

(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
25. Juni 2020 (25.06.2020)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2020/126564 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
H02K 1/14 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2019/084048

(22) Internationales Anmeldedatum:
06. Dezember 2019 (06.12.2019)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2018 222 228.2
19. Dezember 2018 (19.12.2018) DE

(71) Anmelder: **ROLLS-ROYCE DEUTSCHLAND LTD & CO KG** [DE/DE]; Eschenweg 11, OT Dahlewitz, 15827 Blankenfelde-Mahlow (DE).

(72) Erfinder: **BAUER, Johannes Gabriel**; c/o Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG, Eschenweg 11, 15827 Blankenfelde-Mahlow (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.

(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).

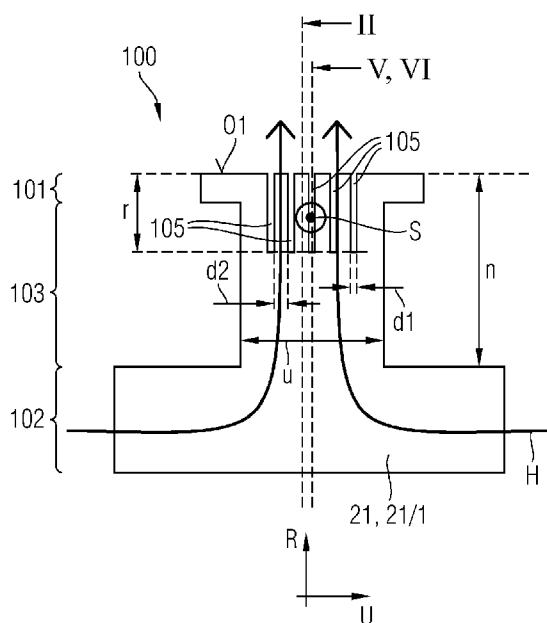
Erklärungen gemäß Regel 4.17:

— hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, die Priorität einer früheren Anmeldung zu beanspruchen (Regel 4.17 Ziffer iii)

(54) Title: STATOR TOOTH FOR A STATOR OF AN ELECTRIC MACHINE

(54) Bezeichnung: STATORZAHN FÜR EINEN STATOR EINER ELEKTRISCHEN MASCHINE

FIG 4



(57) Abstract: The invention relates to the design of a stator tooth for a stator of an electric machine, in particular for an electric drive system of an aircraft. The stator tooth is formed from a multiplicity of sheet metal layers which are stacked on one another in an axial direction. At least those sheet metal layers which delimit the stator tooth in the axial direction have slits which extend in the radial direction and which have the effect of suppressing eddy currents generated in the sheet metal layers, for example by stray fields, during the operation of the electric machine.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft die Ausbildung eines Statorzahns für einen Stator einer elektrischen Maschine, insbesondere für ein elektrisches Antriebssystem eines Luftfahrzeugs. Der Statorzahn ist aus einer Vielzahl von in einer axialen Richtung aufeinander gestapelten Blechlagen gebildet. Zumindest die den Statorzahn in der axialen Richtung begrenzenden Blechlagen weisen Schlitz auf, welche sich in der radialen Richtung erstrecken und bewirken, dass im Betrieb der elektrischen Maschine bspw. von Streufeldern bewirkte Wirbelströme in den Blechlagen unterbunden werden.

Veröffentlicht:

- *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*

Beschreibung

Statorzahn für einen Stator einer elektrischen Maschine

5 Die Erfindung betrifft einen Stator einer elektrischen Maschine. Insbesondere betrifft die Erfindung die Ausführung der Statorzähne des Stators.

10 Zum Antrieb von Luftfahrzeugen, bspw. für Flugzeuge oder Helikopter, oder auch für elektrisch angetriebene Wasserfahrzeuge etc. werden als Alternative zu den gebräuchlichen Verbrennungskraftmaschinen Konzepte beruhend auf elektrischen Antriebssystemen untersucht und eingesetzt. Ein derartiges elektrisches Antriebssystem, welches als rein elektrisches
15 oder auch als hybrid-elektrisches Antriebssystem ausgebildet sein kann, weist in der Regel eine oder mehrere elektrische Maschinen auf, die je nach Verwendungszweck im Antriebssystem als Generator und/oder als Elektromotor konfiguriert sein können. Die für derartige mobile Anwendungen einzusetzenden
20 elektrischen Antriebe sowie die entsprechenden Maschinen müssen sich, um die benötigten Leistungen erzeugen zu können, durch extrem hohe Leistungsdichten auszeichnen. Während für viele technische Anwendungen Leistungsdichten in Größenordnungen bis zu 2kW/kg ausreichend sind, werden bspw. für die
25 Elektrifizierung der Luftfahrt, d.h. für elektrisch oder hybrid-elektrisch angetriebene Luftfahrzeuge, aber auch für andere -insbesondere mobile- Anwendungen elektrische Maschinen mit Leistungsdichten in Größenordnungen von bspw. 20kW/kg und mehr angestrebt.

30

Für die genannten mobilen Anwendungen werden demnach hochleistungsdichte, elektrische Maschinen benötigt. Bei elektrischen Maschinen ergeben sich jedoch aufgrund verschiedener Effekte Verluste, welche die erreichbare Leistungsdichte be-
35 grenzen. Die im Aktivmaterial eines Stators der Maschine auftretenden Verluste werden als Kupfer- und Eisenverluste bilanziert, wobei sich die Eisenverluste wiederum in Hysterese- und Wirbelstromverluste differenzieren lassen. Wirbelstrom-

verluste ergeben sich aufgrund von elektrischen Wirbelströmen im Eisen des Stators, welche ihrerseits vom magnetischen Hauptfluss hervorgerufen werden. Zur Begrenzung der Wirbelströme kann der Stator bekanntermaßen geblecht ausgeführt werden. Dabei wird der Stator aus einer Serie von Blechlagen gebildet, wobei zwischen zwei Blechlagen jeweils eine Isolierschicht angeordnet wird. Das Vorhandensein der Isolierschichten führt dazu, dass die Strompfade der Wirbelströme unterbrochen werden, so dass insbesondere die Wirbelstromkomponenten in einer Richtung senkrecht zur jeweiligen Isolierschicht zum Erliegen kommen. Wirbelstromkomponenten innerhalb einer jeweiligen Blechlage können jedoch weiter weitestgehend ungehindert fließen und so zu Verlusten führen. Diese Wirbelstromkomponenten in der Blechebene sind, wie später näher erläutert wird, insbesondere in den beiden an den Stirnbereichen des Stators liegenden Blechlagen ausgeprägt und resultieren in lokal sehr hohen Verlustdichten.

Die insbesondere in den Stirnbereichen aufgrund der Streufelder auftretenden Wirbelstromverluste können bspw. mit Hilfe einer Vergrößerung des zwischen Statorzähnen und Rotor ausgebildeten Luftspalts reduziert werden. Eine solche Maßnahme hat jedoch nachteiligerweise auch eine Reduzierung des Drehmoments zur Folge. Ein weiterer Ansatz zur Eindämmung der Wirbelstromverluste könnte darin liegen, einen in axialer Richtung verlängerten Wickelkopf zu verwenden. Dies geht jedoch mit einer zusätzlich erforderlichen Leiterlänge und damit mit erhöhten ohmschen Verlusten einher. Weiterhin könnte ausgenutzt werden, dass Streufelder mit der Sättigung des Eisens im Hauptflusspfad ansteigen. Ein vergrößerter Eisenquerschnitt würde demnach zu einer geringeren Sättigung und zu schwächeren Streufeldern führen, ist jedoch auch mit einer Erhöhung der Eisenmasse verbunden. Auch könnte zur Reduzierung von Wirbelströmen ein Material mit geringerem elektrischen Leitwert verwendet werden, was jedoch auch negativen Einfluss auf die magnetischen Eigenschaften des Blechs hat. Alle vier skizzierten Maßnahmen führen also in der Konsequenz zu einer Reduzierung der Leistungsdichte.

Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung von Wirbelstromverlusten in einer elektrischen Maschine vorzugeben, die sich, bspw. im Unterschied zu den genannten Ansätzen, nicht signifikant negativ auf die Leistungsdichte auswirkt. Eine weiter gehende Aufgabe ist es, den Antrieb eines Luftfahrzeuges dahingehend zu verbessern, dass die genannten

10 Dies wird durch den in Anspruch 1 beschriebenen Statorzahn, die mit derartigen Statorzähnen ausgebildete elektrische Maschine gemäß Anspruch 10 sowie ein mit einer solchen Maschine ausgerüstetes Luftfahrzeug gemäß Anspruch 13 gelöst. Die Unteransprüche beschreiben vorteilhafte Ausgestaltungen.

15

Ein Statorzahn für einen Stator einer elektrischen Maschine weist einen Zahnkopf, einen Zahnfuß sowie einen in einer ersten Richtung R zwischen dem Zahnkopf und dem Zahnfuß gelegenen Zahnhals auf. Im Zahnkopf sind Schlitzte vorgesehen, welche sich vom Zahnkopf aus in einer Richtung zum Zahnfuß hin erstrecken, was jedoch nicht zwangsläufig bedeutet, dass sich die Schlitzte bis in den Zahnfuß hinein erstrecken, und welche derart angeordnet und orientiert sind, dass von einem im Betrieb der elektrischen Maschine im Bereich des Statorzahns wirkenden magnetischen Streufeld bewirkbare Wirbelstromkomponenten in der R-U-Ebene zumindest reduziert werden. Die Richtungen R, U und im Folgenden auch A entsprechen einer radialen R, axialen A und tangentialen Richtung U, die bezüglich einer Rotationsachse ROT eines Rotors der elektrischen Maschine definiert sein können. Die Schlitzte bewirken eine Unterdrückung von Wirbelstromkomponenten insbesondere in dem Bereichen des Statorzahns, in dem die Schlitzte ausgebildet sind.

35 Die Schlitzte erstrecken sich von einer vom Zahnfuß abgewandten und im in den Stator eingebauten Zustand einem Rotor der elektrischen Maschine zugewandten Oberfläche des Zahnkopfes im Wesentlichen in der ersten Richtung R zum Zahnfuß hin. Da

die Schlitze direkt von der Oberfläche ausgehen und demnach konsequenterweise insbesondere in der R-Richtung gesehen kein elektrisch leitfähiges Material zwischen der Oberfläche und dem jeweiligen Schlitz liegt, kann sich dort auch kein Wir-
5 belstrompfad bilden. Würden die Schlitze mit einem gewissen Abstand unter der Oberfläche liegen, könnte zwischen der Oberfläche und dem jeweiligen Schlitz ein Wirbelstrompfad verlaufen.

10 Die Schlitze erstrecken sich in der ersten Richtung R gesehen vorzugsweise über den Bereich des Zahnkopfes hinweg bis in den Zahnhals hinein, da auch dort noch damit zu rechnen ist, dass das Streufeld seine Wirkung entfaltet.

15 In der ersten Richtung R gesehen weisen der Statorzahn eine Nuttiefe n und die Schlitze von der Oberfläche aus eine Erstreckung beziehungsweise Schlitztiefe r auf. Für das Verhältnis aus der Schlitztiefe r zur Nuttiefe n gilt:
 $1/3 < r/n < 1/2$, da in diesen Bereichen des Statorzahns mit
20 den stärksten Streufeldern zu rechnen ist.

Das letztlich für die individuelle Maschine optimale Verhältnis r/n lässt sich bspw. über eine numerische Optimierung ermitteln, bei der die individuellen Maschinenparameter berücksichtig-
25 tigt werden.

Die Schlitze sind derart orientiert, dass sie sich im in die elektrische Maschine eingebauten Zustand parallel zu den im Bereich der Schlitze verlaufenden Feldlinien eines im Betrieb
30 der elektrischen Maschine auftretenden magnetischen Hauptflusses H erstrecken, so dass der magnetische Hauptfluss H nicht behindert wird, da eine solche Behinderung zu einer Reduzierung der Leistungsdichte führen würde.

35 Da die Betriebsbedingungen und das Auftreten der magnetischen Felder letztlich von der Auslegung der Maschine abhängen, kann davon ausgegangen werden, dass die Feldgeometrie ausrei-

chend genau bekannt ist, um die Schlitze dementsprechend zu positionieren und auszurichten.

Der Statorzahn ist aus einer Vielzahl N von in einer zweiten
5 Richtung A , welche insbesondere im Wesentlichen senkrecht zur
ersten Richtung R steht, aufeinander gestapelten, separaten
Blechlagen aufgebaut ist. Zwischen zwei benachbart angeordnete-
ten Blechlagen ist vorzugsweise jeweils eine elektrisch iso-
lierende Schicht angeordnet, die die Ausbildung von Wirbel-
10 strömen aufgrund des magnetischen Hauptflusses unterdrückt.
Die Vielzahl N von Blechlagen ist auf eine erste Gruppe mit
 N_1 aufeinander gestapelten Blechlagen, eine zweite Gruppe mit
 N_2 aufeinander gestapelten Blechlagen und eine dritte Gruppe
mit N_3 aufeinander gestapelten Blechlagen mit $N_1+N_2+N_3=N$ so-
15 wie $N_1 \geq 1$, $N_2 \geq 1$ und $N_3 \geq 0$ verteilt. Die drei Gruppen sind der-
art aufeinander gestapelt, dass die dritte Gruppe in der
zweiten Richtung A gesehen zwischen der ersten Gruppe und der
zweiten Gruppe angeordnet ist. Die erste und die zweite Grup-
pe weisen vorzugsweise, aber nicht notwendigerweise, gleich
20 viele Blechlagen auf, d.h. $N_1=N_2=K/2$. Weiterhin weist jede
Blechlage der ersten Gruppe sowie jede Blechlage der zweiten
Gruppe jeweils zumindest einen der Schlitze auf, vorzugsweise
jedoch jeweils eine Vielzahl von Schlitzen.

25 Dies lässt prinzipiell offen, ob nicht auch die dritte,
mittig angeordnete Gruppe Blechlagen mit Schlitzen aufweist.
Zumindest weisen aber die Blechlagen der ersten und der zwei-
ten Gruppe Schlitze auf. Grundsätzlich kann jede der drei
Gruppen bspw. nur eine einzige Blechlage aufweisen.

30

Die Isolierschichten und die Schlitze haben prinzipiell die
gleiche Wirkung, nämlich eine jeweilige Unterbrechung von
Strompfaden entsprechender Wirbelströme. Aufgrund der beson-
deren Anordnung und Orientierung der Schlitze wird durch sie
35 insbesondere eine tangential Komponente des ansonsten insbe-
sondere vom Streufeld S in der jeweiligen Blechlage ausgelös-
ten Wirbelstroms unterbunden. Die Isolierschichten unterdrü-
cken dagegen im Wesentlichen axiale Wirbelstromkomponenten.

Die erste Gruppe und die zweite Gruppe weisen jeweils zumindest eine einzelne der geschlitzten Blechlagen auf, d.h.

$N_1=N_2=1$. Im Fall $N_1=N_2=1$ sind die beiden einzelnen geschlitzten Blechlagen konsequenterweise diejenigen beiden Blechlagen aus der Vielzahl von Blechlagen, die den Statorzahn in der zweiten Richtung A gesehen begrenzen, d.h. die Schlitze sind dann nur in den den Statorzahn begrenzenden Blechlagen vorgesehen. Vorzugsweise weisen die beiden Gruppen aber jeweils mehrere geschlitzte Blechlagen, d.h. $N_1=N_2>1$, auf, so dass auch in den tiefer gelegenen Blechlagen Wirbelstromkomponenten aufgrund der Streufelder unterdrückt werden, auch wenn die Streufelder dort weniger stark ausgeprägt sind.

Vorzugsweise weist jede Blechlage der ersten Gruppe sowie jede Blechlage der zweiten Gruppe jeweils nicht nur einen, sondern mehrere Schlitze auf. Die Schlitze einer jeweiligen Blechlage sind dabei in einer dritten Richtung U gesehen, die auf der ersten Richtung R sowie auf der zweiten Richtung A jeweils im Wesentlichen senkrecht steht, derart positioniert, dass sie hintereinander angeordnet sind.

Des Weiteren sind die Blechlagen der ersten und der zweiten Gruppe derart geformt und die Schlitze dort jeweils derart positioniert und angeordnet, dass zumindest die Blechlagen einer jeweiligen Gruppe in der zweiten Richtung A gesehen deckungsgleich sind. D.h. insbesondere auch, dass sich die Schlitze in den Blechlagen einer jeweiligen Gruppe in der dritten Richtung U sowie in der ersten Richtung R am selben Ort befinden und die gleichen Dimensionen aufweisen, insbesondere die gleiche Erstreckung in der ersten Richtung R.

Eine entsprechende elektrische Maschine weist einen im Wesentlichen kreis- oder ringförmigen Rotor und einen im Wesentlichen kreis- oder ringförmigen Stator auf. Der Stator weist eine Vielzahl von derartigen Statorzähnen auf, welche in einer Umfangsrichtung U des Stators gesehen derart hintereinander angeordnet sind, dass der jeweilige Zahnfuß an einem

Ring des Stators anliegt oder in den Ring integriert ist oder den Ring bildet, der jeweilige Zahnkopf dem Rotor zugewandt ist, die erste Richtung R einer radialen Richtung der elektrischen Maschine entspricht, die zweite Richtung A einer axialen Richtung der elektrischen Maschine entspricht, die dritte Richtung U der Umfangsrichtung U entspricht. Die einleitend beschriebenen Verluste sind bei dieser mit den speziellen Statorzähnen ausgestatteten Maschine entsprechend minimiert.

Jeder Statorzahn weist eine auf den jeweiligen Zahnhals gewickelte Statorwicklung auf, welche, sobald sie von elektrischem Strom durchflossen wird, einen magnetischen Hauptfluss H durch den Statorzahn bewirkt. Die Schlitze des Statorzahns sind nun derart orientiert, dass sie parallel zu den Feldlinien des magnetischen Hauptflusses H verlaufen, so dass der magnetische Hauptfluss H nicht behindert wird, da eine solche Behinderung zu einer Reduzierung der Leistungsdichte führen würde.

Zwischen dem Rotor und dem Stator ist ein Luftspalt mit einer radialen Erstreckung l_s ausgebildet und die Blechlagen weisen jeweils eine Dicke b_d in der axialen Richtung auf. Für die Anzahlen N_1 , N_2 von mit Schlitzen versehenen Blechlagen der ersten und der zweiten Gruppe gilt im Wesentlichen $N_1 = N_2 = K/2 = l_s/b_d$. Für den wahrscheinlichen Fall, dass l_s/b_d keine ganze Zahl ist, kann für $K/2$ natürlich bspw. die dem Quotienten l_s/b_d nächstliegende ganze Zahl durch mathematisches Runden ermittelt und verwendet werden.

Ein Luftfahrzeug, bspw. ein Flugzeug oder ein Helikopter, kann mit einem derartigen elektrischen oder hybrid-elektrischen Antrieb umfassend eine oder mehrere elektrische Maschinen ausgestattet sein. Zumindest eine der elektrischen Maschinen kann dann als Elektromotor zum Antreiben eines Propellers des Luftfahrzeugs ausgebildet sein. Alternativ oder zusätzlich kann zumindest eine der elektrischen Maschinen als Generator zum Bereitstellen von elektrischer Energie bspw.

für einen elektrischen Energiespeicher und/oder für einen Elektromotor zum Antreiben eines Propellers des Luftfahrzeugs ausgebildet sein.

5 Mit der vorgestellten Lösung sind demnach deutlich geringere Drehmoment- und Leistungseinbußen erreichbar. Der magnetische Hauptfluss im jeweiligen Statorzahn wird durch die Ausrichtung der Schlitze nur geringfügig beeinflusst. Die Verlustleistung wird jedoch wesentlich reduziert, ohne die
10 Drehmomentbildung signifikant zu beeinflussen. Da nun bei der Maschinenauslegung die Randbedingung der Verlustleistung insbesondere im Stirnbereich entfällt, kann eine leistungsfähigere Auslegung bei gleichem Gewicht und Volumen der elektrischen Maschine erreicht werden. Es ist demnach in der Folge
15 möglich, elektrische Maschinen mit weniger Materialeinsatz und/oder mit günstigeren Materialien herzustellen.

Weitere Vorteile und Ausführungsformen ergeben sich aus den Zeichnungen und der entsprechenden Beschreibung.

20

Im Folgenden werden die Erfindung und beispielhafte Ausführungsformen anhand von Zeichnungen näher erläutert. Dort werden gleiche Komponenten in verschiedenen Figuren durch gleiche Bezugszeichen gekennzeichnet. Es ist daher möglich, dass
25 sich bei der Beschreibung einer zweiten Figur zu einem bestimmten Bezugszeichen, welches bereits im Zusammenhang mit einer anderen, ersten Figur erläutert wurde, keine näheren Erläuterungen finden. In einem solchen Fall kann bei der Ausführungsform der zweiten Figur davon ausgegangen werden, dass
30 die dort mit diesem Bezugszeichen gekennzeichnete Komponente auch ohne nähere Erläuterung im Zusammenhang mit der zweiten Figur die gleichen Eigenschaften und Funktionalitäten aufweist, wie im Zusammenhang mit der ersten Figur erläutert. Des Weiteren werden der Übersichtlichkeit wegen teilweise
35 nicht sämtliche Bezugszeichen in sämtlichen Figuren dargestellt, sondern nur diejenigen, auf die in der Beschreibung der jeweiligen Figur Bezug genommen wird.

Es zeigen:

- FIG 1 eine axiale Sicht auf eine elektrische Maschine,
FIG 2 einen tangentialen Schnitt eines Stators bzw. eines
5 Statorzahns,
FIG 3 eine axiale Sicht auf einen handelsüblichen Stator-
zahn,
FIG 4 eine axiale Sicht auf einen erfindungsgemäßen Stator-
zahn,
10 FIG 5 einen tangentialen Schnitt einer ersten Ausführung
eines erfindungsgemäßen Statorzahns,
FIG 6 einen tangentialen Schnitt einer zweiten Ausführung
eines erfindungsgemäßen Statorzahns,
FIG 7 ein Luftfahrzeug mit hybrid-elektrischem Antrieb.

15

Es sei angemerkt, dass sich Begriffe wie „axial“, „radial“, „tangential“ bzw. „in Umfangsrichtung“ etc. auf die in der jeweiligen Figur bzw. im jeweils beschriebenen Beispiel zum Einsatz kommende Welle bzw. Achse ROT beziehen. Mit anderen
20 Worten beziehen sich die Richtungen axial A, radial R, tangential U stets auf eine Drehachse ROT des Rotors. Dabei beschreibt „axial“ eine Richtung A parallel zur Rotationsachse ROT, „radial“ beschreibt eine Richtung R orthogonal zur Rotationsachse ROT, auf diese zu oder auch von ihr weg, und „tangential“ ist eine Bewegung bzw. Richtung U orthogonal zur
25 Achse ROT sowie orthogonal zur radialen Richtung R, die also in konstantem radialen Abstand zur Rotationsachse ROT und bei konstanter Axialposition kreisförmig um die Rotationsachse ROT herum gerichtet ist. Die tangentialen Richtung U kann ggf.
30 auch als Umfangsrichtung U bezeichnet werden.

Weiterhin sollen die Begriffe „axial“, „radial“ bzw. „tangential“ im Zusammenhang mit einer Fläche, bspw. einer Oberfläche, bedeuten, dass der Normalenvektor der jeweiligen axialen, radialen bzw. tangentialen Fläche in axialer, radialer
35 bzw. tangentialer Richtung orientiert ist, wodurch die Orientierung der jeweiligen Fläche im Raum eindeutig beschrieben ist.

Mit dem Begriff „elektromagnetische Wechselwirkung“ ist die bei einer elektrischen Maschine bekannte Wechselwirkung zwischen den Magnetfeldern der magnetischen Mittel des Rotors, bspw. Permanentmagnete, und den magnetischen Mitteln des Stators, bspw. stromdurchflossene Spulen, gemeint, aufgrund derer der Elektromotor sein Drehmoment entwickelt bzw. aufgrund derer ein Generator einen elektrischen Strom liefert.

Die FIG 1 zeigt einen Stator 20, welcher für eine elektrische Maschine 1 verwendet werden kann, bspw. für einen Elektromotor. Weitere zum Betrieb der Maschine 1 benötigte Peripheriegeräte wie bspw. eine Stromquelle zur Bereitstellung eines in die noch zu beschreibenden Statorwicklungen einzuspeisenden Stroms oder aber ein Verbraucher eines in die Statorwicklungen induzierten Stroms sind der Übersichtlichkeit wegen nicht dargestellt. Ein Rotor 10 der elektrischen Maschine 1 ist nur vage angedeutet. Der Rotor 10 weist einen Grundkörper 11 sowie einen im Wesentlichen aus Permanentmagneten 12 bestehenden Ring auf. Im Betrieb rotiert der Rotor 10 um die Rotationsachse ROT. Die Permanentmagnete 12, von denen der Übersichtlichkeit wegen nur einige wenige mit Bezugszeichen versehen sind, wechselwirken im Betrieb der elektrischen Maschine 1 über einen Luftspalt 13 in an sich bekannter Weise elektromagnetisch mit den Statorwicklungen, so dass die Maschine 1 je nach gewünschter Betriebsart als Generator oder als Elektromotor fungiert.

Der Stator 20 weist eine Vielzahl von in Umfangsrichtung U des Stators 20 hintereinander angeordneten Statorzähnen 100 auf, von denen nur einige wenige mit Bezugszeichen versehen sind. Jeder der Statorzähne 100, von denen exemplarisch einer in den übrigen Figuren vergrößert dargestellt ist, trägt jeweils eine Wicklung 200 einer jeweiligen Zahnspule eines Statorwicklungssystems der elektrischen Maschine 1. Da die Zahnspulen sowie die entsprechenden Wicklungen 200 im Folgenden keine wesentliche Rolle spielen, wird hierauf nicht näher eingegangen. Je nach Betriebsmodus der Maschine 1 als Genera-

tor oder als Elektromotor wird durch elektromagnetische Wechselwirkung mit den Permanentmagneten 12 des drehenden Rotors 10 in den Statorwicklungen 200 bzw. Zahnspulen eine Spannung induziert, die an nicht dargestellten Klemmen abgreifbar wäre, oder es werden von einer Stromquelle Ströme in die Statorwicklungen 200 eingespeist, um wiederum eine elektromagnetische Wechselwirkung mit den Permanentmagneten 12 zu erreichen und damit eine Rotation des Rotors 10 zu bewirken.

Bei elektrischen Maschinen wie der hier dargestellten 1 ergeben sich u.a. durch die Limitierung des Wärmestroms an die Umgebung und die hierdurch resultierende Erwärmung temperaturkritischer Bauteile Verluste, welche die erreichbare Leistungsdichte begrenzen. Die im Aktivmaterial des Stators 20 auftretenden Verluste werden als Kupfer- und Eisenverluste bilanziert, wobei sich die Eisenverluste wiederum in Hysteres- und Wirbelstromverluste differenzieren lassen.

Wirbelstromverluste ergeben sich aufgrund von elektrischen Wirbelströmen W im Eisen des Stators 20, welche ihrerseits vom magnetischen Hauptfluss H hervorgerufen werden. Dies ist in FIG 3 schematisch dargestellt. Zur Begrenzung der Wirbelströme W und der entsprechenden Verluste können der Stator 20 und damit die Statorzähne 100 bekanntermaßen geblecht ausgeführt werden. Eine solche Ausführung ist an sich bekannt und so zu verstehen, dass -wie in den FIG 2, 5 und 6 angedeutet- der Stator 20 und damit die Statorzähne 100 aus einer Vielzahl N von weitestgehend identischen Blechlagen 21 bestehen, die in axialer Richtung deckungsgleich aufeinander gestapelt sind.

Die FIG 2 bzw. die FIG 5 repräsentieren jeweils eine tangentielle Ansicht II bzw. V auf den Statorzahn 100 des Stators 20 und auf die entsprechenden Blechlagen 21 entsprechend den in den FIG 1, 3, 4 mit „II“ sowie dem in der FIG 4 mit „V“ gekennzeichneten Schnitten in den jeweiligen R-A-Ebenen. Einzelne Blechlagen werden mit 21/1, 21/2, 21/3,... bezeichnet, wobei die Blechlagen 21/ i mit $i=1,...,N$ ausgehend von der

Blechlage 21/1 auf der Seite des Stirnbereichs ST1 aufsteigend nummeriert werden. Rein exemplarisch könnte der Stator 20 in der Praxis bspw. eine Aktivlänge von $a=100\text{mm}$ aufweisen und aus ca. $N=435$ Blechlagen aufgebaut sein, so dass sich eine

5 Blechdicke $b=0,23\text{mm}$ ergäbe. Der Übersichtlichkeit wegen sind in den FIG 2 und 5 sowie auch in FIG 6 nicht alle $N=435$ Blechlagen 21 dargestellt bzw. mit Bezugszeichen versehen. Die Blechlagen 21/1 und 21/N bilden die den jeweiligen

10 Statorzahn 100 in der axialen Richtung A begrenzenden Blechlagen, sind also die aus Sicht des jeweiligen Stirnbereichs ST1 bzw. ST2 ersten Blechlagen 21/1 bzw. 21/N des Statorzahns 100. In den Darstellungen in den FIG 2, 5 sowie FIG 6 wird die begrenzende Blechlage 21/435 im Folgenden allgemein mit 21/N bezeichnet wird, um zu zeigen, dass es sich um die letzte

15 bzw. eine axial äußere Blechlage handelt.

Zwischen zwei benachbart angeordneten Blechlagen 21/i und 21/i+1 befindet sich jeweils eine elektrisch isolierende Schicht 22, bspw. bestehend aus sog. Backlack. Das Vorhanden-

20 sein der Isolierschichten 22 führt dazu, dass Komponenten der Strompfade der Wirbelströme W in einer Richtung senkrecht zur jeweiligen Isolierschicht 22 unterbrochen und entsprechende axiale Wirbelströme verhindert werden. Wirbelstromkomponenten W innerhalb einer jeweiligen Blechlage 21, d.h. in der in FIG

25 3 dargestellten R-U-Ebene, können jedoch weiterhin weitestgehend ungehindert fließen und so zu Verlusten führen.

Die FIG 3 zeigt neben der prinzipiellen Form eines Statorzahnes 100 in axialer Blickrichtung A auch den im Statorzahn 100

30 im Betrieb der entsprechenden elektrischen Maschine 1 typischerweise auftretenden magnetischen Hauptfluss H sowie den magnetischen Streufluss S . Der Hauptfluss H hat aufgrund der beschriebenen, in FIG 3 aber nicht sichtbaren Schicht- bzw. Blechlagenanordnung keine Wirbelströme zur Folge. Im Unterschied hierzu resultiert jedoch der Streufluss S aufgrund

35 seiner Orientierung bzgl. der Blechlagen 21 in dem in FIG 3 dargestellten Wirbelstrom W , welcher zu den erläuterten Verlusten führt.

Diese Wirbelstromkomponenten W in den Blechebenen der Blechlagen 21, d.h. in den R-U-Ebenen, sind insbesondere in den beiden den jeweiligen Statorzahn 100 in der axialen Richtung A begrenzenden Blechlagen 21/1, 21/N ausgeprägt, d.h. bei den Stirnbereichen ST1, ST2 der Maschine 1 bzw. des Stators 20. Diese Wirbelströme W resultieren aus dem magnetischen Streufeld S im jeweiligen Stirnbereich ST1, ST2, welches -im Unterschied zum Hauptfluss H- nicht in radialer R und tangentialer Richtung U, sondern insbesondere auch in axialer Richtung A und damit senkrecht zu den Blechlagen 21 orientiert ist. Insbesondere diese axiale Komponente des Streufelds S bewirkt vergleichsweise vergrößerte Wirbelströme W in den den Stirnbereichen ST1, ST2 nahe liegenden Blechlagen 21, d.h. insbesondere in den axial äußeren Lagen 21/1, 21/N des Statorzahns 100, und damit lokal sehr hohe Verlustdichten. Speziell bei elektrischen Maschinen 1 mit kleiner axialer Erstreckung stellen die entsprechenden Wirbelstromverluste in den Stirnbereichen ST1, ST2 einen dominierenden Anteil der Gesamtverluste im Eisen dar.

Die FIG 4 entspricht der Sicht der FIG 3, d.h. einer axialen Sicht auf einen Statorzahn 100, zeigt aber eine Ausführung des Statorzahns 100 entsprechend der vorliegenden Erfindung. Der Statorzahn 100 weist einen ersten Abschnitt 101 oder auch Zahnkopf 101 auf, der im in die Maschine 1 eingebauten Zustand dem Rotor 10 zugewandt ist. Des Weiteren weist der Statorzahn einen zweiten Abschnitt 102 oder auch Zahnfuß 102 auf, der im in die Maschine 1 eingebauten Zustand an einem entsprechenden zweiten Bereich eines benachbart angeordneten Statorzahns 100 des Stators 20 anliegt bzw. in diesen integriert ist bzw. diesen bildet. In der in FIG 1 dargestellten Ausführung des Stators 2, in der im Prinzip die Zähne 100 den Stator 20 bilden und kein separater Ring o.ä. vorgesehen ist, an dem die Zähne 100 zu befestigen wären, bilden also die zweiten Abschnitte 102 bzw. Zahnfüße 102 der Menge der Statorzähne 100 einen geschlossenen Ring. Zwischen dem ersten Abschnitt 101 und dem zweiten Abschnitt 102 befindet sich ein

dritter Abschnitt 103 oder auch Zahnhals 103, der sich im in die Maschine 1 eingebauten Zustand in radialer Richtung R zwischen dem ersten Abschnitt 101 und dem zweiten Abschnitt 102 erstreckt. Typischerweise ragen der erste Abschnitt 101 sowie auch der zweite Abschnitt 102 jeweils in positiver und negativer tangentialer Richtung U gesehen über den dritten Abschnitt 103 hinaus und der dritte Abschnitt 103 wird genutzt, um dort die Wicklungen 200 der Zahnspulen zu platzieren (nur in FIG 1 dargestellt).

Erfindungsgemäß sind zumindest im Bereich des ersten Abschnitts 101 des Statorzahns 100 Schlitze 105 eingebracht, die sich ausgehend von der im in den Stator 20 und in die Maschine 1 eingebauten Zustand dem Rotor 10 zugewandten Oberfläche O1 des Zahns 100 im ersten Abschnitt 101 in im Wesentlichen longitudinaler Richtung des Zahns 100 erstrecken, d.h. vom ersten Abschnitt 101 in Richtung des zweiten Abschnitts 102. Dabei entspricht diese longitudinale Richtung im in den Stator 20 bzw. in die Maschine 1 eingebauten Zustand der radialen Richtung R. Die Schlitze 105 sind idealerweise parallel zu den Feldlinien des magnetischen Hauptflusses H angeordnet, um diesen nicht zu behindern, da eine solche Behinderung zu einer Reduzierung der Leistungsdichte führen würde. Typischerweise werden die Schlitze 105 parallel zueinander sowie parallel zur A-R-Ebene angeordnet, d.h. ihre Erstreckung r in der R-Richtung ist wesentlich größer als ihre Erstreckung bzw. Dicke d in der U-Richtung. Vorzugsweise ist die Erstreckung r derart gewählt, dass die Schlitze 105 von der Oberfläche O1 über den ersten Abschnitt 101 hinaus bis in den dritten Abschnitt 103 reichen. Die Erstreckung a in der axialen Richtung A entspricht der axialen Erstreckung derjenigen Blechlage 21 des Statorzahns 100, in dem der jeweilige Schlitz 105 ausgebildet ist, d.h. der Dicke a dieser Blechlage 21.

Die Schlitze 105 haben prinzipiell die gleiche Wirkung wie die Isolierschichten 22, nämlich eine jeweilige Unterbrechung von Strompfaden entsprechender Wirbelströme. Aufgrund der be-

sonderen Anordnung und Orientierung der Schlitze 105 wird insbesondere eine tangential Komponente des ansonsten insbesondere vom Streufeld S in der jeweiligen Blechlage 21 ausgelösten Wirbelstroms W, der noch in FIG 3 dargestellt wurde, unterbunden.

In der FIG 4 sind entlang der Erstreckung des Statorzahns 100 in der Umfangsrichtung U rein exemplarisch und der Übersichtlichkeit wegen lediglich fünf Schlitze 105 vorgesehen. In der Praxis könnten bei einer Zahnbreite $u=10\text{mm}$ möglicherweise bspw. 10 Schlitze vorgesehen sein. Bei der Entscheidung zur Anzahl der wirbelstrombegrenzenden Schlitze 105 in dieser Richtung U ist einerseits zu berücksichtigen, dass mit steigender Anzahl von Schlitzen 105, d.h. mit kleiner werdendem Bereich senkrecht zum Streufeld S, in dem sich Wirbelströme ausbilden können, die Reduktion der Wirbelstromverluste verbessert wird. Andererseits erweist sich eine zu hohe Anzahl von Schlitzen 105 in der jeweiligen Blechlage 21 als Nachteil, da sich im verbleibenden, entsprechend der höheren Anzahl reduzierten Blechvolumen eine höhere Sättigung einstellt.

Bezüglich der Anzahl der Schlitze 105 in einer Blechlage 21 kann bspw. von 10 Schlitzen pro cm in der U-Richtung ausgegangen werden. Grundsätzlich ist anzustreben, dass die Dicke d der Schlitze 105 in der U-Richtung möglichst gering gewählt wird, bspw. $d=0,1\text{mm}$. Die Schlitze 105 können für einen typischen Statorzahn 105 mit einer Nuttiefe $n=15\text{mm}$ und einer tangentialen Erstreckung u insbesondere des dritten Bereichs 103 von $u=10\text{mm}$ bspw. derart dimensioniert und typischerweise in U-Richtung gleichverteilt angeordnet sein, dass für die Tiefe r der Schlitze 105 in R-Richtung gilt $r=7\text{mm}$. Vorteilhafterweise wird die Schlitztiefe r in Hinblick auf die Nuttiefe n derart gewählt, dass gilt $1/3 < r/n < 1/2$, da in diesen Bereichen bzw. den entsprechenden Abschnitten 101, 103 des Statorzahns 100 mit den stärksten Streufeldern zu rechnen ist.

Es können zwar, müssen aber nicht zwangsläufig in jeder Blechlage 21 Schlitze vorgesehen sein. Die Schlitze 105 sind jedoch zumindest in den beiden den jeweiligen Statorzahn 100 in der axialen Richtung A begrenzenden Blechlagen 21/1 und 21/N vorgesehen, d.h. in der ersten Blechlage 21/1 sowie in der letzten Blechlage 21/N und damit jeweils in unmittelbarer Nähe der Stirnbereiche ST1, ST2 der Maschine 1 bzw. des Stators 20, da der Einfluss des Streufeldes S in diesen axial äußeren Blechlagen 21/1, 21/N maximal ist. Die FIG 5 zeigt eine entsprechende Ausbildung und speziell den in FIG 4 mit „V“ angedeuteten Schnitt in der R-A-Ebene und damit den Blick in der Umfangsrichtung U am Ort eines der Schlitze 105. Wie dort deutlich wird, sind in dieser Ausführung lediglich die axial äußeren Blechlagen 21/1, 21/N derart mit Schlitzen 105 versehen, dass sich die in FIG 4 dargestellte Schlitzanordnung ergibt. Es sei erwähnt, dass sich die Schlitze 105 beim sog. Verbacken der Blechlagen 21 mit dem oben exemplarisch erwähnten Backlack typischerweise mit dem Backlack füllen werden. Dies ist in den FIG jedoch nicht dargestellt.

Bei der Festlegung der Gesamtzahl K der mit Schlitzen 105 versehenen Blechlagen 21 kann die Breite a des jeweiligen Zahns 100 in axialer Richtung A als Anhaltspunkt dienen. Eine Optimierung ist bspw. im Rahmen einer 3D-FEM Simulation möglich, wobei bspw. angestrebt werden kann, den besten Wirkungsgrad bzw. die beste Wellenleistung bei gegebener Obergrenze für die lokale Verlustleistung zu erzielen. Wie oben bereits angemerkt, ist der Einfluss der Streufeldes S in den Stirnbereichen ST1, ST2 des Stators 20 und damit in den dort gelegenen, den Statorzahn 100 in axialer Richtung A begrenzenden Blechlagen 21/1, 21/N am stärksten bzw. in den in axialer Richtung A mittig im Statorzahn 100 liegenden Blechlagen 21m am schwächsten. In den FIG 4, 5 sind rein exemplarisch $M=3$ derartige „mittige“ Blechlagen 21m gekennzeichnet. Es sei erwähnt, dass je nachdem, ob die Gesamtzahl N der Blechlagen 21 gerade oder ungerade ist, ist auch die Anzahl M der „mittigen“ Blechlagen 21m gerade oder ungerade. Bspw. für den Fall, dass die Gesamtzahl N der Blechlagen 21 anders als in

den FIG 2, 5, 6 geradzahlig mit $N > 2$ ist, würde auch die Anzahl M der „mittigen“ Blechlagen 21m geradzahlig sein mit $M \geq 2$.

- 5 Aufgrund des in Richtung der Zahnmitte bzw. der dort angeordneten mittigen Blechlagen 21m signifikant abnehmenden Einflusses des Streufeldes S ist es nicht notwendig, in allen Blechlagen 21 Schlitz 105 vorzusehen. Insbesondere ist es nicht notwendig, in den in axialer Richtung A in der Mitte
10 des Statorzahns 100 liegenden Blechlagen 21m Schlitz vorzusehen. Die FIG 6 zeigt ebenfalls exemplarisch den in FIG 4 mit „VI“ markierten Schnitt in der R-A-Ebene und damit den Blick in der Umfangsrichtung U am Ort eines der Schlitz 105. Wie in FIG 6 deutlich wird, sind in dieser Ausführung -wie
15 schon in FIG 5- die axial äußeren Blechlagen 21/1, 21/N geschlitzt ausgeführt. Zusätzlich sind in FIG 6 auch die jeweils in axialer Richtung A von außen, d.h. von den Stirnbereichen ST1, ST2 aus gesehen zweiten und dritten Blechlagen 21d bzw. 21e geschlitzt ausgeführt. In der FIG 6 sind wieder
20 rum exemplarisch und der Übersichtlichkeit wegen ausgehend von der jeweiligen Stirnseite ST1, ST2 nur die jeweils drei ersten Blechlagen 21/1, 21d bzw. 21/N, 21e geschlitzt ausgeführt.
- 25 Allgemein lässt sich das so ausdrücken, dass von den axialen Stirnbereichen ST1, ST2 aus gesehen zumindest die jeweils erste Blechlage 21/1, 21/N, möglicherweise aber auch weitere Blechlagen 21d, 21e mit Schlitz 105 versehen sind, wobei dies vorzugsweise derart ausgeführt wird, dass sich in der
30 tangentialen Blickrichtung U ein symmetrisches Bild ergibt. D.h. es wird in axialer Richtung A gesehen auf beiden Seiten der mittigen Blechlagen 21m jeweils die gleiche Anzahl $K/2$ von geschlitzten Blechlagen 21/1 und ggf. 21d bzw. 21/N und ggf. 21e vorgesehen. Da entweder N und M geradzahlig oder
35 aber N und M ungeradzahlig gewählt sind, kann dies über $K/2 = (N - M) / 2$ ausgedrückt werden. Im Extremfall können sämtliche Blechlagen 21, d.h. die Blechlagen 21/1, 21/N, 21d, 21e, 21m, mit Schlitz 105 versehen sein.

In der Praxis kann bei der Festlegung der Gesamtzahl K der mit Schlitzten 105 versehenen Blechlagen 21 bspw. die Breite ls des Luftspalts 13 zwischen Stator 20 und Rotor 10 herangezogen werden. Dabei kann für die Anzahl K/2 der geschlitzten Bleche 21 pro Seite ST1, ST2 bspw. gelten

$K/2 = \text{Luftspaltbreite} / \text{Blechdicke} = l_s / (a/N)$. Mit den oben genannten Parametern $a/N=0,23\text{mm}$ und einem Luftspalt von bspw. $l_s=2\text{mm}$ ergibt sich also eine Anzahl $K/2=9$ geschlitzte Blechlagen auf jeder Seite ST1, ST2.

Die Schlitzte 105 können bspw. bei der Fertigung der Blechlagen 21 per Laser-Schneiden eingebracht werden. Da diese Bearbeitung negative Auswirkungen auf die magnetischen Eigenschaften im Randbereich der jeweiligen Schnittkanten haben kann, bietet es sich an, die Bleche 21 vor der Weiterverarbeitung auszuglühen. Die Schlitzbreite d1 könnte bspw. auf $d=0,1\text{mm}$ gelasert werden. Dabei sollte thermischer Stress weitestgehend vermieden werden, um die magnetischen Eigenschaften des Blechs 21 erhalten zu können. Die Abstände d2 zwischen zwei benachbarten Schlitzten könnte bei einer Zahnbreite von bspw. $a=10\text{mm}$ bei $d_2=0,5-1,0\text{mm}$ liegen.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass der in FIG 4 mit „II“ bezeichnete, aber nicht an den Ort eines der Schlitzte 105 gelegte Schnitt in der bereits erwähnten FIG 2 dargestellt ist und natürlich der tangentialen Sicht auf einen Statorzahn 100 entspricht, der keine Schlitzte aufweist.

Die vorgestellte Lösung lässt sich auf alle Maschinen und Aktuatoren übertragen, in denen magnetischer Fluss in geblechten Eisen geführt wird und ein Stirnbereich ST1, ST2 vorhanden ist. Eine signifikante Reduktion der Stirnverluste um mehr als die Hälfte erscheint durch erste Auslegungsrechnungen möglich.

Die FIG 7 zeigt ein Luftfahrzeug 1000 mit einem elektrischen Antrieb 1100, wobei der Begriff „elektrischer Antrieb“ auch

einen hybrid-elektrischen Antrieb umfasst. Der Antrieb 1100 weist eine elektrische Maschine 1' auf, die wie die oben beschriebenen Maschine 1 ausgebildet ist und insbesondere die geschlitzten Statorzähne 100 aufweist (in FIG 7 nicht dargestellt).

Die elektrische Maschine 1' wird hier als Elektromotor 1' betrieben und weist eine mit dem Rotor 10 drehfest verbundene Welle 30 auf. Die Welle 30 ist ihrerseits mit einem Propeller 1110 des Antriebs 1100 verbunden, so dass der Motor 1 im Betriebszustand den Propeller 1110 in bekannter Weise antreibt und so für Vortrieb für das Luftfahrzeug 1000 sorgt. Die elektrische Energie zum Betreiben des Elektromotors 1' wird bspw. aus einem elektrischen Energiespeicher 1120 zur Verfügung gestellt und/oder wie im Folgenden beschrieben aus einem Generator 1''.

In einer weiter gehenden Ausführung weist der Antrieb 1100 eine weitere elektrische Maschine 1'' auf, welche als Generator betrieben wird. Dieser Generator 1'' ist ebenfalls wie die oben beschriebenen Maschine 1 ausgebildet und weist insbesondere die geschlitzten Statorzähne 100 auf (in FIG 7 nicht dargestellt). Der Generator 1'' ist derart ausgebildet und in das Antriebssystem 1100 integriert, dass er elektrische Energie bspw. für den elektrischen Energiespeicher 1120 und/oder für den Elektromotor 1' liefert.

Es sei abschließend angemerkt, dass hier eine Ausführungsform der Stators 20 beschrieben wurde, bei der der Stator 20 im Wesentlichen aus den Statorzähnen 100 besteht. Dies ist lediglich exemplarisch gemeint. Es sind auch Statoren bekannt, die bspw. einen Statorring aufweisen, an dem die Statorzähne befestigt sind. Im Falle eines geblechten Stators sind dann nicht nur die Statorzähne sondern typischerweise auch der Ring geblecht ausgeführt.

Patentansprüche

1. Statorzahn (100) für einen Stator (20) einer elektrischen Maschine (1, 1', 1''), wobei der Statorzahn (100) einen Zahnkopf (101), einen Zahnfuß (102) sowie einen in einer ersten Richtung R zwischen dem Zahnkopf (101) und dem Zahnfuß (102) gelegenen Zahnhals (103) aufweist, wobei im Zahnkopf (101) Schlitz (105) vorgesehen sind, welche sich vom Zahnkopf (101) aus in einer Richtung zum Zahnfuß (102) hin erstrecken und welche derart angeordnet und orientiert sind, dass von einem im Betrieb der elektrischen Maschine (1, 1', 1'') im Bereich des Statorzahns (100) wirkenden magnetischen Streufeld S bewirkbare Wirbelstromkomponenten W zumindest reduziert werden.
2. Statorzahn (100) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass sich die Schlitz (105) von einer vom Zahnfuß (102) abgewandten Oberfläche (01) des Zahnkopfes (101) im Wesentlichen in der ersten Richtung R zum Zahnfuß (102) hin erstrecken.
3. Statorzahn (100) nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass sich die Schlitz (105) bis in den Zahnhals (103) hinein erstrecken.
4. Statorzahn (100) nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass jeweils in der ersten Richtung R gesehen der Statorzahn (100) eine Nuttiefe n und die Schlitz (105) eine Schlitztiefe r aufweisen, wobei für das Verhältnis aus der Schlitztiefe r zur Nuttiefe n gilt: $1/3 < r/n < 1/2$.
5. Statorzahn (100) nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Schlitz (105) derart orientiert sind, dass sie sich im in die elektrische Maschine (1, 1', 1'') eingebauten Zustand parallel zu den im Bereich der Schlitz (105) verlaufenden Feldlinien eines im Betrieb der elektrischen Maschine (1, 1', 1'') auftretenden magnetischen Hauptflusses H erstrecken.

6. Statorzahn (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 5, wobei der Statorzahn (100) aus einer Vielzahl N von in einer zweiten Richtung A, welche insbesondere im Wesentlichen senkrecht zur ersten Richtung R steht, aufeinander gestapelten, separaten Blechlagen (21) aufgebaut ist, wobei

- die Vielzahl N von Blechlagen (21) auf eine erste Gruppe G1 mit N1 Blechlagen (21/1, 21d), eine zweite Gruppe G2 mit N2 Blechlagen (21/N, 21e) und eine dritte Gruppe G3 mit N3 Blechlagen (21m) mit $N1+N2+N3=N$ verteilt ist, wobei des Weiteren gilt $N1 \geq 1$, $N2 \geq 1$ und $N3 \geq 0$,
- die drei Gruppen G1, G2, G3 derart aufeinander gestapelt sind, dass die dritte Gruppe G3 in der zweiten Richtung A gesehen zwischen der ersten Gruppe G1 und der zweiten Gruppe G2 angeordnet ist,
- die erste G1 Gruppe und die zweite Gruppe G2 vorzugsweise gleich viele Blechlagen aufweisen mit $N1=N2$ und
- jede Blechlage (21/1, 21/d) der ersten Gruppe G1 sowie jede Blechlage (21/N, 21e) der zweiten Gruppe G2 jeweils zumindest einen der Schlitze (105) aufweist.

7. Statorzahn (100) nach Anspruch 6, wobei die erste Gruppe G1 und die zweite Gruppe G2 jeweils zumindest eine einzelne der Blechlagen (21/1, 21/N) aufweisen mit $N1=N2=1$, vorzugsweise aber jeweils mehrere Blechlagen (21/1, 21d, 21/N, 21e) umfassen mit $N1>1$ und $N2>1$.

8. Statorzahn (100) nach einem der Ansprüche 6 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass jede Blechlage (21/1, 21d) der ersten Gruppe G1 sowie jede Blechlage (21/N, 21e) der zweiten Gruppe G2 jeweils mehrere Schlitze (105) aufweist, wobei die Schlitze (105) einer jeweiligen Blechlage (21/1, 21d, 21/N, 21e) in einer dritten Richtung U, die auf der ersten Richtung R sowie auf der zweiten Richtung A jeweils im Wesentlichen senkrecht steht, hintereinander angeordnet sind.

9. Statorzahn (100) nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Blechlagen (21/1, 21d, 21/N, 21e) der ersten G1 und

der zweiten Gruppe G2 derart geformt und die Schlitze (105) dort jeweils derart positioniert und angeordnet sind, dass die Blechlagen (21/1, 21d, 21/N, 21e) einer jeweiligen Gruppe G1, G2 in der zweiten Richtung A gesehen deckungsgleich sind.

5

10. Elektrische Maschine (1, 1', 1''), aufweisend einen im Wesentlichen kreis- oder ringförmigen Rotor (10) und einen im Wesentlichen kreis- oder ringförmigen Stator (20), wobei der Stator (20) eine Vielzahl von Statorzähnen (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche aufweist, welche in einer Umfangsrichtung U des Stators (20) gesehen derart hintereinander angeordnet sind, dass

10

- der jeweilige Zahnfuß (102) an einem Ring des Stators (20) anliegt oder in den Ring integriert ist oder den Ring bildet,

15

- der jeweilige Zahnkopf (101) dem Rotor (10) zugewandt ist,
- die erste Richtung R einer radialen Richtung der elektrischen Maschine (1, 1', 1'') entspricht,
- die zweite Richtung A einer axialen Richtung der elektrischen Maschine (1, 1', 1'') entspricht,
- die dritte Richtung U der Umfangsrichtung U entspricht.

20

11. Elektrische Maschine (1, 1', 1'') nach Anspruch 10, wobei jeder Statorzahn (100) eine auf den jeweiligen Zahnhals gewickelte Statorwicklung (200) aufweist, welche, sobald sie von elektrischem Strom durchflossen wird, einen magnetischen Hauptfluss H durch den Statorzahn (100) bewirkt, dadurch gekennzeichnet, dass die Schlitze des Statorzahns (100) derart orientiert sind, dass sie parallel zu den Feldlinien des magnetischen Hauptflusses H verlaufen.

25

30

12. Elektrische Maschine (1, 1', 1'') nach einem der Ansprüche 10 bis 11 und nach Anspruch 6, wobei

- zwischen dem Rotor (10) und dem Stator (20) ein Luftspalt (13) mit einer radialen Erstreckung ls ausgebildet ist und
- die Blechlagen (21) jeweils eine Dicke bd in der axialen Richtung A aufweisen,

35

dadurch gekennzeichnet, dass für die Anzahlen N_1 , N_2 von mit Schlitz (105) versehenen Blechlagen (21/1, 21d, 21/N, 21e) der ersten G1 und der zweiten Gruppe G2 im Wesentlichen gilt $N_1=N_2=K/2=ls/bd$.

5

13. Luftfahrzeug (1000) mit einem elektrischen oder hybrid-elektrischen Antrieb (1100) umfassend eine oder mehrere elektrische Maschinen (1, 1', 1'') nach einem der Ansprüche 10 bis 12.

10

14. Luftfahrzeug nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest eine der elektrischen Maschinen (1, 1', 1'') als Elektromotor (1') zum Antreiben eines Propellers (1110) des Luftfahrzeugs (1000) ausgebildet ist.

15

15. Luftfahrzeug nach einem der Ansprüche 13 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest eine der elektrischen Maschinen (1, 1', 1'') als Generator (1'') zum Bereitstellen von elektrischer Energie ausgebildet ist.

20

FIG 2

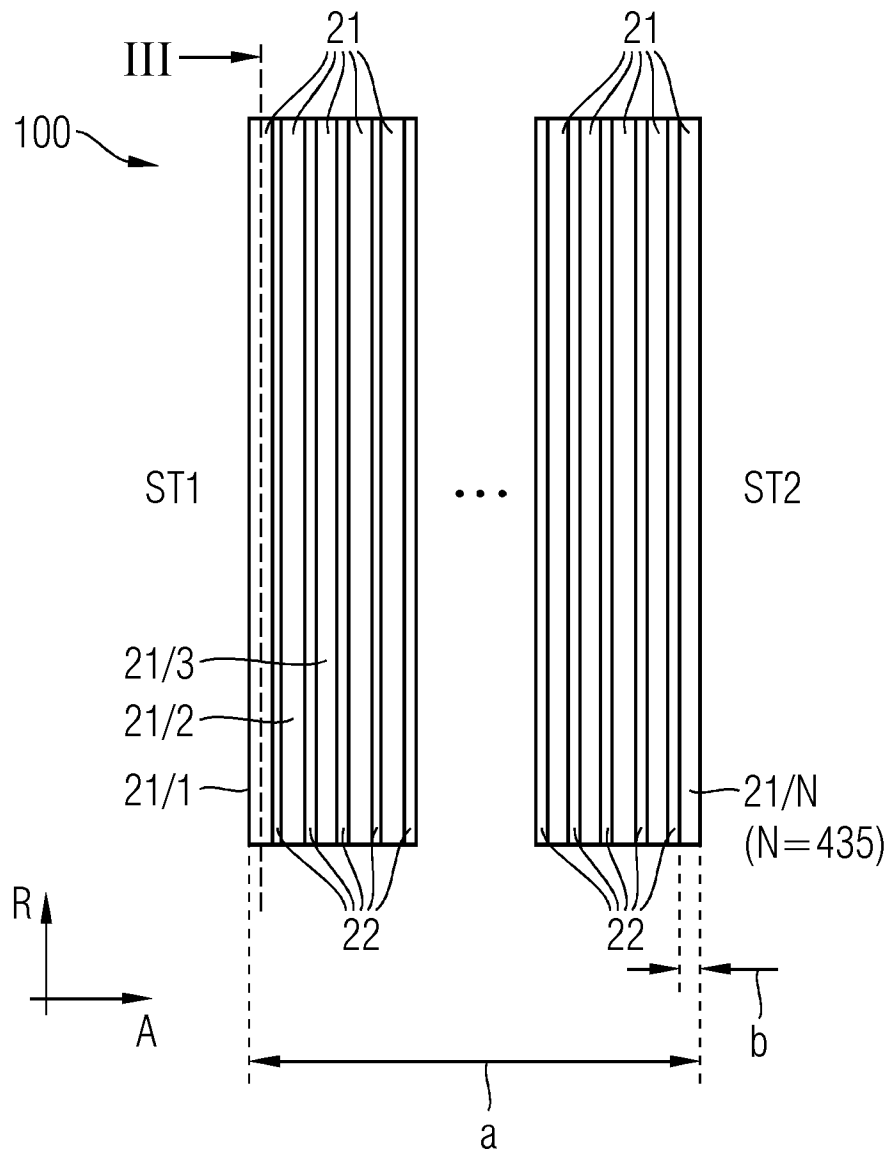


FIG 3

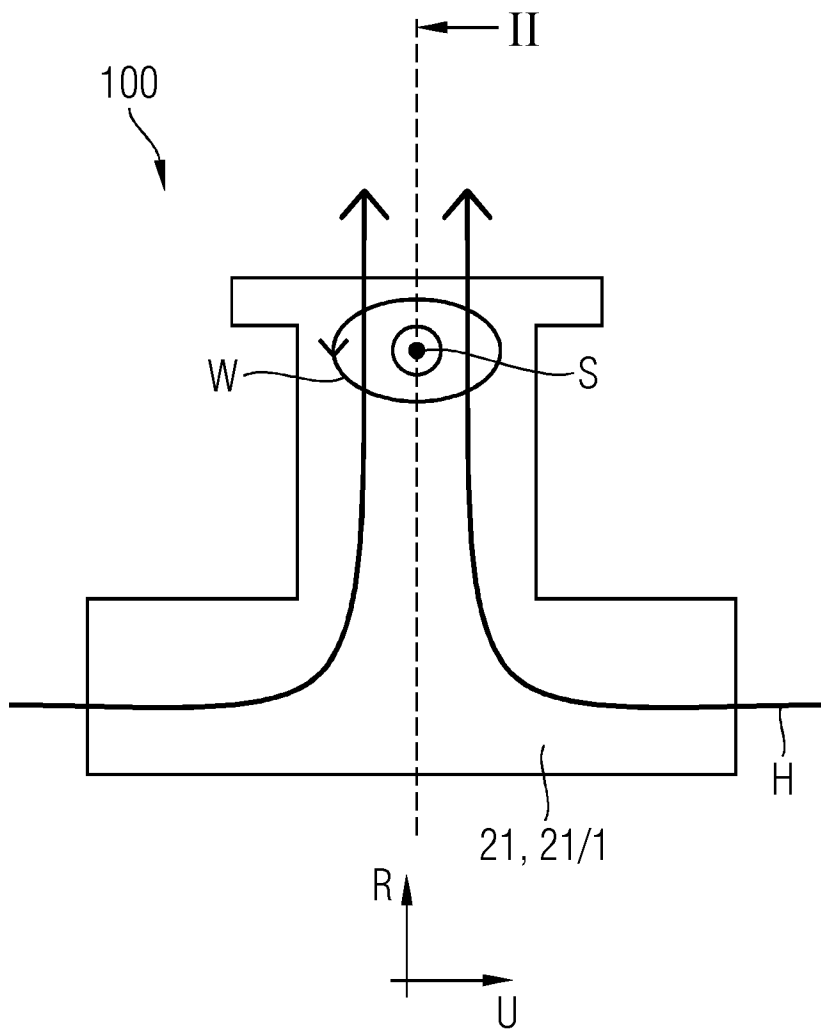


FIG 4

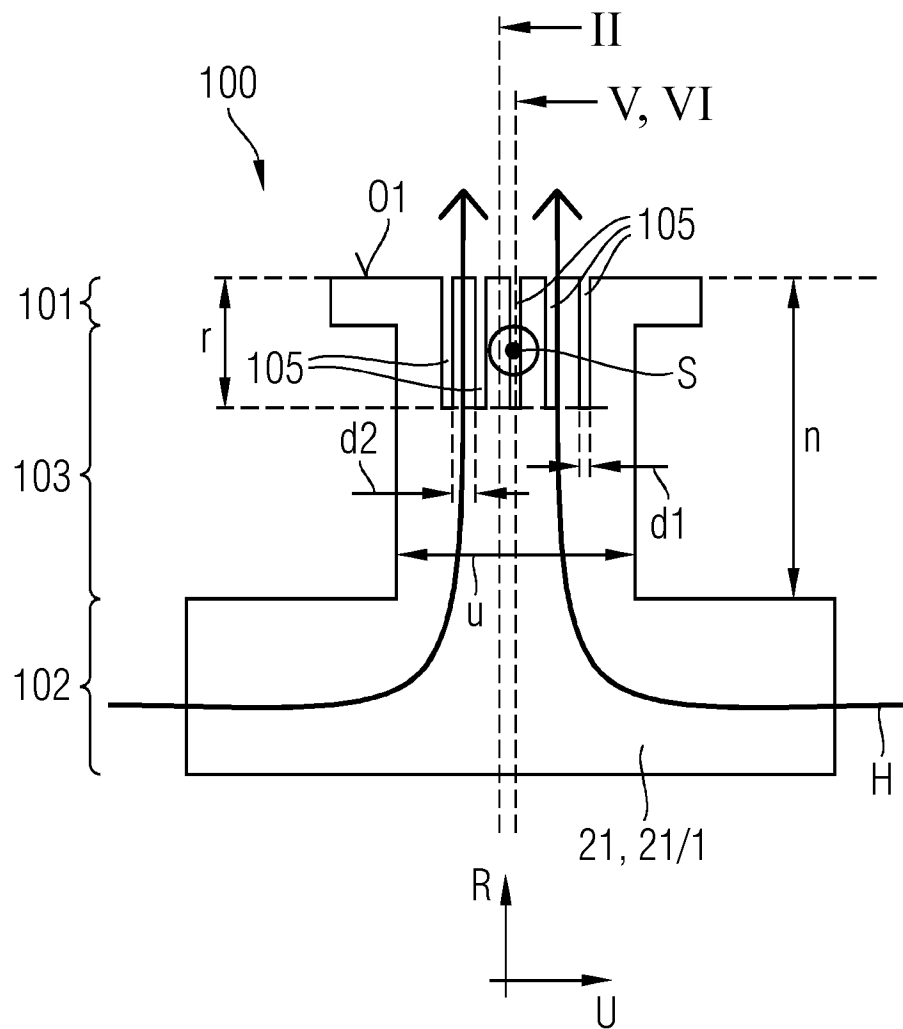


FIG 5

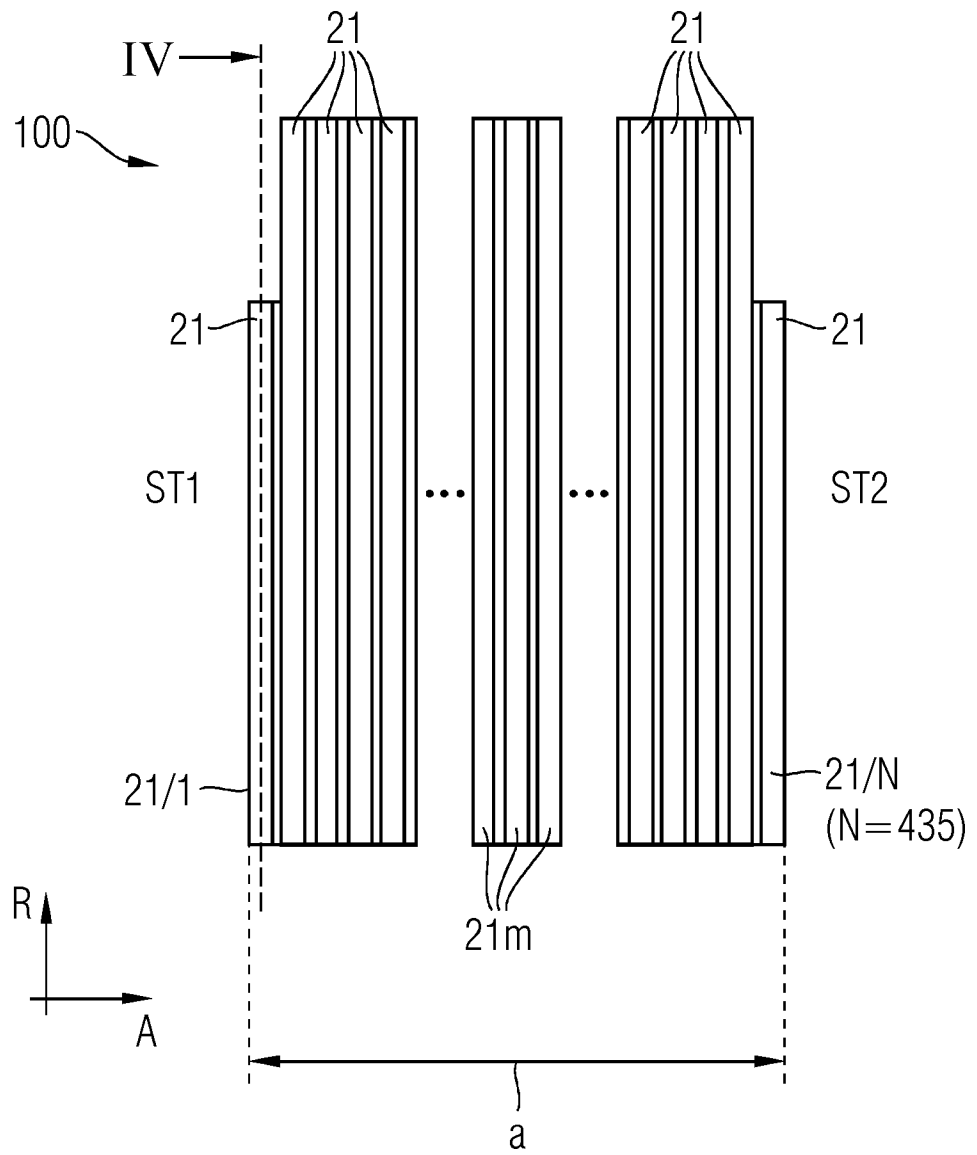


FIG 6

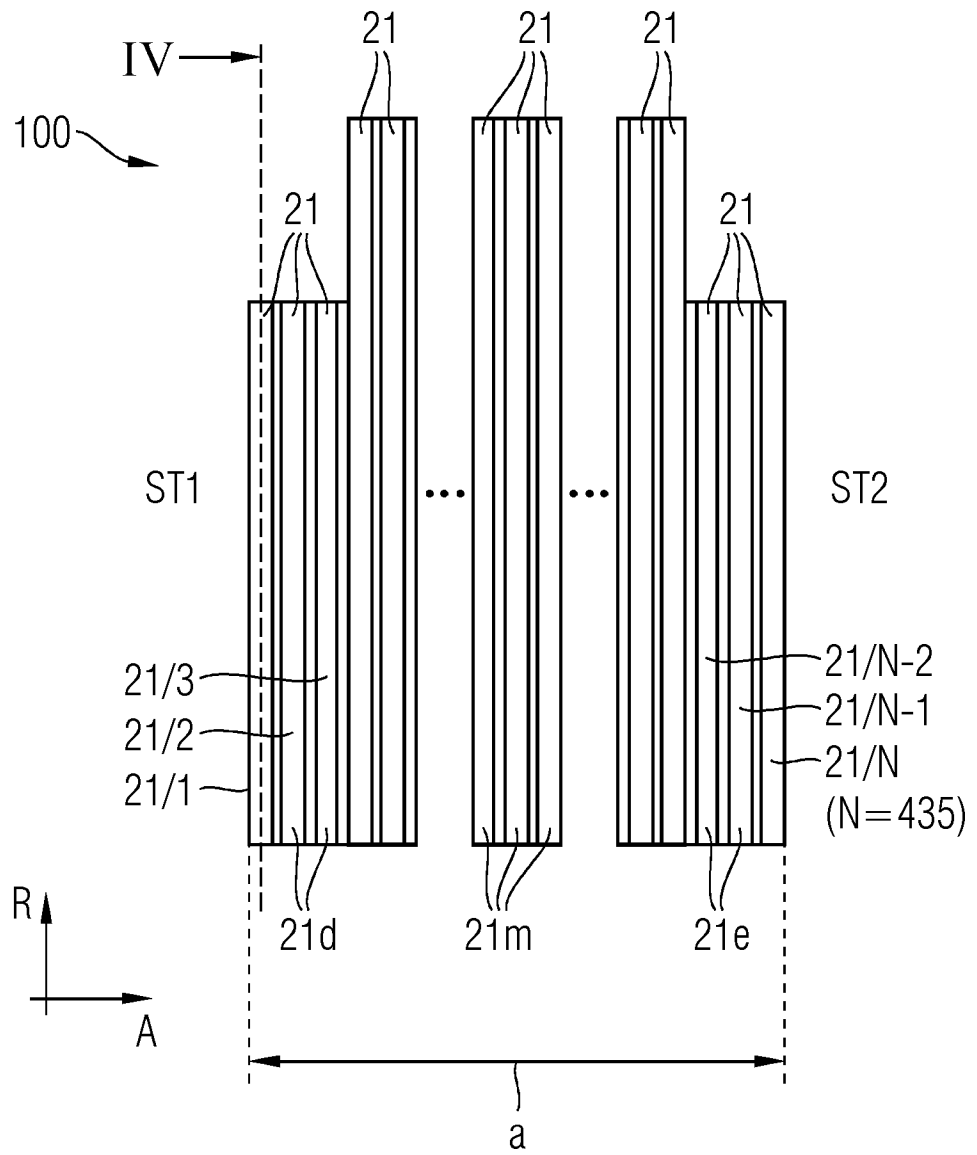
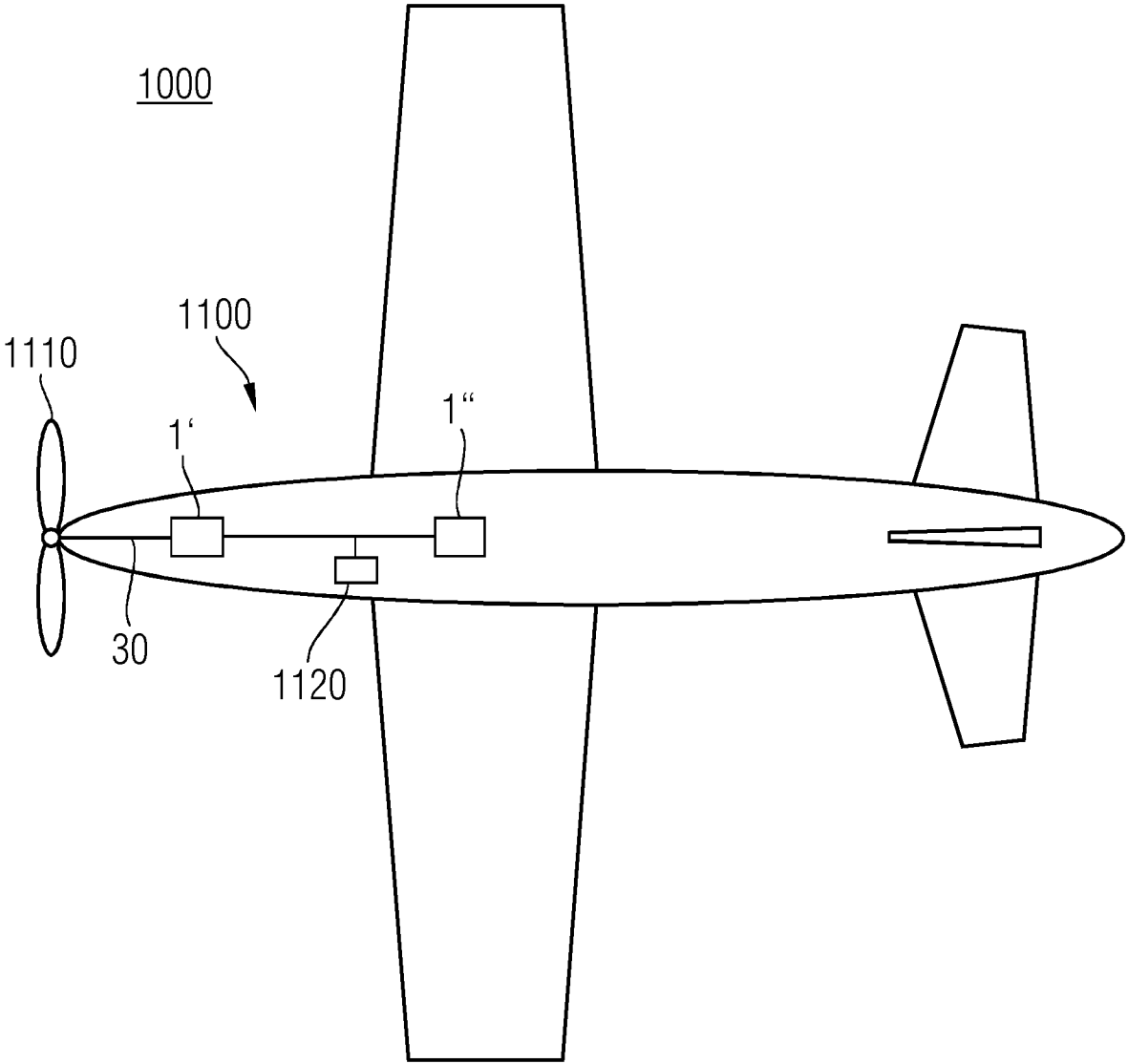


FIG 7



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2019/084048

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**H02K 1/14**(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)

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	JP 2012244645 A (DAIKIN IND LTD) 10 December 2012 (2012-12-10) abstract figures 7, 8 claims 4, 5, 8	1,2,4,5,10-15 3,6-9
Y	JP H05184088 A (NIPPON DENSO CO) 23 July 1993 (1993-07-23) figures 9, 10, 13	3
Y	JP 2011067090 A (MITSUBISHI ELECTRIC CORP) 31 March 2011 (2011-03-31) figures 6, 18	6-9
A	JP 2005045881 A (HITACHI LTD) 17 February 2005 (2005-02-17) figures 13-15	1-5,10-12



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

18 February 2020

Date of mailing of the international search report

25 February 2020

Name and mailing address of the ISA/EP

European Patent Office
p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk
Netherlands

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

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

Authorized officer

Maas, Erik

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2019/084048

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)		Publication date (day/month/year)
JP	2012244645	A	10 December 2012	JP	5874892 B2	02 March 2016
				JP	2012244645 A	10 December 2012
JP	H05184088	A	23 July 1993	NONE		
JP	2011067090	A	31 March 2011	JP	5073805 B2	14 November 2012
				JP	2011067090 A	31 March 2011
JP	2005045881	A	17 February 2005	NONE		

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. H02K1/14
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	JP 2012 244645 A (DAIKIN IND LTD) 10. Dezember 2012 (2012-12-10)	1,2,4,5, 10-15
Y	Zusammenfassung Abbildungen 7, 8 Ansprüche 4, 5, 8	3,6-9
Y	JP H05 184088 A (NIPPON DENSO CO) 23. Juli 1993 (1993-07-23) Abbildungen 9, 10, 13	3
Y	JP 2011 067090 A (MITSUBISHI ELECTRIC CORP) 31. März 2011 (2011-03-31) Abbildungen 6, 18	6-9
A	JP 2005 045881 A (HITACHI LTD) 17. Februar 2005 (2005-02-17) Abbildungen 13-15	1-5, 10-12



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

18. Februar 2020

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

25/02/2020

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

Maas, Erik

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2019/084048

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
JP 2012244645 A	10-12-2012	JP 5874892 B2 JP 2012244645 A	02-03-2016 10-12-2012
JP H05184088 A	23-07-1993	KEINE	
JP 2011067090 A	31-03-2011	JP 5073805 B2 JP 2011067090 A	14-11-2012 31-03-2011
JP 2005045881 A	17-02-2005	KEINE	