



# Modulare Axialflussmaschine für hohes Drehmoment

Alexander Kleimaier

Eingegangen: 20. Oktober 2022 / Angenommen: 22. Februar 2023 / Online publiziert: 5. April 2023  
 © Der/die Autor(en) 2023

**Zusammenfassung** Axialflussmaschinen eignen sich mit ihrer scheibenförmigen Bauweise gut dazu, eine hohe Drehmomentausbeute in Bezug auf das eingesetzte Aktivmaterial zu realisieren. Gleichzeitig erlaubt es der planare Aufbau, den Eisenkreis modular und möglichst einfach herstellbar zu gestalten. In diesem Beitrag wird eine Maschinenvariante vorgestellt, deren Eisenkreis aus U-Jochen mit UI-30-Kernblechen und Steckspulen aufgebaut ist. Solche genormten Bleche mit 30×40 mm Außenmaß und 30×10 mm Nutausschnitt werden normalerweise zum Bau von Transformatoren eingesetzt. Vorteile dieses Maschinendesigns sind einfache Herstellbarkeit und Skalierbarkeit über die Anzahl der U-Joche. Nachteile sind Wirbelstromverluste in den Magneten der Rotorscheibe, was den nutzbaren Drehzahlbereich aufgrund erhöhter Magnettemperaturen einschränkt. Da sich mit den UI-30-Kernblechen ebenso eine PMSM-Radialflussmaschine mit Außenläufer herstellen lässt, erfolgt ein direkter Vergleich der für beide Maschinenvarianten aufgebauten Prototypen anhand von Messdaten. In Bezug auf das Drehmoment ist die Radialflussmaschine im Vorteil, während die Axialflussmaschine in Bezug auf Rotorverluste, Materialbedarf und Herstellbarkeit besser abschneidet.

**Schlüsselwörter** Axialflussmaschine mit Scheibenläufer · Einfacher und modularer Aufbau · Hohes Drehmoment · Magnettemperaturen der Rotorscheibe · Vergleich mit PMSM-Außenläufermaschine

A. Kleimaier (✉)  
 Fakultät für Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen,  
 Hochschule für angewandte Wissenschaften Landshut, Am  
 Lurzenhof 1, 84036 Landshut, Deutschland  
[alexander.kleimaier@haw-landshut.de](mailto:alexander.kleimaier@haw-landshut.de)

## Modular axial flux motor for high torque

**Abstract** Axial flux motors, with their disc-shaped structure, are well suited to achieve a high torque yield in relation to the applied active material. Moreover, the planar design offers the possibility to make the iron circuit modular and easy to manufacture. In this paper, an axial flux motor variant is presented whose iron circuit is constructed by using UI-30 core laminations and plug-in coils. These standardized core laminations with external dimensions of 30×40 mm and 30×10 mm slots are normally used for transformers. The advantages of this motor design are simple manufacturability and scalability through the number of core laminations. The disadvantages are eddy current losses in the magnets of the rotor disc, which limits the usable engine speed range due to increased magnet temperatures. As it is also possible to realize a PMSM radial flux machine with an external rotor by using the same UI-30 core elements, prototypes of both motor variants were constructed for a direct comparison based on measurement data. Concerning torque, the radial flux motor performs better, whereas the axial flux motor shows advantages in terms of rotor losses, material demand, and manufacturability.

**Keywords** Axial flux motor with disc rotor · Simple and modular design · High torque · Rotor disc magnet temperature · Comparison with PMSM external rotor motor

## 1 Einführung

### 1.1 Grundgeometrie

Mit Axialflussmaschinen lassen sich hohe Drehmoment- und Leistungsdichten realisieren, weshalb dieses Thema in letzter Zeit wieder mehr in den Fo-

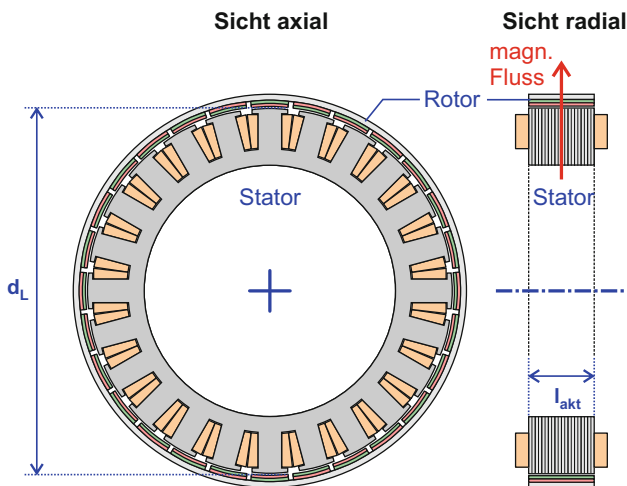


Abb. 1 Radialflussmaschine mit Außenläufer

kus gerückt ist. Die Spielregeln für Eisenkreisdesign und Drehmomentbildung sind dabei natürlich dieselben, wie wir sie von der klassischen Radialflussmaschine her kennen. Betrachten wir zunächst eine PMSM mit Einzelzahnwicklung und Außenläufer, wie sie beispielsweise als Propellerantrieb für Modellbau und Drohnen verwendet wird, aber auch als Starter-Generator oder Torquemotor, siehe Abb. 1. Im Inneren befindet sich das Statorblechpaket mit Zahnspulen, das von einer Läuferglocke mit innenliegenden Magneten umschlossen wird. Es ist jeweils ein Schnitt axial und ein Schnitt radial durch die Maschine dargestellt. Die für die Drehmomentbildung relevante Blechpaketlänge ist  $l_{akt}$ , der mittlere Luftspaltdurchmesser ist  $d_L$ .

$$M = \frac{\pi}{2} \cdot d_L^2 \cdot l_{Akt} \cdot \tau \quad (1)$$

Bei gegebenem Drehschub  $\tau$  hängt dann nach Gl. (1) das Drehmoment  $M$  quadratisch vom Luftspaltdurchmesser und linear von der Blechpaketlänge ab, wobei natürlich die Geometrie mit Außenläufer, der bei entsprechend feiner Polteilung nur einen ge-

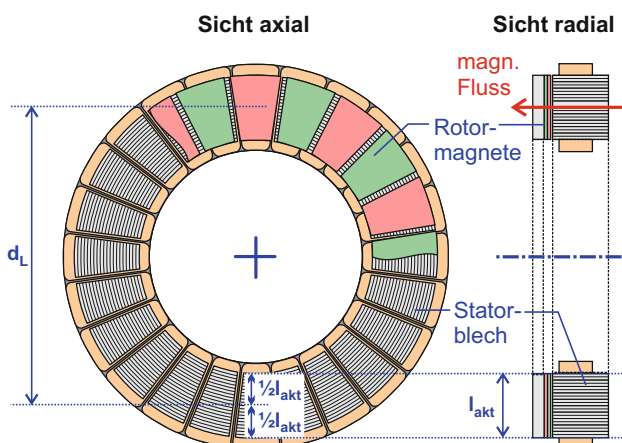


Abb. 2 Axialflussmaschine mit Scheibenläufer

ringen radialen Bauraum nach außen benötigt, sehr günstig ist.

Für den Aufbau einer Axialflussmaschine wird diese Anordnung um  $90^\circ$  nach innen gedreht, so dass der magnetische Fluss nicht mehr in radialer, sondern in axialer Richtung durch den Luftspalt läuft, siehe jeweils die roten Pfeile in Abb. 1 und 2. In Abb. 2 sind bei der axialen Sicht die Magnete der Rotorplatte (rot/grün) für ein Rotorsegment so eingezeichnet, wie sie über das Statorblechpaket laufen würden. Letztlich gilt genauso auch für die Axialflussmaschine die Beziehung aus Gl. (1), wobei für  $d_L$  der mittlere Luftspaltdurchmesser anzusetzen ist, der bei identischen Außenabmaßen etwas tiefer im Bauraum liegt, so dass sich bei gleichem Drehschub  $\tau$  ein geringeres Drehmoment ergäbe. Andererseits sind die Verhältnisse immer noch günstiger als bei den meisten klassischen Innenläufermaschinen, wo der außen liegende Stator einen erheblichen Teil des radialen Bauraumes einnimmt.

Die Geometrie von Axialflussmaschinen bedingt, dass der auf den Umfang bezogene Strombelag und somit auch der Drehschub innerhalb des aktiven Bereichs (Blechpaket) nach außen hin abnimmt, während die Umfangskräfte konstant bleiben. Die in diesem Beitrag angegebenen Drehschubwerte sind lediglich als Mittelwerte zu verstehen und gemäß Gl. (1) aus dem Drehmoment abgeleitet, sie dienen nur zum Vergleich mit der ebenso betrachteten Radialflussmaschine. De facto würden diese Werte nur in der Mitte des aktiven Bereichs auftreten, wobei ein bezüglich des Blechpaketes mittlerer Luftspaltdurchmesser  $d_L$  gewählt wird, siehe Abb. 2.

Für die Axialflussmaschine ergibt sich beim Nutquerschnitt ein Vorteil, da dieser sich nicht trapezförmig nach innen verjüngt, sondern einfach in axialer Richtung erweitert werden kann – das ist in Abb. 3 durch die roten gestrichelten Linien angedeutet. Man kann also gegenüber der Radialfluss-Außenläufermaschine mehr Statordurchflutung respektive Strombelag unterbringen und damit den Drehschub vergrößern.

## 1.2 Aufbauvarianten

Anstelle der einseitigen Anordnung Stator–Rotor, die wegen hoher axialer Lagerkräfte ungünstig ist, hat sich heute vor allem die symmetrische Anordnung Rotor–Stator–Rotor („Innenstator“) etabliert, während die Konfiguration Stator–Rotor–Stator („Innenrotor“)

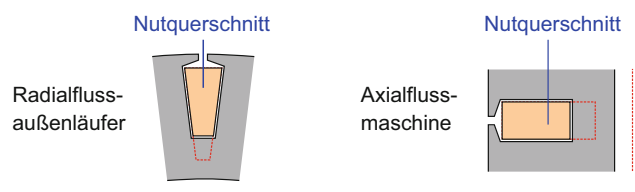


Abb. 3 Erweiterbarkeit des Nutquerschnitts

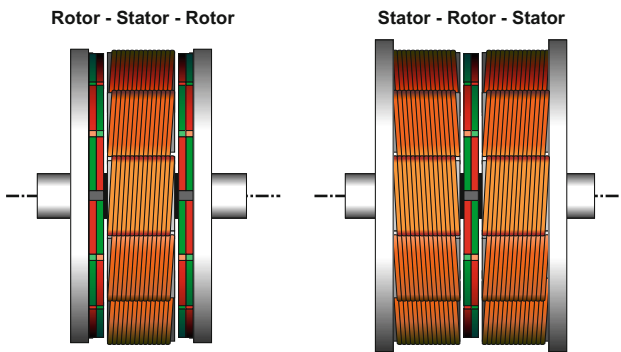


Abb. 4 Stator- Rotoranordnungen für Axialflussmaschinen

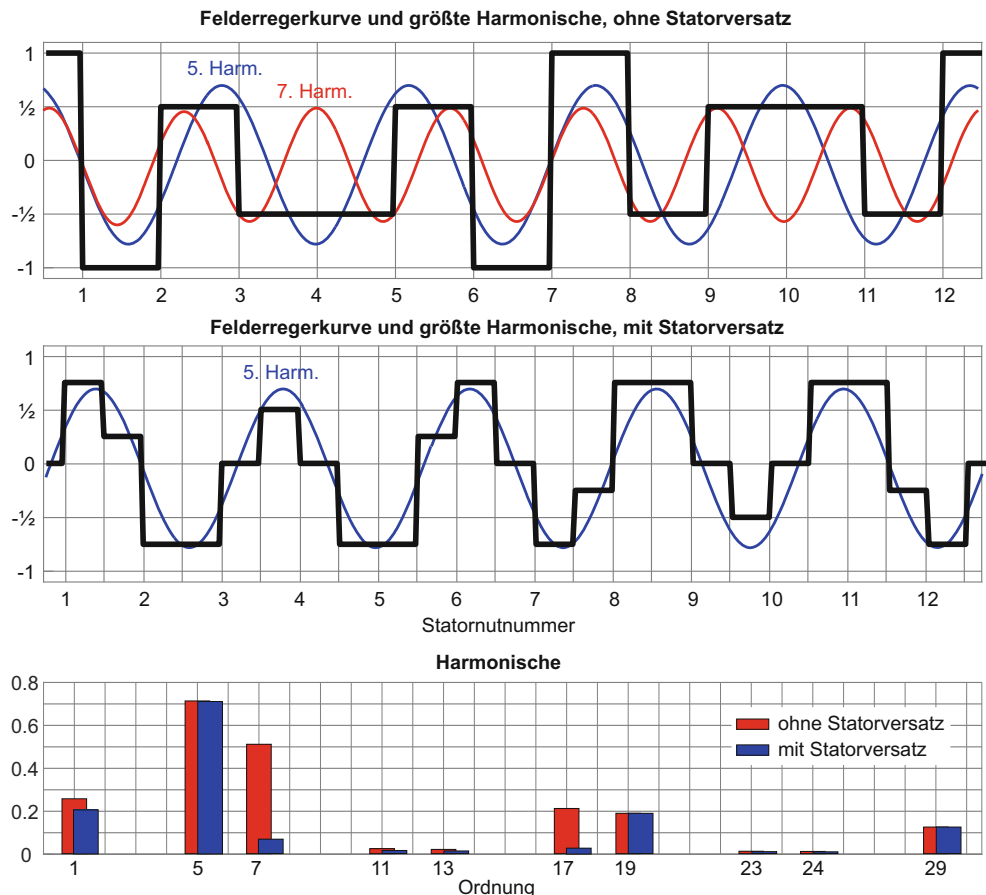
seltener angewandt wird. In Abb. 4 sind die Statorn jeweils durch eine Zahnspulnwicklung, die Rotoren jeweils durch Magnete dargestellt. Der Eisenrückschluss in den Stator- bzw. Rotorjochen ist jeweils als graue Scheibe gezeichnet. – Darüber hinaus gibt es Anordnungen mit einem Stack aus mehreren Rotor- und Statorscheiben, was hier jedoch nicht betrachtet werden soll.

Die Innenstatorvariante in YASA-Bauart (Yokeless And Segmented Armature [9]) ist bei industriellen Anbietern am weitesten verbreitet. Hier ergibt sich der Vorteil, dass sich ein Eisenrückschluss nur noch in den beiden synchron mit der Grundwelle umlaufenden Rotoren befindet („Yokeless“), was entsprechen-

de Eisenverluste deutlich mindert. Andererseits muss der Stator prinzipbedingt aus einzelnen Zahnspulenelementen zusammengesetzt werden („Segmented“), die zwar leicht bewickelbar, aber konstruktiv aufwändig zu fixieren und zu entwärmen sind. Zudem erzeugen natürlich die zur Drehmomentbildung nicht genutzten Harmonischen wiederum Eisenverluste, sobald der Stator bestromt wird.

Demgegenüber befindet sich bei der Innenrotorvariante der Eisenrückschluss (nachteilhaft) im Stator, und die Baulänge ist wie in Abb. 4 angedeutet ggf. größer als bei der Innenstatorvariante. Der Rotor kann jedoch als eisenlose Scheibe ausgeführt werden, z. B. aus GFK, die nur die Magneten fixiert und natürlich ein sehr geringes Trägheitsmoment besitzt. Bei mittlerer Positionierung wirken auch keine axialen Kräfte auf die Rotorscheibe. Der Stator ist konstruktiv einfach zu realisieren und zu kühlen. Diese Anordnung hat aber noch einen anderen Vorteil: für das Statorblechpaket gibt es keine Restriktionen, es kann sowohl eine (konzentrierte) Einzelzahnwicklung als auch eine (verteilte) Drehfeldwicklung eingesetzt werden (siehe z. B. [7]), wobei zusätzlich die Statorscheiben zur Elimination unerwünschter Harmonischer des Statorfeldes gegeneinander verdreht werden können. Beides ist dann von Vorteil, wenn sich bei höheren Drehzahlen aufgrund von Wirbelströmen zu hohe Temperaturen in den Rotormagneten einstellen würden. Diese

Abb. 5 Harmonische der Einzelzahnwicklung



sind nur schwer zu entwärmen, entweder durch Konvektion im Luftspalt oder konduktive Entwärmung zu Rotorwelle hin [3].

### 1.3 Elimination von Oberwellen

Die Möglichkeit bei der Innenläufertopologie, die Statorn gegeneinander zu verdrehen, kann auch bei der Einzelzahnwicklung genutzt werden, um unerwünschte Harmonische gezielt zu eliminieren: In [8] wird eine Axialflussmaschine mit  $Q = 9$  Nuten und  $2p = 10$  Polen betrachtet, wobei durch einen Versatz der Statorn die gegenläufige, nicht genutzte 4. Harmonische weitgehend eliminiert werden kann. Das lässt sich auch auf häufig genutzte Konfigurationen, die auf einer Grundmaschine mit  $Q = 12$  Nuten und  $2p = 10$  bzw. 14 Polen basieren, übertragen. In Abb. 5 ist oben die entsprechende Felderreggerkurve (vgl. z.B. [4]) mit ihren beiden am stärksten ausgeprägten Harmonischen zu sehen. Bei Drehmomentbildung mit der 5. Harmonischen würde die gegenläufige 7. zusätzliche Verluste im Statoreisen und in den Rotormagneten erzeugen (und die Flussverkettung erhöhen). Verdreht man nun bei der Innenläufer-Axialflussmaschine die beiden Statorn um  $2\frac{1}{2}$  Nutteilungen gegeneinander, so kann man die 7. Harmonische deutlich reduzieren –siehe mittleres Diagramm und Oberwellenanalyse. Umgekehrt kann man bei zusätzlicher Verpolung der Statorn in gleicher Weise die 5. Harmonische eliminieren, während dann die 7. nutzbar bleibt.

## 2 Modulare Axialflussmaschine

### 2.1 Aufbau

Für die in diesem Beitrag vorgestellte Maschine was es das Ziel, einen Aufbau zu finden, der einerseits modular und mit Standardblechelementen realisiert werden kann, der andererseits aber auch eine hohe Drehmomentausbeute liefert. Wegen der Freiheitsgrade bei der Gestaltung der Statorwicklung wurde auf die Innenläufertopologie zurückgegriffen. Die Geometrie einer Wicklung mit einzeln bewickelten Zähnen wurde so umgeformt, dass U-Joche aus UI-30 Kernblechen mit Steckspulen verwendbar sind [5], siehe Abb. 6 unten und Abb. 7. Diese genormten Kernbleche mit  $30 \times 40$  mm Außenmaß und  $30 \times 10$  mm Nutausschnitt werden normalerweise zum Bau von Transformatoren eingesetzt, als Alternative zu EI-Kernblechen. Aufgrund des planaren Aufbaus einer Axialflussmaschine können diese kreisförmig auf einer Trägerplatte angeordnet werden; für die Darstellung in Abb. 6 und eine 2D-FEM Rechnung kann die Anordnung als Linearmotor betrachtet werden. Im Prinzip zerfällt der Eisenkreis dabei in Einphasenmaschinen, die durch die jeweils gegenüberliegenden U-Joche eines Stranges gebildet werden. Die Felderreggerkurve entspricht jedoch nach wie vor der einer Einzelzahnwicklung,

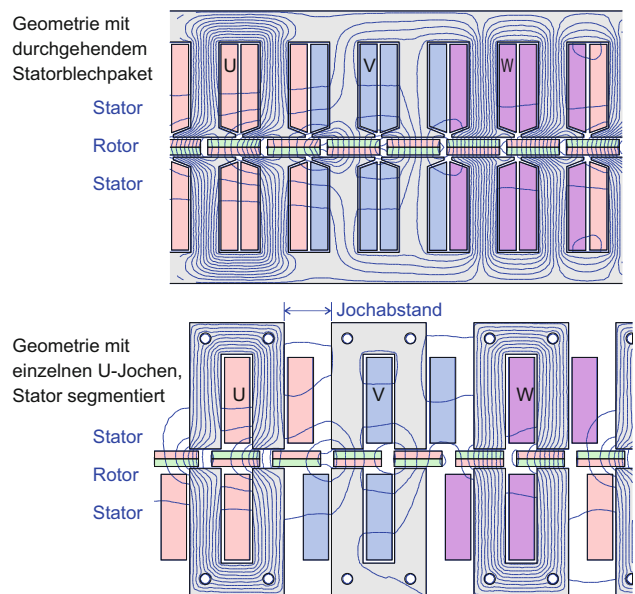


Abb. 6 Eisenkreis der modularen Axialflussmaschine

wie sie in Abb. 5 oben dargestellt ist. Eine Grundmaschine besteht dann aus 6 U-Jochen mit 12 Zähnen, für die Drehmomentbildung ist in diesem Falle die 7. Harmonische am günstigsten, so dass sich  $2p = 14$  Pole ergeben. Diese „Umformung“ wirkt sich nicht negativ auf das Drehmoment aus: Eine FEM-Simulation zeigt, dass beide Geometrievarianten in Abb. 6 nahezu den gleichen Drehschub erzeugen können, trotz der unregelmäßigen Zahnabstände der Joche. Diese ergeben sich dadurch, dass sich die Jochabstände (siehe Abb. 6) nach außen aufweiten, wenn die Joche planar im Kreis angeordnet werden. Das Drehmoment kann recht gut mit einer 2D-Simulation analysiert werden, wobei für Innen-, Mitten- und Außenkreis mit jeweils angepassten Jochabständen gerechnet wird. Für die in

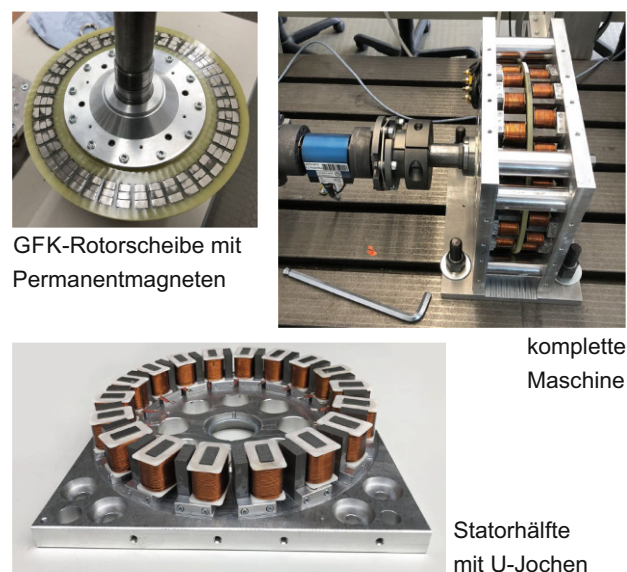


Abb. 7 Aufbau der modularen Axialflussmaschine

Abb. 7 gezeigte Variante wurden auf der Statorgrundplatte jeweils 18 Joch = 3 Grundmaschinen angeordnet, womit sich ein Rotor mit 42 Magneten bzw. Polpaarzahl 21 ergibt.

Je nach Lastenheftanforderung kann die Jochzahl variiert werden; bislang wurden Maschinen mit 12, 18 und 24 Jochen aufgebaut. Mit zunehmender Jochzahl kann auch die Blechpaketlänge  $l_{\text{Akt}}$  vergrößert werden, wobei  $l_{\text{Akt}}$  im Bereich von 10..15% des mittleren Luftspaltdurchmessers  $d_L$  (siehe Abb. 2) liegen sollte. Damit ergibt sich mit Gl. (1) Folgendes:

$$M = \frac{\pi}{2} \cdot d_L^3 \cdot \alpha \cdot \tau \quad \text{mit } \alpha = 0,10 \dots 0,15 \quad (2)$$

Bei unveränderter Verwendung von z. B. UI30-Blechen wächst dann aber die Masse der Maschine nur mit etwa  $d_L^2$ , da ja die axiale Länge unverändert bleibt: die Ausbeute Drehmoment pro Masse nimmt dann mit  $d_L$  immer weiter zu. Für einen bereits mit 24 Jochen aufgebauten Prototypen wurde demgegenüber die Jochgeometrie miniaturisiert (lasergeschnittene Joch mit 16 mm anstelle 30 mm Länge [1]), was auch bei kleinerer Drehmomentanforderung die Masse reduziert.

## 2.2 Vor- und Nachteile

Der hier beschriebene Maschinenaufbau zeichnet sich letztlich durch folgende Vorteile aus:

- Einfache Herstellbarkeit durch planaren Aufbau, Verwendung von U-Kern-Standardblechen, kein Einsatz von SMC-Materialien.
- Einfache Skalierbarkeit über die Anzahl und die Blechpaketlänge der U-Joch
- hohes Drehmoment, insbesondere bei hoher Jochzahl, bei gleich bleibender axialer Länge
- die Scheibenläuferbauweise führt zu einem geringen Trägheitsmoment bei sehr guter Ausnutzung des eingesetzten Magnetmaterials
- die Maschine ist wegen  $I_K \approx I_N$  gut feldschwächbar, allerdings mit erhöhtem Scheinleistungsbedarf / erhöhter Wechselrichterbaugröße

Auf der anderen Seite wird diese Anordnung auch mit Nachteilen erkauf:

- Die offenen Nuten führen bereits im Leerlauf zu einer Feldmodulation in den Rotormagneten, was zu Wirbelströmen und bei höheren Polwechselfrequenzen zu relativ hohen Magnettemperaturen führen kann
- eine Elimination von Harmonischen wie in Abschn. 1.3 beschrieben würde zu einer Drehmomenteinbuße von ca. 20% führen und ist daher nicht anwendbar
- auch führt die Drehmomentbildung mit der 5. Harmonischen zur einer Drehmomentreduktion von ca. 10% gegenüber der 7. Harmonischen, die daher zu bevorzugen ist

Bei zusätzlicher, feiner Segmentierung der Magnete können die Magnettemperaturen allerdings deutlich abgesenkt werden, je nach Magnetgeometrie aber mit Einbußen beim Drehmoment [6]. Feldschwächung senkt ebenfalls die Magnettemperaturen. Auch hat sich gezeigt, dass die Maschine mit Luftkühlung (auch bei Kapselung mit interner Zirkulation [2]) sehr gut entwärmt werden kann, insbesondere die Magneten der Rotorscheibe. Bei den in [6] verglichenen Rotorbauformen konnte die Magnettemperatur durch feine Segmentierung im Leerlaufbetrieb bei  $1800 \text{ min}^{-1}$  von  $100^\circ\text{C}$  (pro Pol 3-fach segmentiert) auf  $50^\circ\text{C}$  (12 Rundmagnete pro Pol) abgesenkt werden; durch Lüfterbetrieb bei der 3-fach segmentierten Variante von  $100^\circ\text{C}$  auf  $76^\circ\text{C}$  (siehe auch Abb. 13). Mit der in Abb. 7 gezeigten Variante werden letztlich Eckdrehzahlen im Bereich von 1000 bis etwa  $2000 \text{ min}^{-1}$  möglich sein.

**Fazit:** Diese Maschine ist vor allem als Antrieb mit hohem Drehmoment, aber niedriger bis mittlerer Drehzahl einsetzbar, bevorzugt als getriebeloser Direktantrieb oder als Antrieb mit kleiner Getriebeübersetzung.

## 3 Radialflussmaschine

Mit den U-Jochen ist es ebenso möglich, den Statoreisenkreis einer Radialflussmaschine mit Außenläufer nachzubilden, wie sie in Abb. 1 skizziert ist. Das ermöglicht den direkten Vergleich beider Maschinenvarianten bei Einsatz von UI30-Kernblechen. Für die Radialflussmaschine wurde dabei exakt die gleiche Statorblechmenge wie bei der Axialflussvariante eingesetzt: anstelle der zwei gegenüberliegenden Joch mit Blechpaketlänge  $l_{\text{Akt}}$  entsteht nun ein einziges, durchgehendes Joch mit der Länge  $2 \cdot l_{\text{Akt}}$ , das nach außen zeigend auf einem ringförmigen Statorträger angeordnet ist, siehe Abb. 8 und 9.

Der Aufbau mit 18 Jochen und Polpaarzahl 21 ist analog zu der in Abschn. 2.1 beschreibenden Axialflussmaschine. Im Unterschied dazu wird jedoch ein Eisenrückschluss im Rotor benötigt, der geblecht ausgeführt ist – die Problematik der Feldmodulation wie in Abschn. 2.2 beschrieben besteht auch hier und erstreckt sich nun auch auf das Rotoreisen. Teile wie Statorträger und Rotorglocke waren für den Radial-

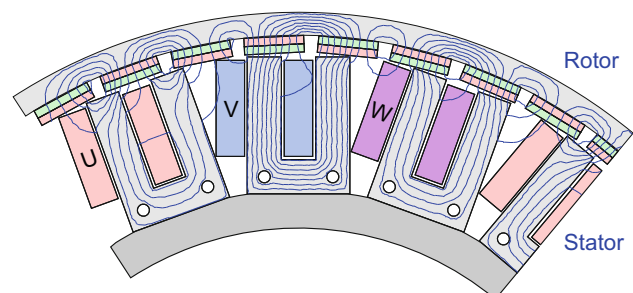


Abb. 8 Eisenkreis der Radialflussmaschine

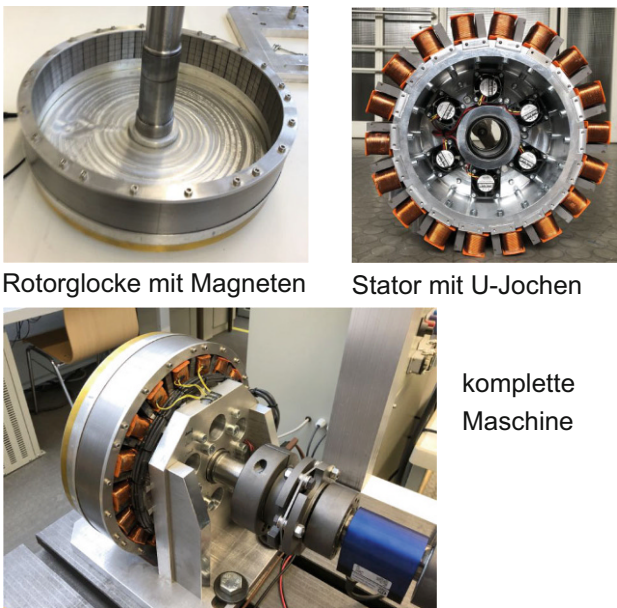


Abb. 9 Aufbau der Radialflussmaschine

flussmotor erheblich aufwändiger zu fertigen als bei der Axialflussmaschine mit ihrem planaren Aufbau.

## 4 Vergleich und Messungen

### 4.1 Geometriedaten und Masse

Die Radialflussmaschine (im Folgenden „RadMDM“) ist bedingt durch die Geometrievorgaben der UI30-Kernbleche mit einem Rotor-Außendurchmesser von 326 mm größer geraten als die Axialflussmaschine („AxMDM“), deren Grundplatten nur  $300 \times 300$  mm Abmaß haben; beide Maschinen haben ungefähr die gleiche radiale Länge, siehe Abb. 10. Damit hat die Außenläufervariante für die Drehmomentbildung einen größeren Bauraum – siehe Gl. (1) – womit die ursprünglich avisierte Vergleichbarkeit nur eingeschränkt gegeben ist. Mit Tab. 1 und 2 sind die wichtigsten mechanischen Daten aufgelistet. Die Radialflussmaschine kommt mit weniger Kupfer aus, da

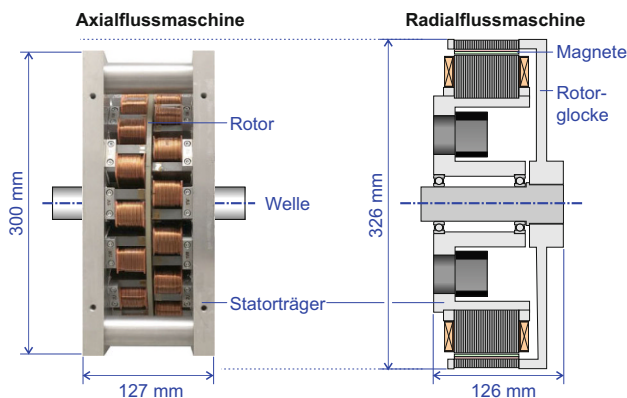


Abb. 10 Abmaße von Axial- und Radialflussmaschine

Tab. 1 Geometriedaten

Parameter	AxMDM	RadMDM
Jochzahl, Polpaarzahl	$N_J = 18, p = 21$	
Windungszahl Jochspule	$N = 186$	$N = 190$
Ø Rotorscheibe/-glocke	296 mm	326 mm
Luftspaltstärke $\delta_L$	$2 \times 0,7$ mm	0,7...1,4 mm
Magnethöhe $h_M$	6 mm	5 mm
Luftspaltdurchmesser $d_L$	249 mm	292 mm
Blechpaketlänge $l_{Akt}$	24,1 mm	48,2 mm
aktive Luftspaltfläche	$2 \times 188$ cm <sup>2</sup>	$1 \times 442$ cm <sup>2</sup>
Trägheitsmoment	0,04 kgm <sup>2</sup>	0,18 kgm <sup>2</sup>

Tab. 2 Massenbilanz

Parameter	AxMDM	RadMDM
Statorblechpaket	5,65 kg	5,65 kg
Rotorblechpaket	–	3,60 kg
Statorwicklung: Kupfer	3,67 kg	2,97 kg
Rotor: NdFeB-Magnete	0,70 kg	1,58 kg
Summe Aktivmaterial	10,02 kg	13,80 kg
Gesamtmasse	29,8 kg	32,4 kg

pro Joch jeweils nur 2 anstatt wie bei der AxMDM 4 Spulenstirnseiten pro Jochpaar benötigt werden; dafür kommt die Axialflussvariante aufgrund des doppelten Luftspaltes mit erheblich weniger Magnetmaterial aus. Die Magnethöhe  $h_M$  entspricht bei der Axialflussmaschine der Rotorscheibendicke; bei der RadMDM ist die Luftspaltstärke  $\delta_L$  aufgrund der Polygonstruktur der nach außen zeigenden Joche variabel.

Der Maschinenaufbau ist aktuell recht massiv und nicht gewichtsoptimiert, beispielsweise werden für die AxMDM jeweils 20 mm starke Grundplatten als Statorträger verwendet. Magnetmaterial ist für die AxMDM Vacodym 956TP und für die RadMDM N45 SH, wobei die Magnetpole segmentiert sind, um Wirbelströme zu reduzieren. Blechsorte ist jeweils M165-35S.

### 4.2 Drehmoment

Mit der Radialflussmaschine ergibt sich wie zu erwarten aufgrund des größeren Rotoraußendurchmessers ein höheres Drehmoment. Wegen der aktuell schlechteren Kühlung ist allerdings ihr Dauerstrom reduziert, so dass beide Maschinenvarianten ein nahezu identisches Nenn Drehmoment liefern. Am Prototyp der AxMDM sind jeweils acht 40 mm-Axiallüfter pro Statorhälfte installiert, womit Wicklung und Rotormagnete durch Luftkühlung sehr wirksam entwärmt werden können. Die am Prüfstand gemessenen Kurven Strom über Drehmoment sind in Abb. 11 dargestellt, das Verhalten Strom über Pollage in Abb. 12. Trotz der unregelmäßigen Nutabstände ergibt sich eine Kraftkurve, die bei 40 A (Nennstrom der AxMDM)

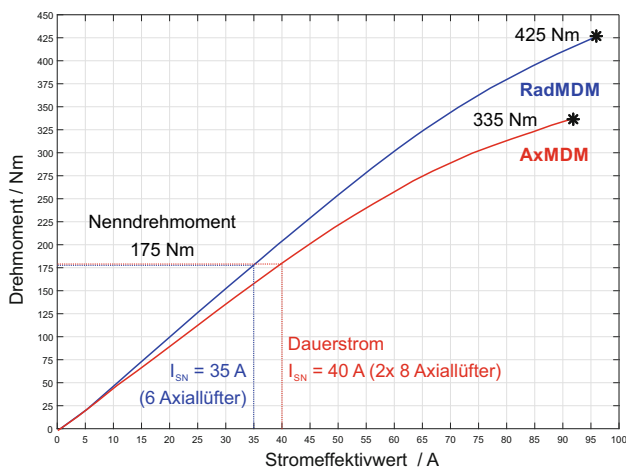


Abb. 11 Drehmoment über Strom

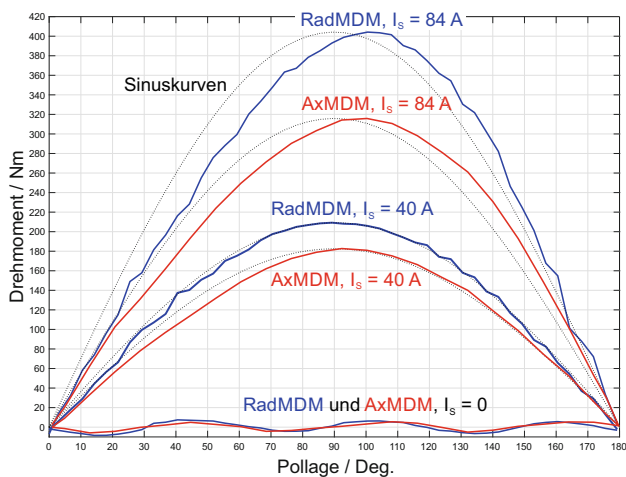


Abb. 12 Drehmoment über Pollage

noch nahezu sinusförmig ist und sich im Überlastbereich etwas in Richtung negativer d-Stellung (=180°) verschiebt. Auch die gemessene EMK ist nahezu sinusförmig. Das Rastmoment (Kurven für  $I_s = 0$ ) ist mit max. etwa 6 Nm für die AxMDM und 8 Nm für die RadMDM relativ niedrig.

Der bei  $M_{max}$  erzielbare Drehschub  $\tau_{max}$  ist in Tab. 3 für die AxMDM pro Luftspalt angegeben; in Summe ergeben sich für die Rotorscheibe immerhin  $143.100 \text{ N/m}^2$ . Für die Axialflussmaschine können hier lediglich Mittelwerte angegeben werden, die sich gemäß Abb. 2 auf den Mittenradius  $d_L$  beziehen. Der Drehschub bei der RadMDM ist trotz deutlich größeren Magnetmaterialeinsatzes sogar etwas kleiner, da sich die erzielbare Umfangskraft der 18 Joch mit wachsendem Umfang und damit größeren Jochabständen kaum ändert, die Luftspaltfläche als Bezugsfläche für  $\tau$  aber wächst.

Tab. 3 Drehmoment und Drehschub

Parameter	AxMDM	RadMDM
Drehmoment $M_N$	175 Nm	175 Nm
Drehmoment $M_{max}$	335 Nm	425 Nm
Drehschub $\tau_{max}$	$2 \times 71.600 \text{ N/m}^2$ $= 143.200 \text{ N/m}^2$ (Mittelwert)	$65.900 \text{ N/m}^2$

### 4.3 Drehmomentvergleich bei identischem Außenabmaß

Wegen der unterschiedlichen Außenabmaße soll abgeschätzt werden, wie der Drehmomentvergleich bei identischem Außendurchmesser beider Maschinen aussehen würde. Dazu wird bei der AxMDM der Kranz der 18 Joch so nach außen geschoben, dass sich 326 anstatt 300 mm Kantenlänge ergeben würde. Damit würde sich der mittlere Luftspaltdurchmesser  $d_L$  von 249 auf 275 mm vergrößern, womit er aber immer noch kleiner als bei der RadMDM wäre. Der mittlere Drehschub  $\tau_{max} = 143.100 \text{ N/m}^2$  wird dann wegen der auch hier in etwa gleichbleibenden Umfangskraft um etwa 10 % sinken. Mit Gl. (1) und 10 % Abschlag ergäbe sich dann ein Drehmoment von etwa 370 Nm. Bei unveränderter U-Jochgeometrie bleibt die Axialflussmaschine damit auch bei gleichen Außenabmaßen im Nachteil und erreicht nur 87 % des Drehmomentes des Außenläufers.

### 4.4 Magnettemperaturen

Als Nachteil der modularen Bauweise mit U-Jochen wurden in Abschn. 2.2 Wirbelstromverluste in den Rotormagneten angeführt. In Abb. 13 sind Messungen der Magnettemperaturen bei geschleppter Maschine gegenübergestellt. Bei der RadMDM war der Rotor nicht ganz heruntergekühlt, daher sind die Temperaturen am Fußpunkt der Kurve erhöht; letztlich stellt sich bereits bei einer Drehzahl von  $1500 \text{ min}^{-1}$  eine Temperatur von  $100^\circ\text{C}$  ein. Obwohl geblecht, liefert auch der Eisenrückschluss der Rotorglocke mit Eisenverlusten einen deutlichen Beitrag. Bei der Axialflussmaschine ergeben sich bereits ohne Lüfter günstigere Werte; mit Lüfter können die Temperaturen weiter um bis zu 25 K gesenkt werden.

Bei Betrieb mit Nennstrom steigen die Verluste in den Magneten durch Harmonische des Statorfeldes weiter an, und zusätzlich entsteht ein Wärmeeintrag durch die Kupfer- und Eisenverluste des Stators. Aktuell liegen Messwerte für die Axialflussmaschine im Dauerbetrieb bei Drehzahl  $845 \text{ min}^{-1}$  ( $M = 175 \text{ Nm}$ ,  $P = 15,5 \text{ kW}$ ) und Lüfterkühlung durch Axiallüfter vor: Die Wicklungstemperatur erreicht nach 20 min ca.  $125^\circ\text{C}$ , die Rotormagnettemperatur  $78^\circ\text{C}$ ; letzteres ist jedoch gegenüber Leerlauf ein Anstieg von fast 40 K. Der Wirkungsgrad der Maschine betrug in diesem Betriebspunkt 91,3%. Bei Bestückung des Rotors

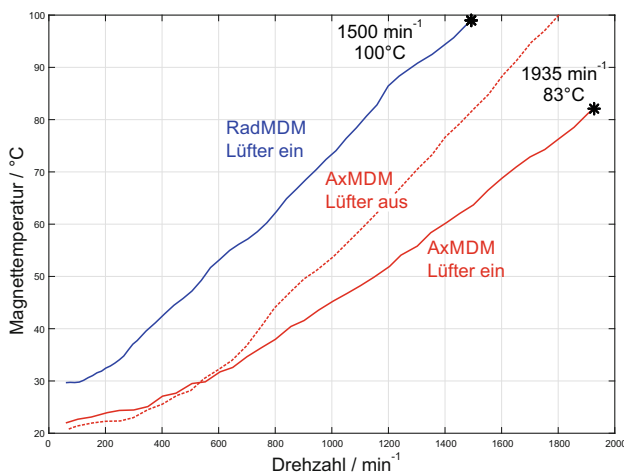


Abb. 13 Magnettemperatur über Drehzahl

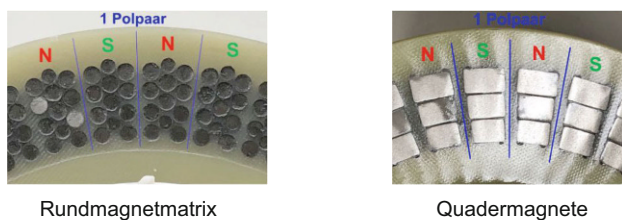


Abb. 14 Rotorgeometrie mit Rundmagneten [6]

mit VD956TP-Magneten (bzw. N45 SH) ergeben sich bei maximalem Strom bzw. Stoßkurzschluss lokal Arbeitspunkte, bei denen die Magnete bereits bei 120 °C gefährdet wären; soll die AxMDM mit Drehzahlen deutlich über 1000<sup>-1</sup> betrieben werden, sind mindestens UH-Magnete erforderlich. Andererseits kann man die Magnettemperaturen wie beschrieben durch feinere Segmentierung erheblich absenken. Versuche mit einem Rotor mit Rundmagnetmatrix (siehe Abb. 14) anstelle der 3-fach segmentierten Quadermagnete führen hier zu einer erheblichen Verbesserung bei zusätzlich einfacher Herstellbarkeit mit 5mm- und 6mm-Rundmagneten, allerdings aufgrund des geringen Füllfaktors zu Drehmomenteinbußen von fast 20 % [6]. Als Alternative bietet z. B. die Fa. Vacuumschmelze die Fertigung relativ fein segmentierter Quadermagnete an, was diesen Nachteil vermeiden würde.

#### 4.5 Erzielbare Leistung

Limitierend für die Leistung ist bei diesem Maschinenkonzept die von den Magnettemperaturen bestimmte Nennzahl. Bei einer Drehzahl von 845 min<sup>-1</sup> und einer Leistung von 15,5 kW sind diese Temperaturen für die vorgestellte Variante der AxMDM noch völlig unkritisch. Mit weiteren Maßnahmen (UH-Magnete mit feinerer Segmentierung) sollte eine Nenn-drehzahl von mindestens 2000 min<sup>-1</sup> entsprechend  $P = 36,7 \text{ kW}$  realisierbar sein. Zu 10 kg Aktivmasse kommt momentan ein knapp 20 kg schweres Gehäu-

se (vgl. Tab. 2). Bei Optimierung und Reduktion auf 25 kg Gesamtmasse würde das Maschinenkonzept eine massenbezogene Leistungsdichte von 1,47 kW/kg (im Dauerbetrieb) erreichen.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde eine Axialflussmaschine mit scheibenförmigem Innenläufer vorgestellt, deren Eisenkreis aus UI30-Kernblechen hergestellt werden kann. Das ermöglicht leichte Herstellbarkeit und einfache Skalierbarkeit. Erste Prototypen sind relativ schnell herstellbar. Immerhin kann die hier vorgestellte Variante der AxMDM mit ca. 10 kg Aktivmasse ein Maximaldrehmoment von 335 Nm erzeugen. Zur Erzielung einer hohen Leistungsdichte muss jedoch der zulässige Drehzahlbereich nach oben erweitert werden, wobei die Magnettemperaturen der Rotorscheibe limitierend sind. Diese können durch Luftkühlung und eine feine Segmentierung der Magnete wirksam reduziert werden.

Ein direkter Vergleich mit einer Radialfluss-Außenläufermaschine, die ebenso mit U-Jochen realisiert werden konnte zeigt, dass die Axialflussmaschine bei gegebenem Bauraum bezüglich Drehmoment im Nachteil ist, jedoch in Bezug auf Magnetmaterialausnutzung, Drehzahlbereich und Trägheitsmoment erheblich besser abschneidet.

Aktuell laufen Arbeiten an einem weiteren Prototyp mit vergrößerter Blechpaketlänge und höherem Drehmoment, wobei eine Erhöhung des Wirkungsgrades durch bessere Bleche und einen höheren Nutfüllfaktor (dieser beträgt aktuell nur 40 %) sowie eine Vergrößerung des nutzbaren Drehzahlbereichs durch feinere Segmentierung der Rotormagnete im Vordergrund stehen.

**Funding** Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

**Open Access** Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.



## Literatur

1. Berndl S., Kleimaier, A.: *Influence of the U-core geometry on the torque behavior of scalable axial flux motors*, 26th Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Sorrento, June 2022
2. Berndl S., Kleimaier, A.: *Encapsulated Air Cooling System for Scalable Axial Flux Motors*, 35th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE), Dubrovnik, Sept. 2021
3. Fickert M., Steinle M., Braun M., Frühauf P., Kremer M., Bräunig A.: *Scheibenläufer für eine elektrische Maschine* (DE102014213508A1), Deutsches Patent- und Markenamt, 2016
4. Fischer, R.: *Elektrische Maschinen*, Carl Hanser Verlag München, 16. Auflage 2013
5. Kleimaier A.: *Permanenterregte Synchronmaschine mit Scheibenrotor* (DE102017101962B4), Deutsches Patent- und Markenamt, 2018
6. Kleimaier A.: *Optimierung des Systemverhaltens eines Axialflussmaschinenantriebs durch Rotorgeometrieangepassung*, Fachbeitrag, 2. Symposium Elektronik und Systemintegration (ESI), HAW Landshut, April 2020
7. Kremer M.: *Electromagnetic design of a disc rotor electric machine as integrated motorgenerator for hybrid vehicles*, Dissertation, Université de Haute-Alsace, 2016.
8. Wang H., Pei X., Yin B., Eastham J.F., Vagg C., Zeng X. A.: *Novel Double-Sided Offset Stator Axial-Flux Permanent Magnet Motor for Electric Vehicles*, World Electr. Veh. J. 2022, 13, 52. <https://doi.org/10.3390/wevj13030052>
9. Woolmer T., McCulloch M.: *Analysis of the Yokeless and Segmented Armature Machine*, IEEE Electric Machines and Drives Conference, 2007.

**Hinweis des Verlags** Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.



**Alexander Kleimaier**, Studium der Elektrotechnik an der Universität (TH) Karlsruhe, Promotion an der TU München, danach zunächst Entwicklungsingenieur, dann Leiter Elektronik bei Compact Dynamics GmbH in Starnberg. Seit 2011 Professor für Elektrische Antriebe an der HAW Landshut, Forschung im Bereich Axialflussmaschinen und Leistungselektronik mit Wide Bandgap Halbleitern.