur 8 eine Projektion eines Teils einer Flachspule im Vergleich mit der Projektion einer herkömmlichen Statorwicklung zeigt,  
10 Figur 9 einen Ausschnitt aus einem Wickelschema einer Statorwicklung nach einem zweiten Ausführungsbeispiel zeigt,  
15 Figur 10 einen Ausschnitt aus einem Wickelschema einer Statorwicklung nach einem dritten Ausführungsbeispiel zeigt,  
Figur 11 einen Ausschnitt aus einem Wickelschema einer Statorwicklung nach einem vierten Ausführungsbeispiel zeigt und  
20 Figur 12 einen Ausschnitt aus einem Wickelschema einer Statorwicklung nach einem fünften Ausführungsbeispiel zeigt.

25 In den Figuren sind gleiche oder funktionsgleiche Elemente mit gleichen Bezugszeichen versehen. In Figur 1 ist ein Ausschnitt einer elektrischen Maschine 1 nach dem Stand der Technik in schematischem Querschnitt gezeigt. Gezeigt ist ein 90°-Winkelsegment in einer Schnittebene, welche senkrecht zur zentralen Achse A der Maschine liegt. Die elektrische Maschine 1 weist einen innenliegenden, um die zentrale Achse A rotierbar gelagerten Rotor 11 auf. Dieser Rotor 11 ist mit einer Mehrzahl von Feldwicklungen 12 ausgestattet, von denen hier beispielhaft zwei Pole gezeigt sind. Sie dienen zur Ausbildung eines Erregerfeldes der elektrischen Maschine. Der innenliegende Rotor wird radial von einem feststehenden Stator 3 umgeben. Sowohl Rotor als auch Stator weisen hier eine kreiszylindrische Grundform auf. Der Stator umfasst ein au-

30  
35

Benliegendes zylindermantelförmiges Eisenjoch 5 als flussführendes Element. Zwischen dem Eisenjoch 5 und dem Rotor 11 befindet sich ein Luftspalt 6, in dem hier ebenfalls die Statorwicklung 4 des Stators 3 angeordnet ist. Es handelt sich hier also um eine sogenannte Luftspaltwicklung, die nicht azimutal zwischen magnetischen Strukturen angeordnet ist. Die Statorwicklung 4 umfasst eine Mehrzahl von Windungen  $8i$ , von denen im dargestellten Ausschnitt 24 Stück in Form ihrer sich axial erstreckenden Leiterschlenkel gezeigt sind. Um der Statorwicklung 4 mechanischen Halt zu geben, können diese axialen Leiterschlenkel optional zwischen amagnetischen Zähnen 7 (oder anderweitigen Haltestrukturen) eingebettet sein, von denen hier im mittleren Teil der Zeichnung beispielhaft zwei gezeigt sind. Die Statorwicklung 4 der Figur 1 weist zwei Wicklungslagen 4a und 4b auf, über welche die einzelnen axialen Leiterschlenkel 21 verteilt sind. Es handelt sich dabei um eine radial innenliegende Unterlage 4a und eine radial außenliegende Oberlage 4b. Die Statorwicklung 4 der Figur 1 weist hier insgesamt drei elektrische Stränge  $u$ ,  $v$  und  $w$  auf, welche beispielsweise den drei Phasen einer Dreiphasen-Wechselstrommaschine zugeordnet sind. Die Leiterzweige eines jeweiligen Stranges sind dabei untereinander elektrisch zu einer übergeordneten Wicklungsgruppe verbunden. Innerhalb einer solchen Wicklungsgruppe wechseln über den Umfang der Statorwicklung 4 betrachtet Bereiche unterschiedlicher Stromflussrichtung miteinander ab. Bei der Statorwicklung der Figur 1 handelt es sich um eine sogenannte ungesehnte Wicklung, bei der in Umfangsrichtung gesehen verschiedene azimutale Positionen  $35i$  aufeinanderfolgen, wobei jede dieser Positionen nur jeweils einem bestimmten Strang und einer vorgegebenen Stromflussrichtung zugeordnet ist. So bilden beispielsweise die zusammen mit  $+u$  gekennzeichneten Leiterschlenkel die Hinleiter des elektrischen Strangs  $u$ . Und die zusammen mit  $-u$  gekennzeichneten Leiterschlenkel bilden die Rückleiter des elektrischen Strangs  $u$  für die jeweils zugeordnete azimutale Position. Das sogenannte Zonenschema der elektrischen Maschine gibt vor, in welchem charakteristischen Muster die Hinleiter und

Rückleiter der einzelnen Stränge über das Raster der azimuthalen Positionen und der Wicklungslagen verteilt sind.

Figur 2 zeigt eine schematische Darstellung eines Teils der Statorwicklung 4 aus der Maschine der Figur 1. Bei der Darstellung der Figur 2 handelt es sich um eine vereinfachte zweidimensionale Darstellung der Wicklung, bei der die in Wirklichkeit kreiszylinderförmige Wicklung gedanklich auf eine planare Ebene „abgerollt“ wurde. Diese Ebene wird entsprechend durch die beiden Richtungskoordinaten der axialen Richtung a und der Winkelkoordinate 24 aufgespannt. Dabei sind nicht nur Komponenten dargestellt, die genau in der Paperebene liegen. Es handelt sich vielmehr um eine Projektion, die Komponenten aus beiden Wicklungslagen 4a und 4b darstellt. Der dargestellte Teil der Wicklung 4 umfasst zwei Hinleiter des Strangs v, die entsprechend mit +v gekennzeichnet sind. Weiterhin sind zwei Rückleiter desselben Strangs gezeigt, die entsprechend mit -v gekennzeichnet sind. Dabei liegen die beiden Hinleiter in der Unterlage 4a und die beiden Rückleiter liegen in der Oberlage 4b. Entlang der Winkelkoordinaten 24 sind sowohl die beiden benachbarten Hinleiter als auch die beiden benachbarten Rückleiter jeweils um eine sogenannte Nutteilung 28 gegeneinander versetzt. Mit anderen Worten, sie liegen im benachbarten Nuten. Die gezeigten axialen Leiterschlenkel – also die Hinleiter und Rückleiter – befinden sich in einem axial innen liegenden Teil 16 der Wicklung, von dem hier nur ein kleiner Abschnitt gezeigt ist. Daran angrenzend befindet sich ein axialer Endbereich 17, in dem die zueinander gehörigen Leiterschlenkel über Wickelköpfe 23 elektrisch miteinander verbunden sind, wobei diese Wickelköpfe auch den Lagenabstand überbrücken. Der durch diese Verbindung zu überbrückende Wickelschritt 29 beträgt in diesem Beispiel das Sechsfache der Nutteilung 28. Um trotz dieses relativ großen azimuthalen Abstands und trotz der in dieser Projektion sichtbaren Überkreuzung benachbarten Leiterzweige eine räumliche Durchdringung der Wickelköpfe zu vermeiden, ist hier ein relativ großer Winkel  $\beta$  nötig. Der minimal notwendige Winkel  $\beta$  wird im gezeigten Beispiel noch zusätzlich

dadurch vergrößert, dass im Bereich der Wickelköpfe 23 ein Isolationsabstand 27 zwischen den einzelnen Leitern eingehalten werden muss. Durch die beschriebenen geometrischen Randbedingungen ist jedoch entsprechend der Größe des Winkels  $\beta$  auch die axiale Länge der Wickelköpfe sehr groß. Durch diesen Effekt entfällt bei herkömmlichen Maschinen ein großer Teil der axialen Länge und auch des Gewichts der Maschine auf die Wickelköpfe, die aber zur Feldausnutzung der Maschine sehr wenig beitragen.

10

Figur 3 einen schematischen Querschnitt einer elektrischen Maschine 1 nach einem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung. Gezeigt ist auch hier ein Schnitt senkrecht zur zentralen Achse A der Maschine. Auch diese Maschine weist einen innenliegenden Rotor 11 und einen diesen radial umgebenden Stator 3 auf. Der Rotor kann ähnlich ausgestaltet sein wie der Rotor der herkömmlichen Maschine der Figur 1. Er kann beispielsweise, wie dargestellt, zur Ausbildung eines achtpoligen elektromagnetischen Erregerfeldes ausgestaltet sein. Auch die elektrische Maschine der Figur 3 weist ein zylindermantelförmiges außenliegendes Statorjoch 5 auf, welches die Statorwicklung 4 im gezeigten Bereich als flussführendes Element radial umgibt. Der dargestellte Bereich ist ein axial innenliegender Teil der Wicklung 4, also der Bereich, in welchem die sich axial erstreckenden Leiterschlenkel 21 der Wicklung angeordnet sind. Auch hier sind in den hier nicht dargestellten, axial außen liegenden Bereichen die Wickelköpfe angeordnet, welche die einzelnen Leiterschlenkel der einzelnen Stränge zu übergeordneten Wicklungsgruppe verbinden.

30

Die Zuordnung der einzelnen axialen Leiterschlenkel 21 zu einzelnen Wicklungslagen und azimuthalen Positionen ist in Figur 4 detaillierter dargestellt, welche wiederum nur einen 90°-Ausschnitt der Maschine zeigt. Die Statorwicklung 4 gemäß diesem ersten Ausführungsbeispiel weist 4 Wicklungslagen 33a, 33b, 33c und 33d auf, über welche die einzelnen axialen Leiterschlenkel 21 nach einem regelmäßigen Muster verteilt sind. Ähnlich wie bei der Maschine der Figur 1 ist auch hier die

35

Statorwicklung 4 in 3 elektrische Stränge  $u$ ,  $v$  und  $w$  aufgeteilt. Auch bei dieser Maschine ist die Statorwicklung 4 in ein Raster von diskreten azimuthalen Positionen  $35_i$  aufgeteilt, wobei jede dieser Positionen einem der drei elektrischen Stränge  $u$ ,  $v$  oder  $w$  zugeordnet ist und insbesondere

5 entweder den Hinleitern  $+u$ ,  $+v$  bzw.  $+w$  oder den Rückleitern  $-u$ ,  $-v$  bzw.  $-w$  des jeweiligen Stranges zugeordnet ist. Beim Beispiel der Figuren 3 und 4 wechseln die drei Stränge in Umfangsrichtung gesehen in immer wiederkehrender Reihenfolge

10 miteinander ab (also immer  $u, v, w, u, v, w$  und so weiter). Der Zonenplan ist somit analog zur Wicklung der Figur 1. Für die Untermenge der azimuthalen Positionen, die mit einem gegebenen Strang besetzt sind (also beispielsweise  $u$ ) wechseln dabei in diesem Beispiel immer die Hinleiter ( $+u$ ) mit den Rückleitern

15 ( $-u$ ) in wiederkehrenden Muster ab. Wesentlich im Zusammenhang mit der vorliegenden Erfindung ist, dass diese Statorwicklung im Gegensatz zur Wicklung der Figur 1 nicht als verteilte Wicklung ausgebildet ist, sondern dass sie sich aus Einzelspulen zusammensetzt. Dabei sind jeweils zwei axiale Schenkel

20 eines gegebenen Strangs über zwei Wickelköpfe (die in den hier nicht dargestellten axialen Endbereichen liegen) zu einer ringförmigen Einzelspule miteinander verbunden. Im gezeigten Beispiel ist jede dieser Einzelspulen in nur einer zugeordneten Wicklungslage (also nur in 33a, 33b, 33c oder

25 33d) angeordnet. Es liegen also sowohl die axialen Leiterschlenkel als auch die Wickelköpfe jeder Einzelspule innerhalb dieser zugeordneten Lage. Dabei liegen die beiden axialen Leiterschlenkel, die zu einer Einzelspule gehören, nicht in benachbarten azimuthalen Positionen der Wicklung. Im Aus-

30 schnitt der Figur 4 ist beispielsweise innerhalb der innersten Lage 33a und auch innerhalb der äußersten Lage 33d jeweils der dargestellte Hinleiter  $+u$  mit dem dargestellten Rückleiter  $-u$  zu einer gemeinsamen Einzelspule verbunden. Vom Hinleiter  $+u$  aus gesehen liegt aber der Rückleiter  $-u$  erst in

35 der überüber nächsten azimuthalen Position. Dazwischen liegen zwei azimuthale Positionen, welche mit anderen Leiterzweigen  $+v$  und  $+w$  besetzt sind. Um trotz dieses Umstands Überkreuzungen zwischen den Einzelspulen (und somit eine Durchdringung

der Leiter und/oder komplexe, ausladende Wickelköpfe) zu vermeiden, weichen die Einzelspulen der dazwischenliegenden Leiterstränge +v und +w auf andere Wicklungslagen aus, nämlich hier auf die Lagen 33b und 33c. Die gezeigten dazwischenliegenden axialen Leiterschenkel +v und +w sind jeweils innerhalb ihrer Wicklungslage mit zugehörigen Rückleitern -v (links vom dargestellten Winkelsegment) und -w (im rechten Teil des dargestellten Ausschnitts) wiederum zu Einzelspulen verbunden, welche innerhalb ihrer Wicklungslage keine Durchdringung oder Überkreuzung mit anderen Einzelspulen aufweisen.

Um die genaue Anordnung der Einzelspulen im ersten Ausführungsbeispiel und insbesondere die Vermeidung von Überkreuzungen durch Ausweichen auf andere Wicklungslagen zu verdeutlichen, zeigt Figur 5 eine axiale Aufsicht des Stators in einem der axialen Endbereiche. Es ist also ein Schnitt durch einen Bereich dargestellt, in dem die Wickelköpfe der Einzelspulen verlaufen und die einander zugeordneten Längsschenkel jeweils miteinander verbinden. Die Einzelspulen sind als Flachspulen 31 ausgestaltet, welche jeweils nur innerhalb einer der vier Wicklungslagen liegen. Auch hier ist die Zugehörigkeit dieser einzelnen Flachspulen 31 zu den 3 elektrischen Strängen u, v und w durch unterschiedliche Schraffur gekennzeichnet. Zum besseren Vergleich mit dem Ausschnitt der Figur 4 (im axial innenliegenden Querschnitt) ist das dort dargestellte Winkelsegment durch radiale Linien gekennzeichnet. Auch die beispielhaft mit dem Bezugszeichen 35i gekennzeichnete azimuthale Position ist die gleiche wie in der Figur 4. Um den Vergleich weiter zu erleichtern, sind für die radial innenliegende Einzelspule, die mit dem Bezugszeichen u gekennzeichnet ist auch die in axialer Richtung dahinterliegenden axialen Leiterschenkel mit den entsprechenden Bezugszeichen +u und +u markiert.

35

Wie in den Figuren 3 und 5 zu erkennen, weist das Besetzungsmuster der azimuthalen Positionen und der Wicklungslagen für dieses Beispiel eine zweizählige Symmetrie auf. Mit anderen

Worten kann das Muster durch eine Rotation um  $180^\circ$  in sich selbst überführt werden. Für dieses Beispiel liegt jedoch keine Spiegelsymmetrie vor.

5 Zur besseren Verdeutlichung der Wicklungsgeometrie zeigt Figur 6 noch eine schematische dreidimensionale Darstellung derselben Statorwicklung 4, wie sie in den Schnittdarstellungen der Figuren 3, 4 und 5 gezeigt ist. Gezeigt ist hier der Übersichtlichkeit halber nur eine Hälfte der Wicklung, die  
10 also senkrecht zur Achse halbiert ist. Hier ist zu erkennen, dass die Einzelspulen 31 als sattelförmige Flachspulen ausgestaltet sind, welche an die zylindermantelförmige Geometrie der jeweiligen Wicklungslage angepasst ist. Ein geometrischer Überlapp dieser einzelnen Sattelspulen ergibt sich aufgrund  
15 der speziellen Anordnung nur in radialer Projektion, nicht aber innerhalb der jeweils betrachteten Lage.

Figur 7 zeigt eine schematische dreidimensionale Darstellung einer einzelnen sattelförmigen Flachspule 31. Diese Flachspule ist insgesamt nicht planar, sondern sie ist an die zylindermantelförmige Kontur ihrer Wicklungslage angepasst. Sie umfasst zwei sich axial erstreckender Leiterschlenkel 21, welche in den beiden axialen Endbereichen 17 durch Wickelköpfe 23a miteinander verbunden sind. Alle diese Leiterabschnitte  
20 weisen eine flache Querschnittsform auf, bei der die Breite 37 der Leiterschlenkel jeweils größer ist als die Dicke 39 der Leiterschlenkel (also die Dicke in Richtung der Dicke der Wicklungslage). Entgegen dem Eindruck, der durch die perspektivische Verzerrung der Figur 7 entstehen mag, soll der Querschnitt sowohl in Größe als auch Form für alle Schenkel der  
25 Einzelspule gleichbleibend sein.  
30

Figur 8 zeigt eine Projektion eines Teils einer Flachspule 31, wie sie in einem erfindungsgemäßen Stator zum Einsatz  
35 kommen kann, in analoger Darstellung zur Figur 2. Gezeigt ist der axiale Endbereich 17 der Flachspule 31, also mit anderen Worten der Bereich, in dem die beiden axialen Leiterschlenkel 21 einer solchen Spule in den zugehörigen Wickelkopf 23a

übergehen. Für die Flachspule der Figur 8 ist hier sogar eine noch extremere U-förmige Ausgestaltung des Wickelkopfes 23a gezeigt als für die Flachspule der Figur 7. Im Beispiel der Figur 8 weist der mittlere Schenkel der U-Form einen längeren  
5 geraden Bereich auf, der von zwei abgerundeten Ecken flankiert ist. Eine solche Ausgestaltung ist nicht unbedingt nötig, kann aber besonders vorteilhaft sein, um die Ausdehnung des Wickelkopfes in axialer Richtung a besonders klein zu halten. Durch die entsprechende Verkürzung der axialen Länge  
10 des Wickelkopfes kann somit eine Verkürzung der axialen Länge der Maschine insgesamt erreicht werden, was wiederum zu einer besonders hohen Leistungsdichte führt. Um diese Verkürzung der axialen Länge zu verdeutlichen, ist in Figur 8 die axiale Ausdehnung eines herkömmlichen Wickelkopfes 23b aus einer  
15 verteilten Wicklung (ähnlich wie in den Figuren 1 und 2) durch gestrichelte Linien verdeutlicht.

Figur 9 zeigt einen Ausschnitt aus einem Wickelschema einer Statorwicklung nach einem zweiten Ausführungsbeispiel der Er-  
20 findung. Ein solches Wickelschema zeigt die Besetzung der einzelnen azimuthalen Positionen 35i und der einzelnen Wicklungslagen der zylindermantelförmigen Statorwicklung in „abgerollter“ Form. In Figur 9 ist allerdings nicht das volle Wickelschema für die Maschine nach dem zweiten Ausführungs-  
25 beispiel gezeigt, sondern nur ein 90°-Ausschnitt entsprechend der Figur 4. Im Unterschied zum Beispiel der Figur 4 weist das Wickelschema der Figur 9 nur 2 Wicklungslagen 33a und 33b auf. Bis auf das Fehlen der beiden äußeren Lagen 33c und 33d entspricht aber das Wickelschema der Figur 9 dem Wickelschema  
30 der Figur 4. Entsprechendes soll auch für die Fortsetzung des hier dargestellten Ausschnitts des Wickelschemas gelten. In der schematischen Darstellung der Figur 9 wird besonders deutlich, dass in diesem Beispiel nur die Hälfte der Positionen mit axialen Leiterschchenkeln 21 der einzelnen Stränge u, v  
35 und w besetzt sind. An den anderen Plätzen des Rasters liegen unbesetzte Positionen 41 vor, was im Vergleich zu einer dichtesten Packung an axialen Leiterschenkeln zu einem Verlust an Füllfaktor der Wicklung führt. Vorteilhaft im Vergleich zu

einer herkömmlichen Wicklung gemäß Figur 1 ist hier jedoch, dass durch die stabile Stapelung von Flachspulen hier keine radialen Haltezähne 7 (oder höchstens ganz schmale Zähne) zwischen den axialen Leiterschenkeln benötigt werden. So kann  
5 der Verlust an Füllfaktor durch die unbesetzten Positionen 41 zumindest zum Teil die Einsparung radialer Haltestrukturen kompensiert werden. Weiterhin können die unbesetzten Positionen 41 für andere funktionelle Strukturen genutzt werden. So kann der entsprechende Raum beispielsweise für die Anordnung  
10 von flachen Kühlkanälen 43 genutzt werden, wobei vorteilhaft jeweils ein solcher Kühlkanal radial benachbart zu einer besetzten Position (also einem axialen Leiterschenkel 21) liegt. Alternativ können auch mehrere solche Kühlkanäle 43 innerhalb einer unbesetzten Position 41 geführt werden. In  
15 Figur 9 ist beispielhaft nur wenige einzelne Kühlkanäle 43 gezeigt. Alternativ oder zusätzlich zu der Anordnung von Kühlkanälen können die unbesetzten Positionen aber auch mit anderen flachen Füllelementen 44 gefüllt sein, von denen eines in Figur 9 beispielhaft gezeigt ist. Solche Füllelemente können wiederum auch von einzelnen Kühlkanälen 43 durch-  
20 setzt sein.

In den Figuren 10 bis 12 sind weitere beispielhafte Variationen von Wicklungsschemata für einen entsprechenden 90°-Ausschnitt der Wicklung gezeigt: So zeigt Figur 10 einen Teil  
25 eines Wickelschemas für eine Statorwicklung mit sechs elektrischen Strängen  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $w_1$  und  $w_2$ . Um auch für diese erhöhte Strangzahl eine kreuzungsfreie Ausgestaltung der Statorwicklung mit nebeneinanderliegenden Einzelspulen und  
30 kurzen Wickelköpfen zu ermöglichen, ist hier die Statorwicklung im Vergleich zu Figur 9 auf die doppelte Anzahl von Wicklungslagen verteilt. Entsprechend liegt eine noch höhere Anzahl unbesetzter Positionen 41 vor, nämlich in diesem Beispiel 75% der zur Verfügung stehenden Plätze. Auch hier können  
35 die unbesetzten Positionen ganz oder teilweise durch hier nicht gezeigte Füllelemente und oder Kühlkanäle besetzt sein.

Bei den bisher dargestellten Beispielen handelte es sich jeweils um ungesehnte Wicklungen. Prinzipiell können aber auch Statorwicklungen gemäß der vorliegenden Erfindung als gesehnte Wicklung ausgestaltet werden. Dies kann ähnlich wie beim

5 Stand der Technik beispielsweise durch einen azimuthalen Versatz zwischen den Wicklungslagen und/oder durch eine Änderung der Zonenbreite bewirkt werden. Figur 11 zeigt eine entsprechende gesehnte Wicklung, die aus der Wicklung der Figur 9

10 durch einen azimuthalen Versatz der einzelnen besetzten Zonen hervorgeht. Hierdurch ergeben sich einzelne azimuthaler Positionen, bei denen (über mehrere Lagen betrachtet) ein Überlapp zwischen den einzelnen elektrischen Strängen vorliegt und es ergeben sich andere azimuthalen Positionen, welche über

15 alle Lagen betrachtet unbesetzt sein können. Figur 12 zeigt ein anderes Beispiel für eine gesehnte Wicklung, bei der die von elektrischen Strängen besetzten Zonen im Vergleich zum Beispiel der Figur 9 verbreitert sind. Hierdurch ergibt sich vorteilhaft eine Erhöhung des Füllfaktors der Wicklung gegenüber den beim Schema der Figur 9 vorliegenden maximalen 50 %.

20

## Patentansprüche

1. Stator (3) für eine elektrische Wechselstrommaschine (1),  
- wobei der Stator (3) eine um eine zentrale Achse (A) ange-  
5 ordnete Statorwicklung (4) mit einer Mehrzahl von Leiter-  
windungen aufweist,  
- wobei diese Leiterwindungen zu einer Mehrzahl  $n$  elektri-  
scher Stränge (u,v,w) gruppiert sind,  
- wobei die Statorwicklung (4) eine Mehrzahl  $m$  von Wicklungs-  
10 lagen (33a,33b,33c,33d) aufweist  
- wobei die Leiterwindungen eines Strangs (u,v,w) jeweils  
eine Mehrzahl  $i$  von axial ausgerichteten Leiterschenkeln  
(21) aufweisen, welche in ihren beiden axialen Endbereichen  
(17) paarweise durch jeweils zwei Wickelköpfe (23a) mitein-  
15 ander verbunden sind, so dass für jeden Strang (u,v,w) eine  
Mehrzahl  $k$  von Einzelspulen (31) gebildet ist,  
- wobei in Umfangsrichtung betrachtet die axialen Leiter-  
schenkel (21) der einzelnen Stränge (u,v,w) in gleichblei-  
bendem Muster abwechselnd aufeinanderfolgen,  
20 - wobei die beiden Wickelköpfe (23a) einer gegebenen Einzel-  
spule (31) innerhalb einer Wicklungslage (33a,33b,33c,33d)  
verlaufen  
- und wobei die Abfolge der axialen Leiterschengel (21) der  
jeweiligen Stränge (u,v,w) und die Verteilung der Einzel-  
25 spulen (31) auf die einzelnen Wicklungslagen  
(33a,33b,33c,33d) so gewählt sind, dass im Bereich der Wi-  
ckelköpfe (23a) Überkreuzungen innerhalb der einzelnen  
Wicklungslagen (33a,33b,33c,33d) vermieden werden.
- 30 2. Stator (3) nach Anspruch 1, bei welchem alle Einzelspulen  
(31) jeweils vollständig innerhalb einer jeweils zugeordneten  
Wicklungslage (33a,33b,33c,33d) liegen.
3. Stator (3) nach Anspruch 2, bei welchem für jede ausge-  
35 wählte Einzelspule (31), die in einer zugeordneten Wicklungs-  
lage (33a,33b,33c,33d) liegt, ein axialer Schenkel (21) die-  
ser Einzelspule (31) in radialer Projektion mit einem innen-  
liegenden Bereich einer anderen Einzelspule überlappt, welche

in einer anderen Wicklungslage (33a, 33b, 33c, 33d) angeordnet ist.

4. Stator (3) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei  
5 welchem die Statorwicklung (4) als Luftspaltwicklung ausgestaltet ist.

5. Stator (3) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei  
welchem die axialen Schenkel (21) der einzelnen Einzelspulen  
10 (31) über ein regelmäßiges Besetzungsmuster aus radialen und  
azimutalen Positionen verteilt sind.

6. Stator (3) nach Anspruch 5, wobei in dem regelmäßigen Be-  
setzungsmuster eine Mehrzahl von Positionen (41) unbesetzt  
15 ist.

7. Stator (3) nach Anspruch 6, bei welcher im Bereich der un-  
besetzten Positionen (41) Kühlmittelkanäle (43) angeordnet  
sind.

20

8. Stator (3) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei  
welchem die Statorwicklung (4) eine gerade Anzahl  $m$  von Wick-  
lungslagen (33a, 33b, 33c, 33d), insbesondere zwei oder vier  
Wicklungslagen, aufweist.

25

9. Stator (3) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei  
welchem die Wickelköpfe (23a) U-förmig ausgestaltet sind.

10. Stator (3) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei  
30 welchem die Wickelköpfe (23a) Biegeradien aufweisen, welche  
in einem Bereich zwischen 5mm und 100mm liegen.

11. Stator (3) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei  
welchem die Einzelspulen (31) jeweils als sattelförmige  
35 Flachspulen ausgestaltet sind.

12. Stator (3) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welchem die Statorwicklung (4) als ungesehnte Wicklung ausgestattet ist.

5 13. Stator (3) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welchem die Statorwicklung (4) als gesehnte Wicklung ausgestattet ist.

10 14. Elektrische Wechselstrommaschine (1) mit einem Stator (3) nach einem der vorhergehenden Ansprüche.

15. Elektrische Maschine (1) nach Anspruch 14, welche zusätzlich einen Rotor (11) aufweist, der mit wenigstens einer supraleitenden Erregerwicklung ausgestattet ist.

15

FIG 1

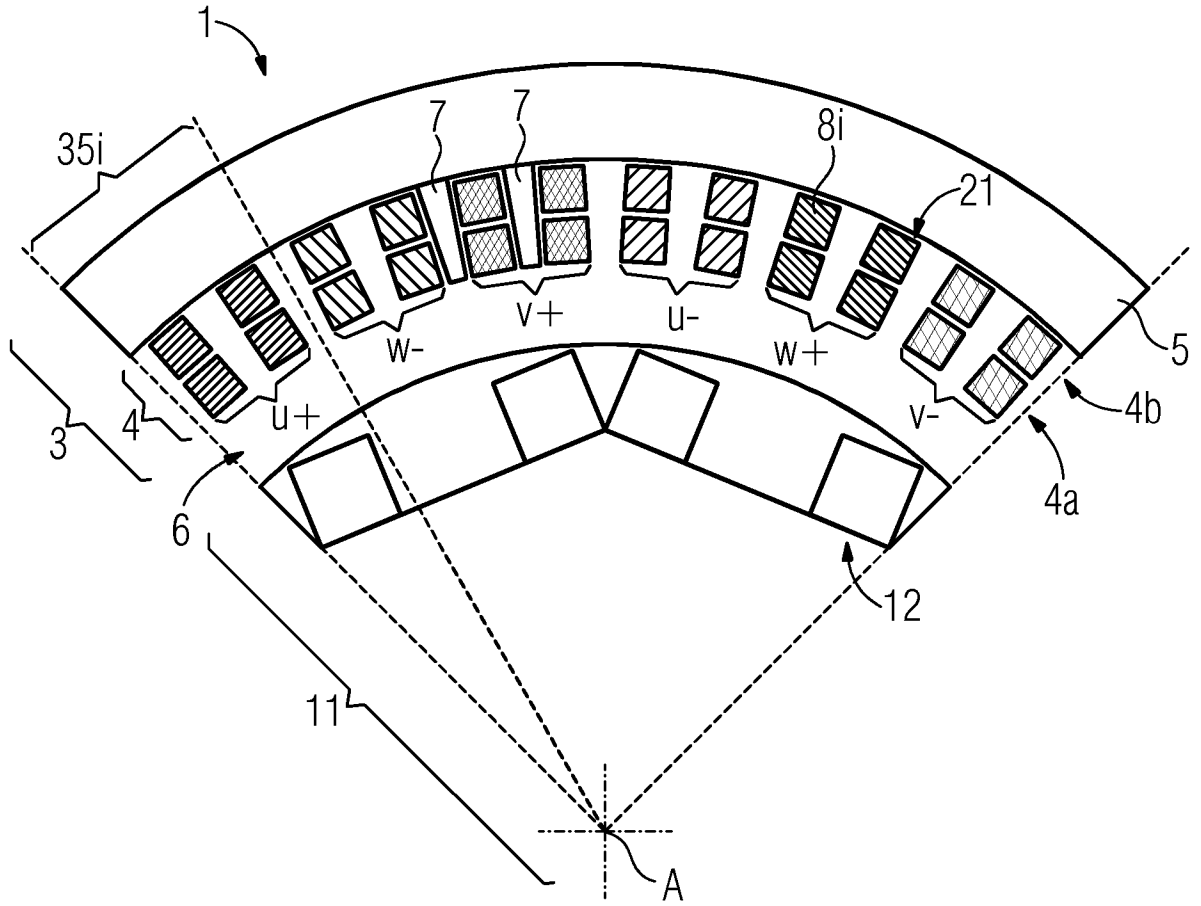


FIG 2

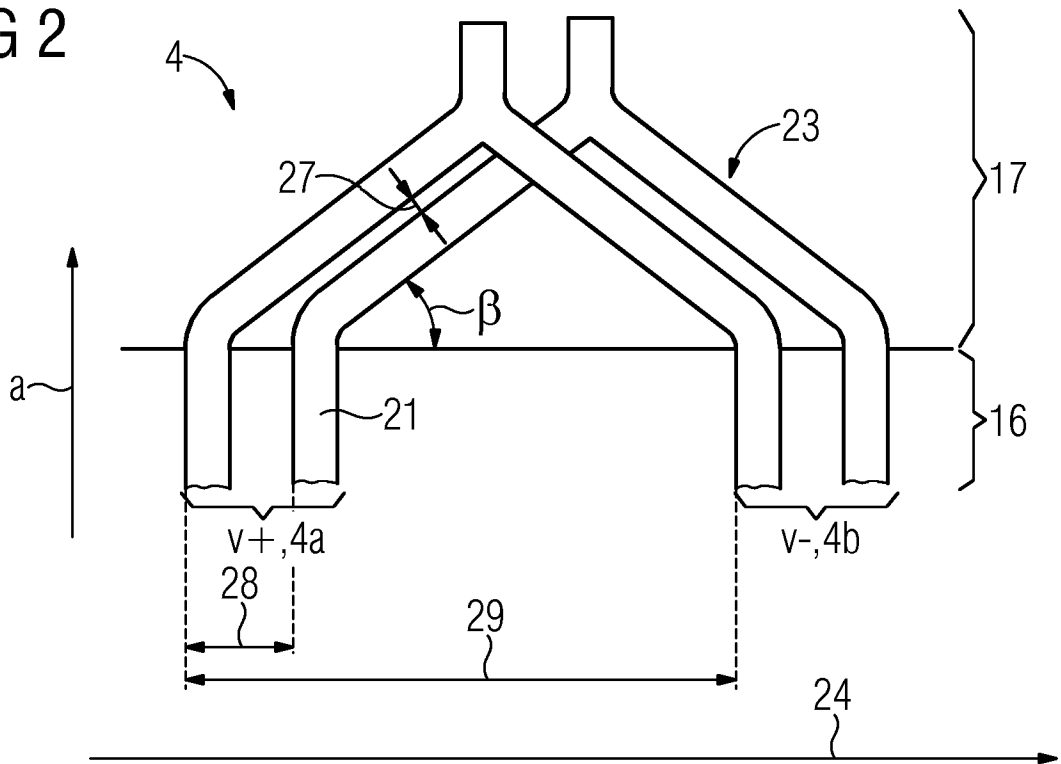


FIG 3

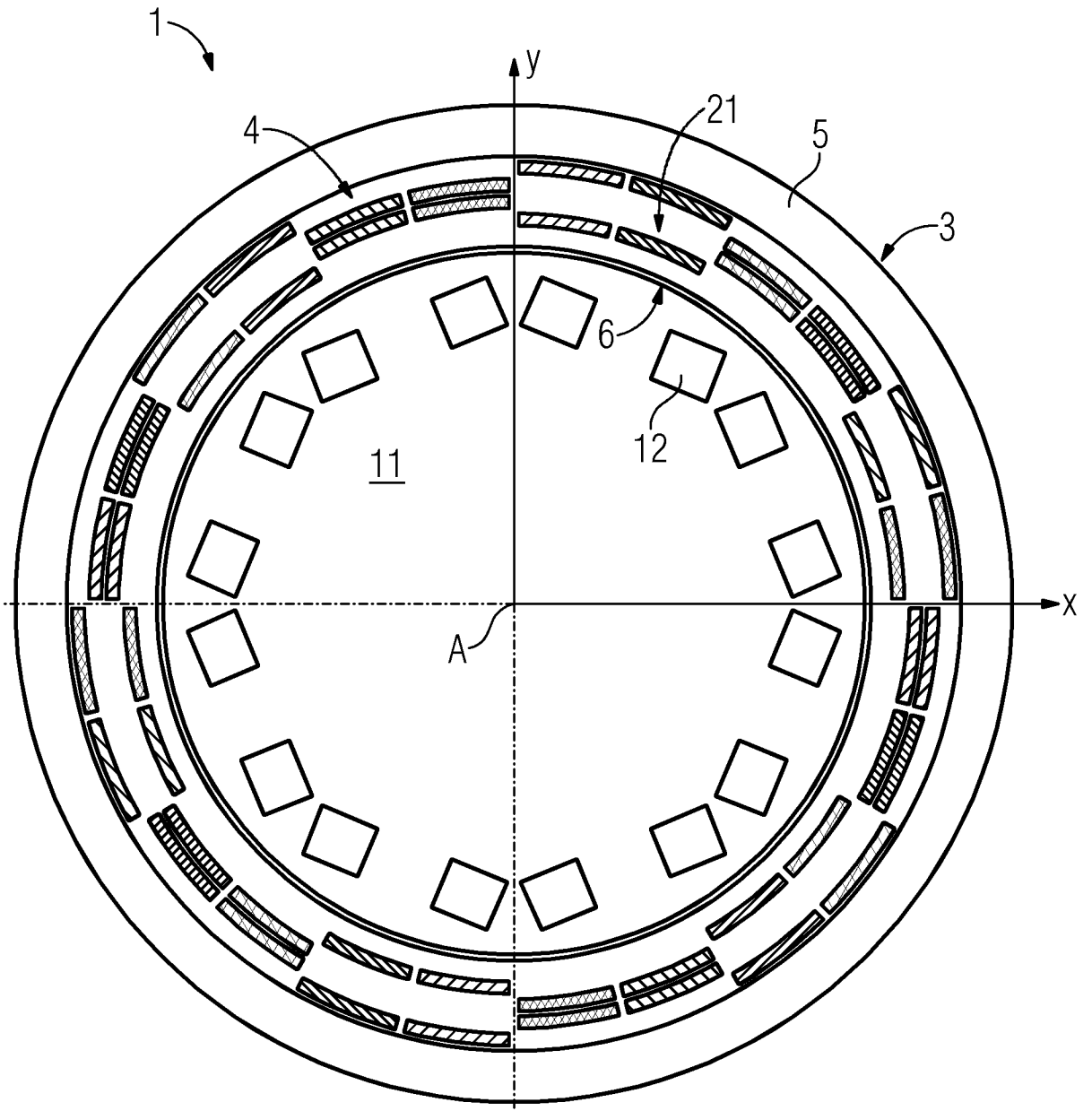


FIG 4

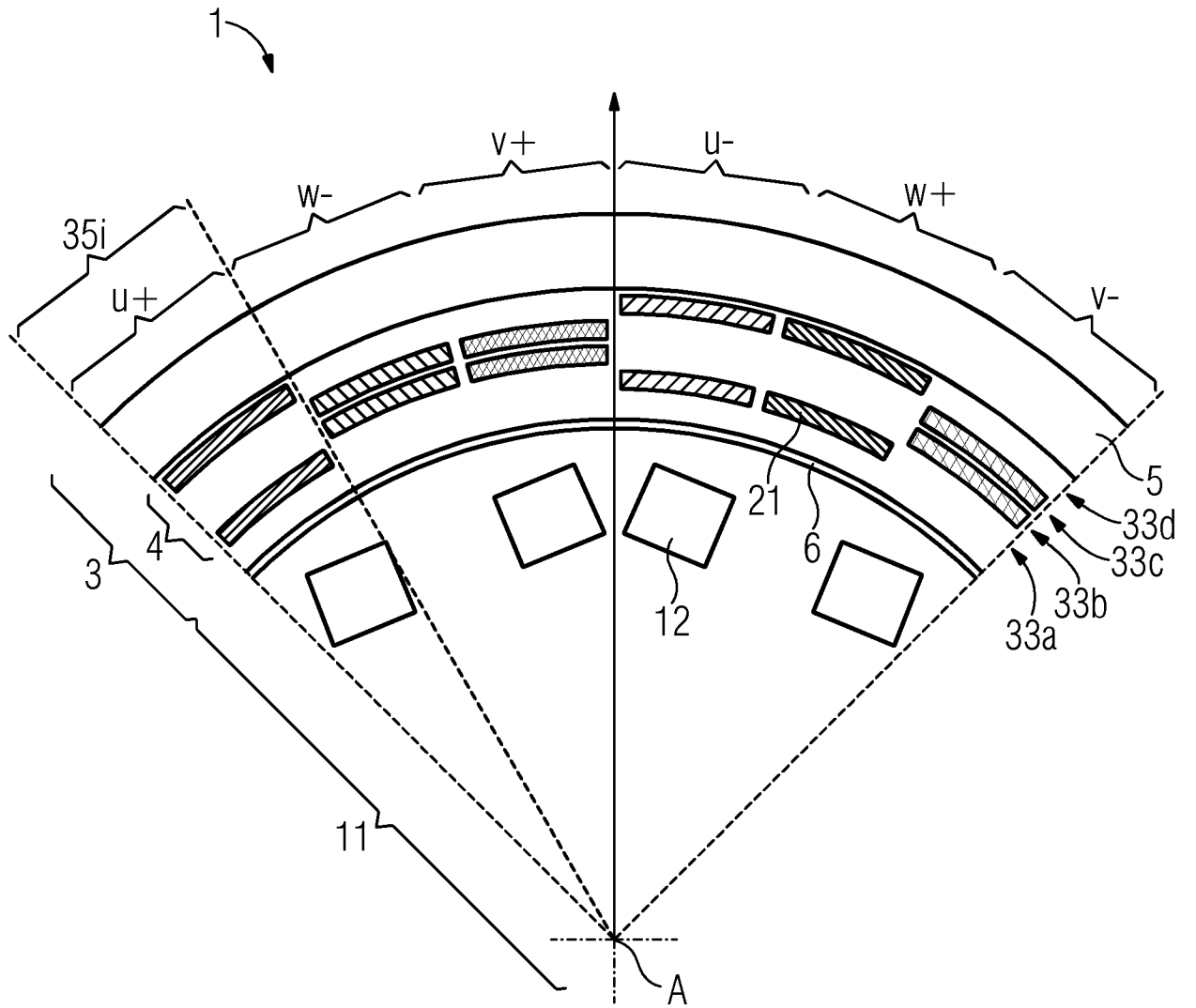


FIG 5

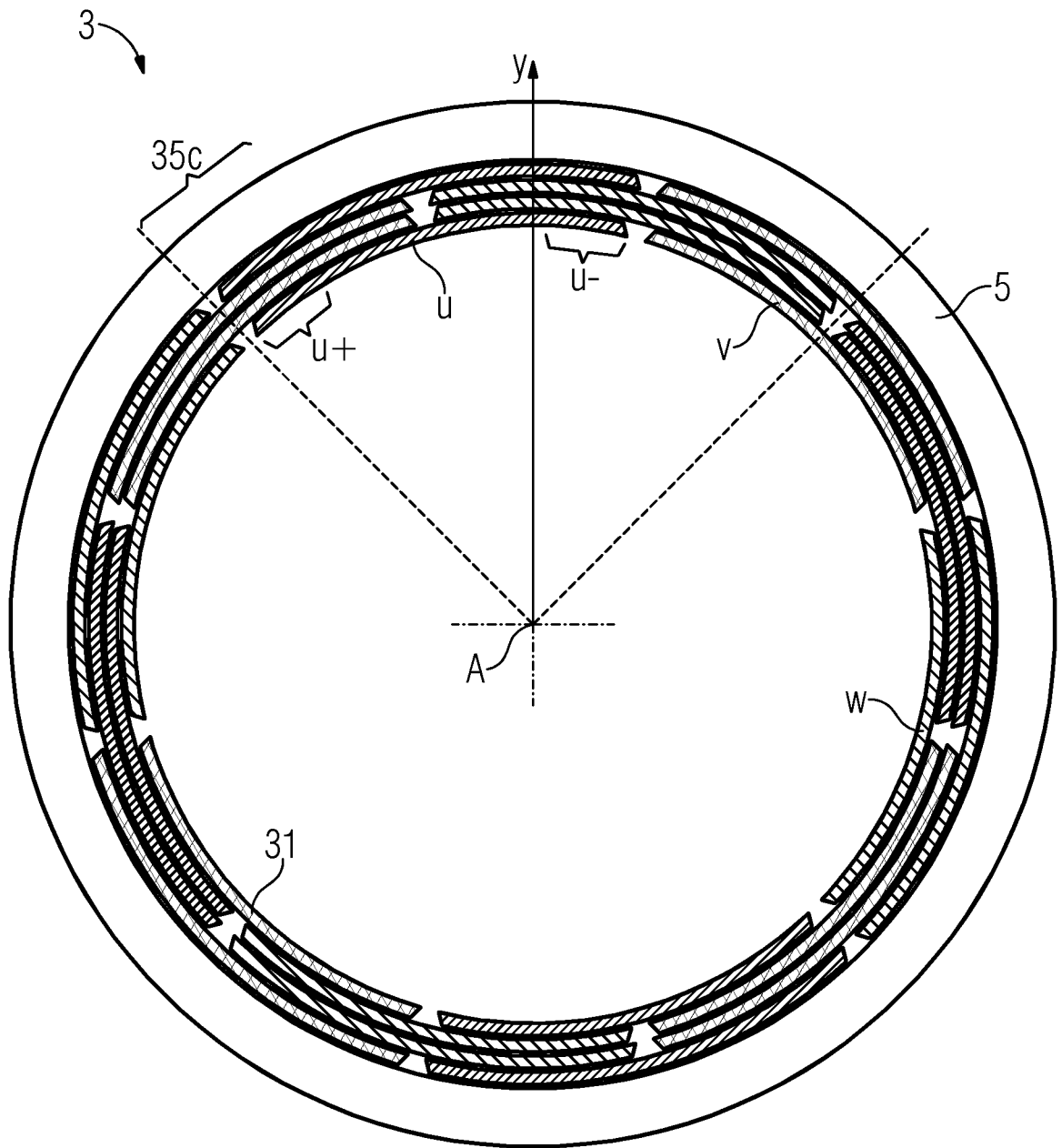


FIG 6

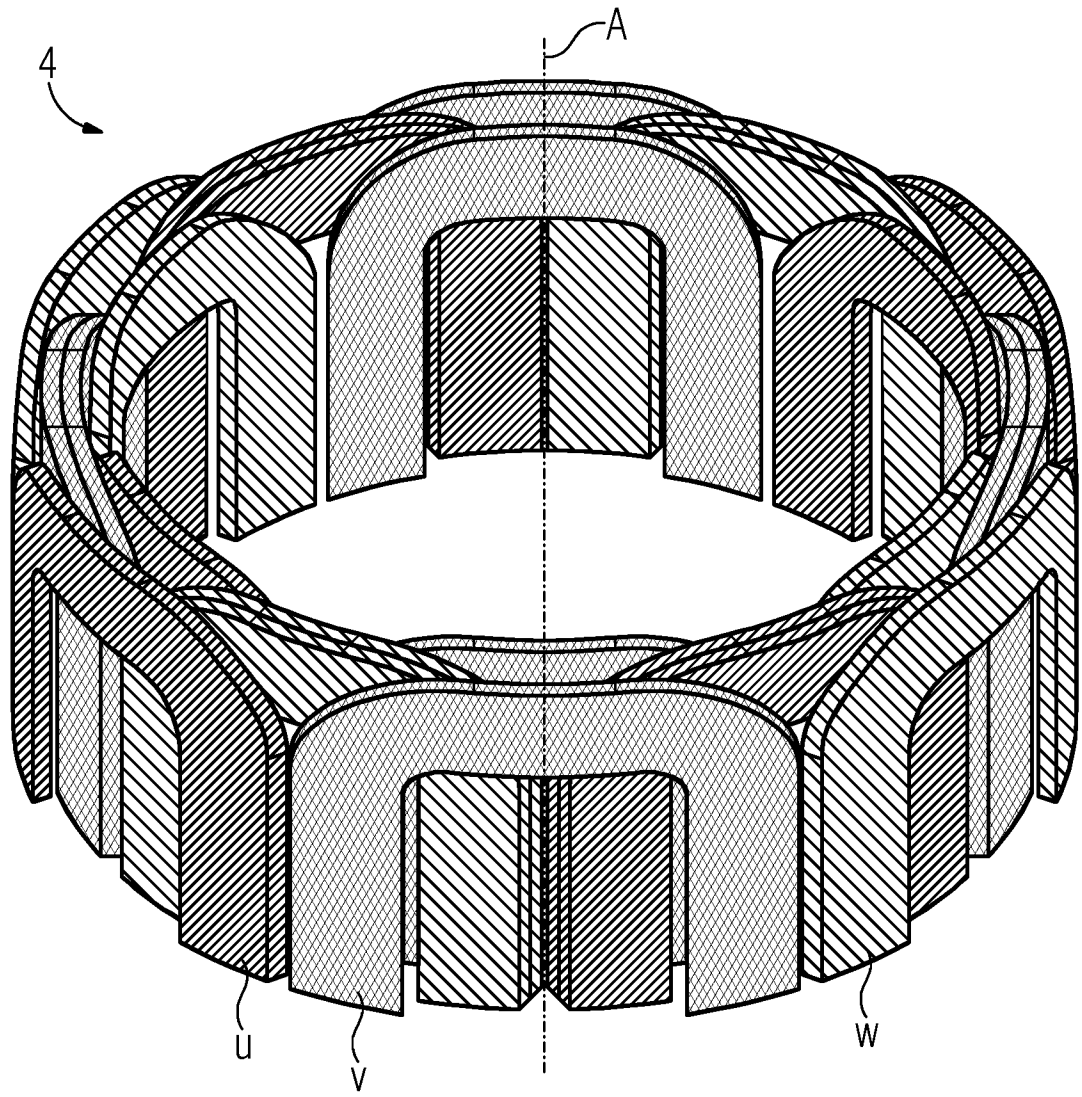


FIG 7

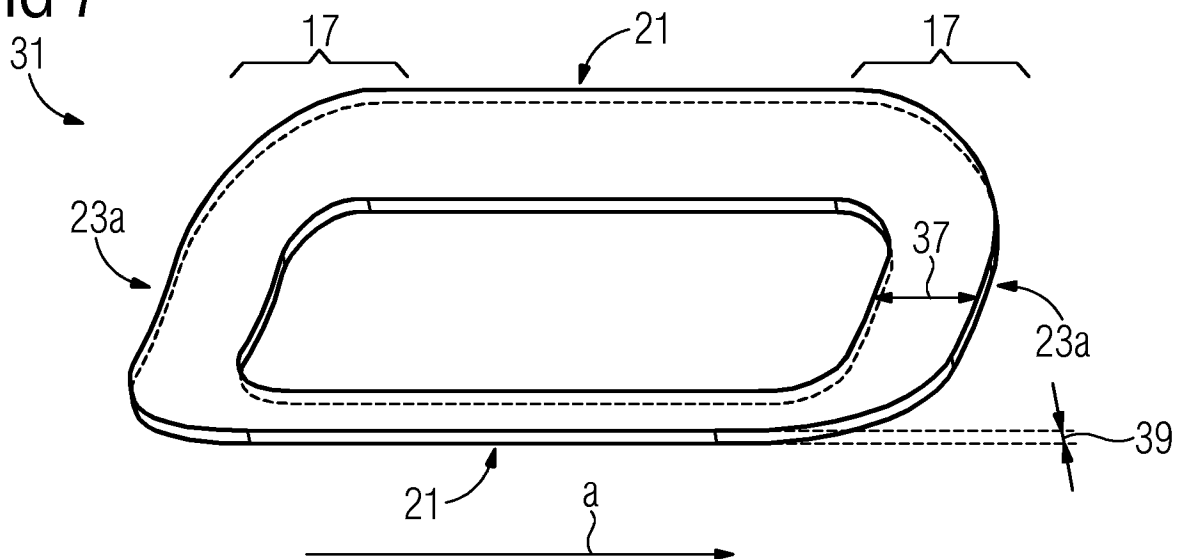


FIG 8

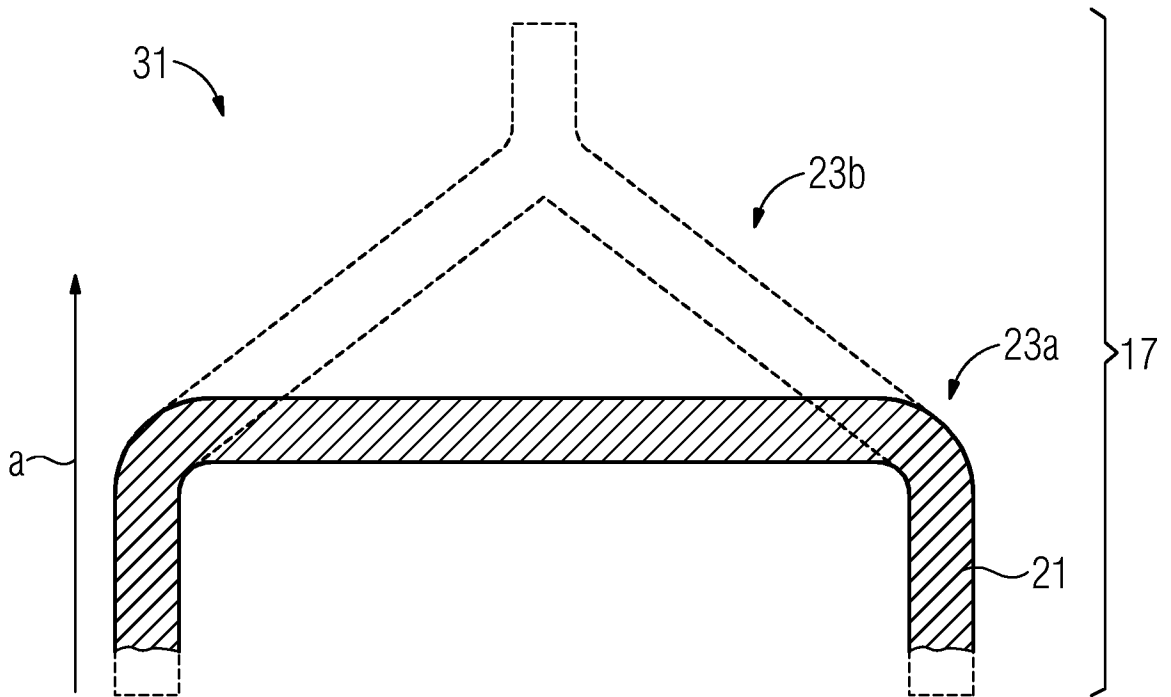


FIG 9

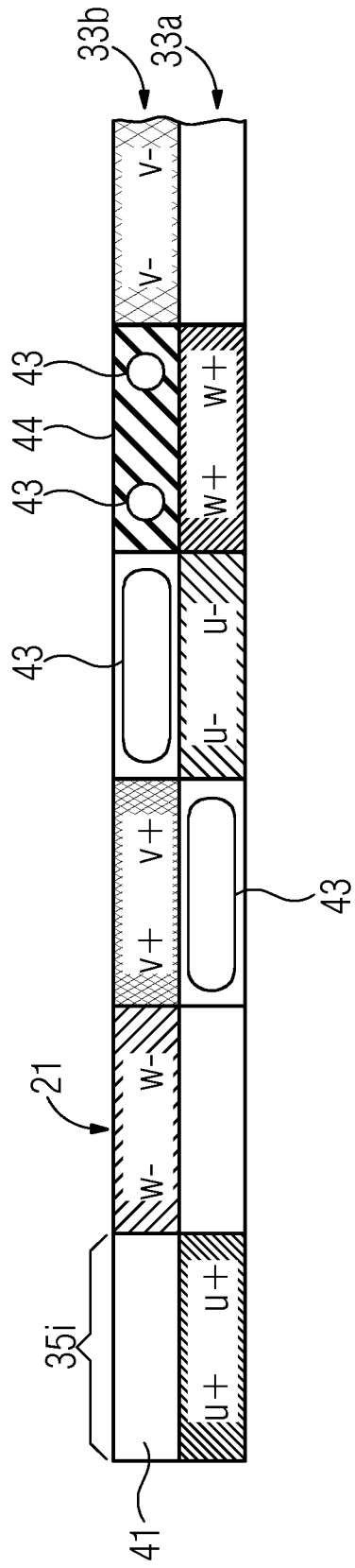


FIG 10

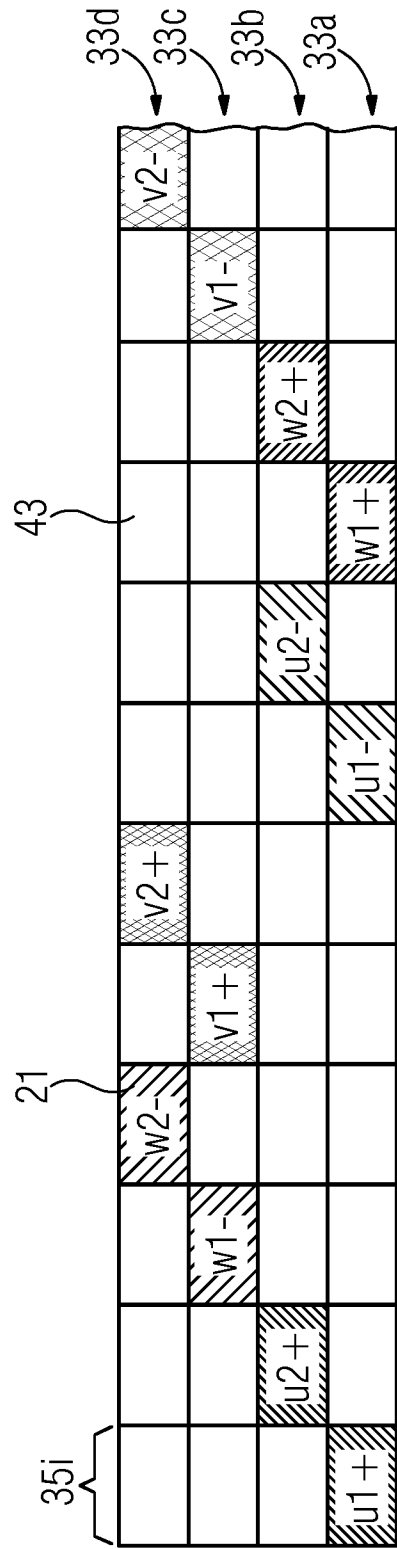


FIG 11

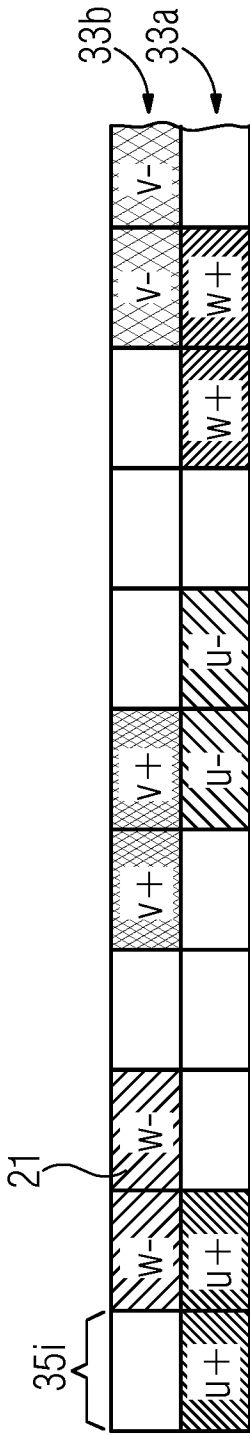
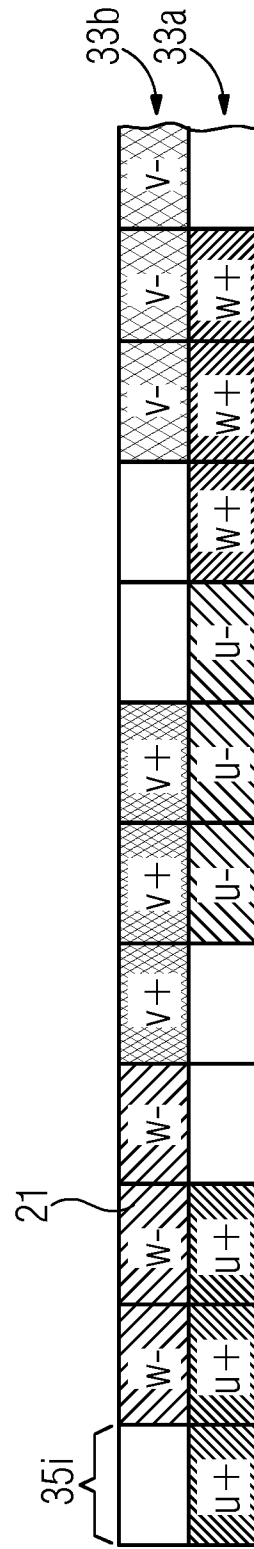


FIG 12



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2018/075555

<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b> <i>H02K 3/28</i> (2006.01)i; <i>H02K 3/47</i> (2006.01)i  According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b>  Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) H02K  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, WPI Data		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	DE 2522626 A1 (PHILIPS NV) 11 December 1975 (1975-12-11) page 1, paragraph 1 page 3, paragraph 4 - page 4, paragraph 1 page 11, paragraph 3 - page 12, paragraph 4; figures 10a-10d	1-5,8-10,13,14
X	CN 205992807 U (EBM-PAPST MULFINGEN GMBH AND CO KG) 01 March 2017 (2017-03-01) paragraph [0039] - paragraph [0043]; figures 1,6,7	1,2,4-6,10,12-14
X A	US 2007176509 A1 (KALSI SWARN S [US] ET AL) 02 August 2007 (2007-08-02) paragraph [0020] - paragraph [0026]; figures 1-6 paragraph [0027] - paragraph [0029]; figures 8-10	1-5,8-15 7
X	US 2010277136 A1 (SNITCHLER GREGORY L [US] ET AL) 04 November 2010 (2010-11-04) paragraph [0030]; figure 1 paragraph [0056] - paragraph [0057]; figures 13-15	1-5,8-15
X,P	DE 102016113436 A1 (EBM-PAPST MULFINGEN GMBH & CO KG [DE]) 25 January 2018 (2018-01-25) paragraph [0039] - paragraph [0043]; figures 1,6,7	1,2,4-6,10,12-14
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier 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 <b>26 November 2018</b>		Date of mailing of the international search report <b>04 December 2018</b>
Name and mailing address of the ISA/EP <b>European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands</b> Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer <b>Sedlmeyer, Rafael</b>  Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
**Information on patent family members**

International application No.

**PCT/EP2018/075555**

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
DE	2522626	A1	11 December 1975	AT	344819	B	10 August 1978
				AU	502504	B2	26 July 1979
				BE	829475	A	26 November 1975
				CA	1025924	A	07 February 1978
				CH	590577	A5	15 August 1977
				DE	2522626	A1	11 December 1975
				ES	437922	A1	01 January 1977
				FR	2273394	A1	26 December 1975
				GB	1506289	A	05 April 1978
				IT	1032970	B	20 June 1979
				JP	S511905	A	09 January 1976
				JP	S5810940	B2	28 February 1983
				NL	7407056	A	01 December 1975
				SE	417262	B	02 March 1981
				US	4135107	A	16 January 1979
<hr/>							
CN	205992807	U	01 March 2017	CN	205992807	U	01 March 2017
				DE	102016113436	A1	25 January 2018
				WO	2018015372	A1	25 January 2018
<hr/>							
US	2007176509	A1	02 August 2007	US	2007176509	A1	02 August 2007
				WO	2007124195	A2	01 November 2007
<hr/>							
US	2010277136	A1	04 November 2010	CN	102668327	A	12 September 2012
				EP	2483992	A2	08 August 2012
				JP	6035146	B2	30 November 2016
				JP	2013506400	A	21 February 2013
				KR	20120076426	A	09 July 2012
				US	2010277136	A1	04 November 2010
				US	2011248509	A1	13 October 2011
				WO	2011041014	A2	07 April 2011
<hr/>							
DE	102016113436	A1	25 January 2018	CN	205992807	U	01 March 2017
				DE	102016113436	A1	25 January 2018
				WO	2018015372	A1	25 January 2018
<hr/>							

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES  
 INV. H02K3/28 H02K3/47  
 ADD.

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

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)  
 H02K

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, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	DE 25 22 626 A1 (PHILIPS NV) 11. Dezember 1975 (1975-12-11)  Seite 1, Absatz 1 Seite 3, Absatz 4 - Seite 4, Absatz 1 Seite 11, Absatz 3 - Seite 12, Absatz 4; Abbildungen 10a-10d -----	1-5, 8-10,13, 14
X	CN 205 992 807 U (EBM-PAPST MULFINGEN GMBH AND CO KG) 1. März 2017 (2017-03-01) Absatz [0039] - Absatz [0043]; Abbildungen 1,6,7 ----- -/-	1,2,4-6, 10,12-14



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

26. November 2018

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

04/12/2018

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

Sedlmeyer, Rafael

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 2007/176509 A1 (KALSI SWARN S [US] ET AL) 2. August 2007 (2007-08-02)	1-5,8-15
A	Absatz [0020] - Absatz [0026]; Abbildungen 1-6 Absatz [0027] - Absatz [0029]; Abbildungen 8-10	7
	-----	
X	US 2010/277136 A1 (SNITCHLER GREGORY L [US] ET AL) 4. November 2010 (2010-11-04)	1-5,8-15
	Absatz [0030]; Abbildung 1 Absatz [0056] - Absatz [0057]; Abbildungen 13-15	
	-----	
X,P	DE 10 2016 113436 A1 (EBM-PAPST MULFINGEN GMBH & CO KG [DE]) 25. Januar 2018 (2018-01-25)	1,2,4-6, 10,12-14
	Absatz [0039] - Absatz [0043]; Abbildungen 1,6,7	
	-----	

## INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2018/075555

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 2522626	A1	11-12-1975	AT 344819 B 10-08-1978
			AU 502504 B2 26-07-1979
			BE 829475 A 26-11-1975
			CA 1025924 A 07-02-1978
			CH 590577 A5 15-08-1977
			DE 2522626 A1 11-12-1975
			ES 437922 A1 01-01-1977
			FR 2273394 A1 26-12-1975
			GB 1506289 A 05-04-1978
			IT 1032970 B 20-06-1979
			JP S511905 A 09-01-1976
			JP S5810940 B2 28-02-1983
			NL 7407056 A 01-12-1975
			SE 417262 B 02-03-1981
			US 4135107 A 16-01-1979
-----			
CN 205992807	U	01-03-2017	CN 205992807 U 01-03-2017
			DE 102016113436 A1 25-01-2018
			WO 2018015372 A1 25-01-2018
-----			
US 2007176509	A1	02-08-2007	US 2007176509 A1 02-08-2007
			WO 2007124195 A2 01-11-2007
-----			
US 2010277136	A1	04-11-2010	CN 102668327 A 12-09-2012
			EP 2483992 A2 08-08-2012
			JP 6035146 B2 30-11-2016
			JP 2013506400 A 21-02-2013
			KR 20120076426 A 09-07-2012
			US 2010277136 A1 04-11-2010
			US 2011248509 A1 13-10-2011
			WO 2011041014 A2 07-04-2011
-----			
DE 102016113436	A1	25-01-2018	CN 205992807 U 01-03-2017
			DE 102016113436 A1 25-01-2018
			WO 2018015372 A1 25-01-2018
-----			