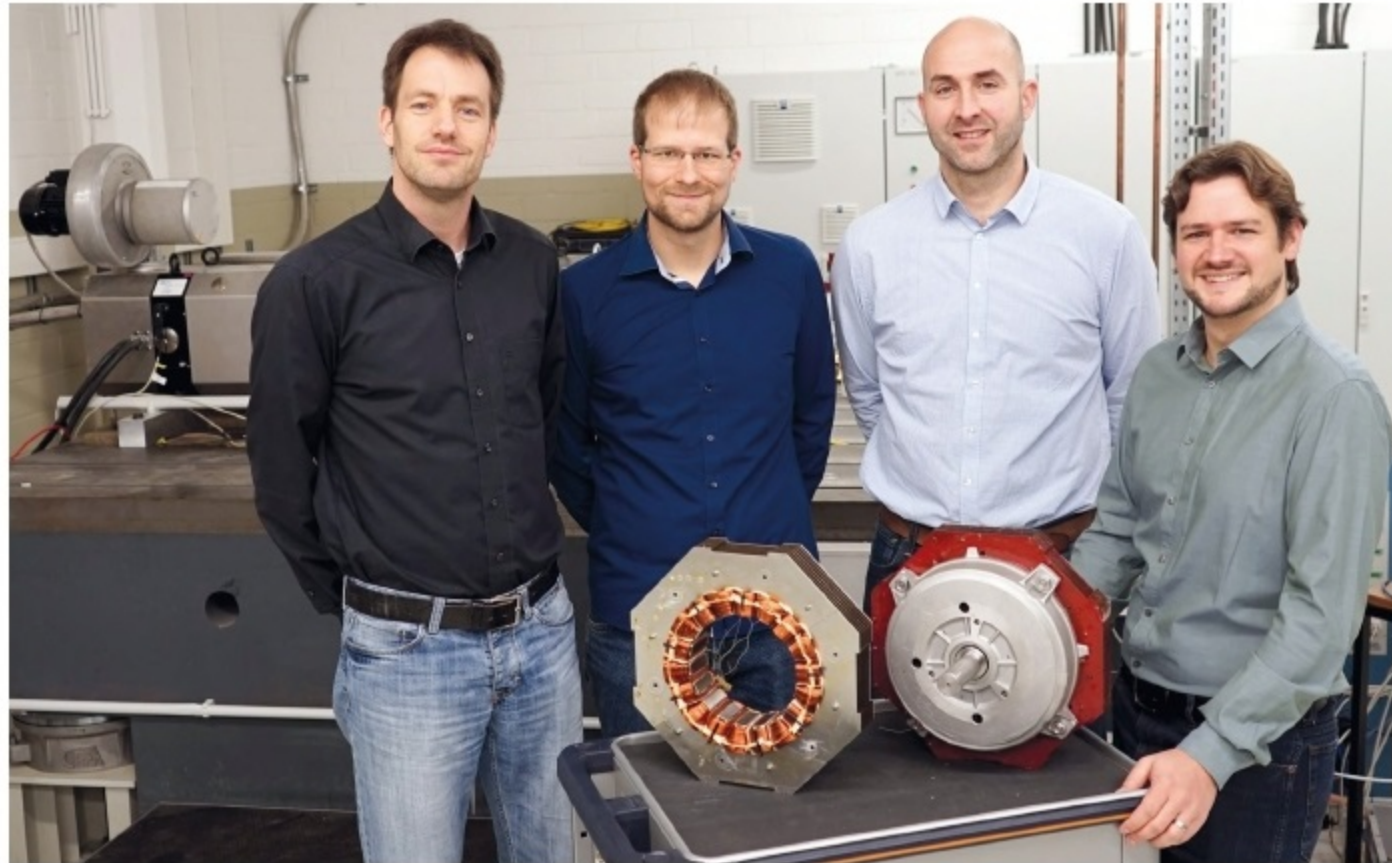


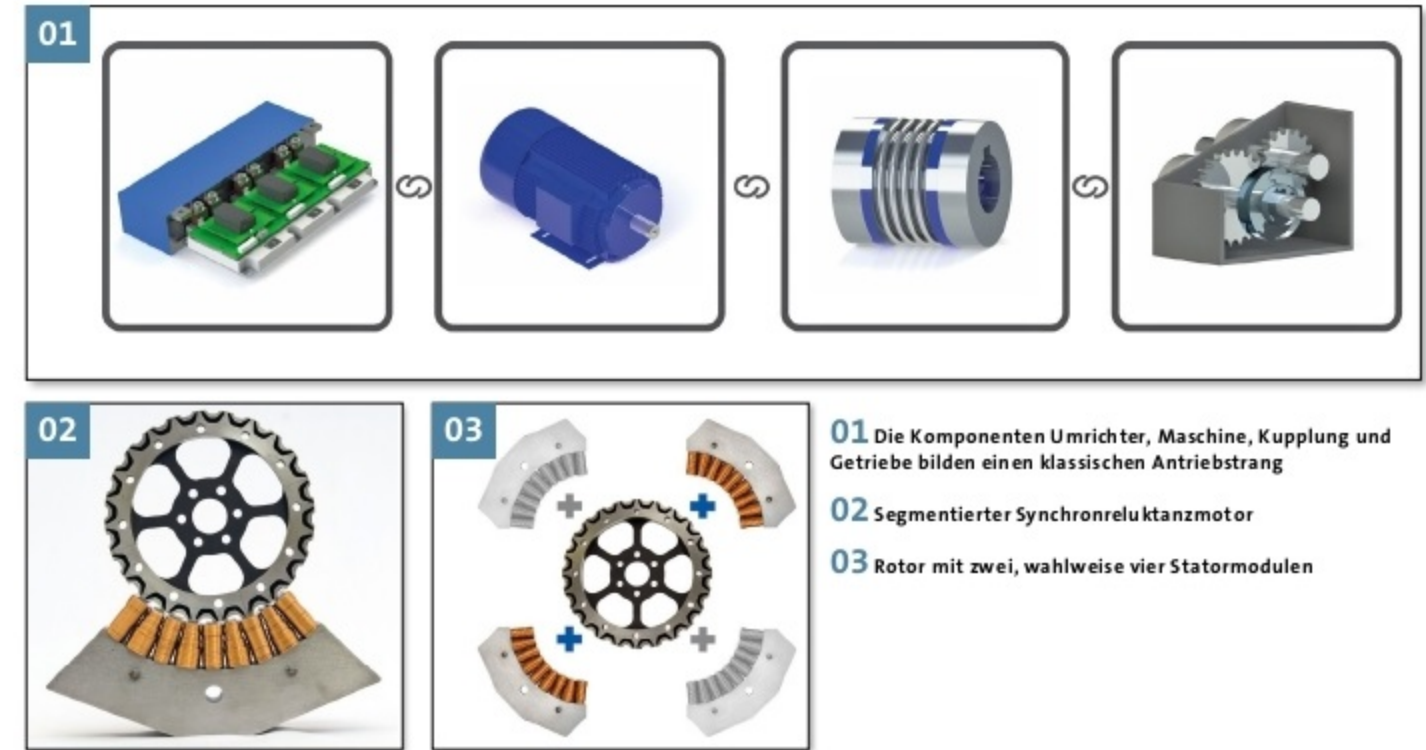
Modulare Segmentmotoren – Entwicklung eines Antriebskonzepts für hohe Drehmomentanforderungen



Industrie 4.0 im Elektromaschinenbau beginnt zwingend mit der Modularisierung an der Produktbasis. Gelöst werden kann diese Aufgabe durch ein neues Konzept für einen segmentierten und damit skalierungsfähigen Sonderantrieb auf Basis einer hochmodernen Synchron-Reluktanzmaschine (SynRM) in Form einer modularen Ausführung als Baukastensystem für den Applikationsingenieur. Je nach Leistungsbedarf wird der Motor mit einem (Bild 02) oder mehreren Statorblöcken bestückt (Bild 03).

Industrie 4.0 ist ein derzeit oft bemühter Ansatz, um auch Produkte geringer Stückzahl im Rahmen einer industriellen Fertigung schnell, günstig und qualitativ hochwertig herstellen zu können. Triebfeder für den steigenden Bedarf stellt die heutige gewünschte Produktdiversifikation bis hinunter zu Losgröße 1 dar.

Die klassische Antriebstechnik, die Basis nahezu aller heutigen Fertigungsprozesse und -anlagen ist, löst diese Aufgabe größtenteils mittels Variantenmanagement. Die Komponenten des Antriebsstrangs (Bild 01), bestehend aus Umrichter, Elektromaschine, Kupplung und Getriebe, werden nach Leistung, Wellendurchmesser und Bauhöhe aus in Katalogen standardisierten Baugrößen



01 Die Komponenten Umrichter, Maschine, Kupplung und Getriebe bilden einen klassischen Antriebsstrang

02 Segmentierter Synchronreluktanzmotor

03 Rotor mit zwei, wahlweise vier Statormodulen

und -formen konfiguriert und zu einem Antriebsstrang zusammengesetzt. Die Variantenvielfalt und die damit verbundene Teilevielfalt und Produktkomplexität verursacht Kosten in vielen Unternehmensbereichen beim Hersteller der Produkte aber auch beim Anwender. Wird nun die Teilevielfalt durch eine weitere Produktdiversifikation gesteigert, sinken naturgemäß die Losgrößen und Skaleneffekte gehen verloren. Der Anwender von Elektromaschinen muss entweder die technologischen Vorgaben (Leistung, Achshöhe, usw.) der Elektromaschinenhersteller akzeptieren und adaptieren und damit die Gestaltung seiner Produkte in Elementen dem Antrieb unterordnen oder er muss einen teuren Sonderweg gehen. Speziell an die Anwendung angepasste Elektromaschinen müssen für jede Bauform, Auslastung, Leistungsklasse oder Drehmomentklasse und deren Nenndrehzahl neu ausgelegt werden. Dadurch werden ebenfalls Serieneffekte in erheblichem Umfang verschenkt. Damit mündet doch wieder jede Einzelstückproduktion im bekannten Bereich des klassischen Sondermaschinenbaus und damit in der Komplexitätsfalle, sowohl beim Hersteller wie auch beim Anwender.

Für jeden Anwendungsbereich eines Antriebes haben sich heute technische Lösungsprinzipien innerhalb der Bauformen der Elektromaschinen etabliert, die entweder branchenspezifisch gewachsen sind durch zwingende regulatorische Anforderungen oder wirtschaftliche Zwangsbedingungen geformt wurden. Diese spezifischen Anwendungsgebiete treffen auf die oben geforderte Notwendigkeit der Baugruppenbildung, der Modulbauweise oder aber der Plattformkonzepte.

In diesem Anforderungsfeld besteht wie so oft das Hauptproblem innerhalb des technologischen Kompromisses der Modularisierungsschnittstellen des Elektromaschinenherstellers und des auf einer höheren Systemebene arbeitenden Maschinenbauunternehmens mit seinen zumeist integrativen Tätigkeiten. Dieser benötigt einen applikationsangepassten und integrierten Antrieb für sein Produkt und dahingehend optimierte Modulschnittstellen, die er heute als zusätzliche Sonderaufwände managen muss. Oftmals ist diese Tätigkeit der Kern der Integrationsarbeit. Für den industriellen Maschinenbau mit geringeren Stückzahlen stellt dies eine erhebliche Entwicklungshürde dar. Daher entsteht gerade mit dem

gedanklichen Vorstoß in eine Industrie-4.0-taugliche-Produktion von Antriebstechnologien für den modernen Maschinen- und Anlagenbau zunehmend der Bedarf an einem skalierbaren und ressourcenschonenden Antrieb, der nahezu nahtlos in die Arbeitsmaschinen eingegliedert werden kann. Ein Höchstmaß an Synergien entsteht durch die reduzierte Teilevielfalt, welche modular aufgebaut sein sollte.

Dies ist Gegenstand des hier vorgestellten Exist-Forschungs-transferprojektes bzw. des dazugehörigen technologischen Konzeptes. Im 2016 gestarteten Projekt werden modulare Segmentmotoren für industrielle Antriebsaufgaben entwickelt, die im oben genannten Sinne eine vollkommen neuartige Lösungsstrategie im Bereich der elektrischen Antriebe ermöglichen. Das modulare Plattformkonzept ermöglicht einen nahezu vollständig flexiblen Aufbau von Antriebsmaschinen trotz Verwendung von Gleichteilen (Bild 03).

So lässt sich bei beliebigen Drehmomentanforderungen der Bau-raum optimal ausnutzen. Da das modulare Motorkonzept eine einfache Integration in bestehende Anlagen oder Maschinen ermöglicht und die Positionswahl nahezu frei und je nach Platzvorgabe erfolgen soll, werden die Statormodule mit hoher Drehmoment- und Leistungsdichte und autark betrieben. Dies sind zwei der wichtigsten Entwicklungsziele des modularen Segmentmotors, wie sie im Folgenden ausführlich dargestellt werden.

Skalierung segmentierter Drehmomentmotoren

Für Drehzahl (n), Drehmoment (M) und Leistung (P) ist folgender Zusammenhang gegeben:

$$P = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \cdot M \quad (1)$$

Im Sinne der Modularität bzw. Segmentbauweise kann das Drehmoment M der Maschine direkt gedanklich in eine zu summierende Größe $i \times M_i$ abhängig von der Anzahl (i) der Statorblöcke aufgeteilt werden, vgl. Bild 03 mit $i=2$ oder wahlweise 4. Jeder Statorblock erzeugt anteilig das Moment M_i aufgrund seiner

Prof. Dr.-ir. Dr. h. c. Rik W. De Doncker ist Lehrstuhlinhaber des Instituts für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA) an der RWTH Aachen University und Dr. Jan-Dirk Reimers, Tobias Lange, Claude Weiss und Tobias Berthold sind wissenschaftl. Mitarbeiter des ISEA und arbeiten an der Ausgründung von Torque Werk

elektromagnetisch erzeugten Luftspalttangentialkraft F_t , die in tangentialer Richtung und mit dem Hebelarm $D/2$ wirkt. Es ergibt sich:

$$P = 2\pi \cdot \frac{n}{60} \cdot (i \cdot D / 2 \cdot F_t) \quad (2)$$

Die Luftspalttangentialkraft lässt sich für ein Statorsegment aus dem Luftspalttangentialschub τ_t und mit einem Segmentwinkel α sowie der Baulänge des Statorblocks L aufteilen in:

$$F_t = A_{\text{Luftspaltfläche}} \cdot \tau_t = L \cdot \pi \cdot D \cdot \frac{\alpha}{360} \cdot \tau_t \quad (3)$$

Somit ergibt sich die Bilanz der mechanischen Größen zu:

$$P = \pi^2 \cdot \frac{n}{60} \cdot L \cdot D^2 \cdot i \cdot \frac{\alpha}{360} \cdot \tau_t \quad (4)$$

Die wirkungsvollste Drehmomentoptimierung ist über Steigerung des Wirkdurchmessers D zu erreichen. Drehzahl, Baulänge, Segmentwinkel (α) und auch Segmentanzahl (i) führen nur linear zu einer Drehmoment- und Leistungssteigerung. In einer segmentierten Maschine kommen die neuen Optimierungsvariablen i und α hinzu, wobei das Drehmomentoptimum bei einer 360°-Vollmaschine liegt. Dies gilt nicht im Sinne der Materialaufwände und Kosten.

Zur Kostenbewertung wurden für die später vorgestellte 150-mm-Maschine (Bild 12, Tabelle 03) Kostensätze für die Materialkosten und die Fertigungskosten in €/kg ermittelt. Die Rotor-, Stator- und Spulenkosten werden dann ausgehend von diesem Punkt (Kostenbasis 1 bei $D = 150$ mm) linear über das Gewicht und den Segmentwinkel jedes neuen Designs ermittelt. Die erste Darstellung erfolgt für 360°-Vollmaschinen und wird in Bild 04 dargestellt.

Ein Kostenoptimum für die angesetzte Aufteilung von Drehzahl zu Drehmoment ergibt sich in einer für Torquemotoren bekannten scheibenförmigen Bauform. Mit den hier verwendeten Randwerten der Synchron-Reluktanzmaschine ergibt sich in diesem Beispiel (3 kW, 41 Nm) ein breites Optimum bei einem Luftspaltdurchmesser von ca. 300 bis 400 mm. Bei höheren Durchmessern steigen die Kosten bedingt durch den ebenfalls quadratisch wachsenden Bauaufwand an.

Die Optimierungsvariablen i und α lassen sich bei der segmentierten Maschine zu einem Summensegmentwinkel zusammenfassen. Die Kostenbasis ist erneut auf die 150-mm-Vollmaschinen normiert, welche die Basis dieser Berechnung darstellt. Zur Einhaltung der konstant angesetzten Drehzahl und des Drehmoments muss bei Reduzierung des Segmentwinkels folglich die Baulänge erhöht werden.

α	x	$D = 150$ mm ($M = \text{konst}$)	$D = 300$ mm ($M = \text{konst}$)
60°	4,78	2 693,6 N 84 700 h	1 364,5 N 646 400 h
90°	4,5	2 535,8 N 116 200 h	1 284,6 N 726 300 h
120°	4,14	2 313 N 152 800 h	1 181,8 N 808 400 h
150°	3,69	2 079,4 N 200 700 h	1 053 N 939 800 h
180°	3,18	1 792 N 318 800 h	907,8 N > 1 000 000 h

Tabelle 01: Radialkraftfaktor zur Ermittlung der Lagerlasten und Lagerlebensdauer

Es ergibt sich ein neues Optimum der auf das Drehmoment bezogenen Kosten, welches mit größerer Auswirkung als die scheibenförmige Bauweise der Vollmaschine die Kosten, wie in Bild 05 gezeigt, reduziert. Durch die Segmentbauweise verschiebt sich das Optimum weiter zu größeren Luftspaltdurchmessern.

Dies ist dadurch erklärbar, dass die Materialaufwände ebenfalls quadratisch mit D skalieren, aber durch die Segmentbauweise bzw. den geteilten Stator dies nur für den Rotor gilt. So kann die quadratische Drehmoment- und Leistungssteigerung des Durchmessers erneut und im doppelten Sinne als Drehmomentübersetzung wirken. Mit steigendem Durchmesser reduziert sich der benötigte Segmentwinkel und erzeugt weiterhin ein konstantes Drehmoment, auch bewirkt durch die wachsende Baulänge. Diese wiederum hilft zusammen mit der Segmentierung einen für den Stator elektromagnetisch sinnvolles Verhältnis von Breite zu Länge einzuhalten.

Bei diesem Beispiel des 3-5-kW-Motors ist ein Durchmesser von 400 bis 500 mm wirtschaftlich sinnvoll. Der benötigte Segmentwinkel beträgt für den Motor 120 bzw. 90°. Durch die Motorbauart lässt sich schließlich eine äquivalente Getriebeübersetzung wie in Bild 06 dargestellt ersetzen.

Hier befindet sich das wirtschaftliche Optimum bei einer Übersetzung von $i = 17$ im Vergleich zu einer 2-poligen Maschine der Baugröße 112, von $i = 8,5$ zu einer 4-poligen Maschine bzw. $i = 4,25$ ausgehend von einer 8-poligen Baugröße 160. Der Ersatz einer Getriebestufe durch einen segmentierten Torquemotor ist in diesem Übersetzungsbereich wirtschaftlich sinnvoll.

Eine technologische Grenze ergibt sich bei sehr flacher Bauweise und wenn die Kosten des stark vergrößerten Durchmessers die Kostenvorteile gegenüber der Vollmaschine wieder aufwiegen. Dieser liegt bei einem $i = 32$ gegenüber der 2-poligen Maschine (BG112), bzw. $i = 8$ ausgehend von der 8-poligen Maschine (BG160) vor. Für höhere Leistungsklassen ergibt sich ein analoges Bild bei dann größeren Achshöhen. Das eingesparte Getriebe wird hier jeweils nicht in den Kosten berücksichtigt. Der wirtschaftliche Einsatzbereich erweitert sich erheblich unter Berücksichtigung dieser Kosteneinsparungen. Der direkte Anbau an vorhandene Baugruppen großen Durchmessers ruft weitere Synergieeffekte hervor, da die Tragstruktur des Läufer ringes entfällt.

Bauweise

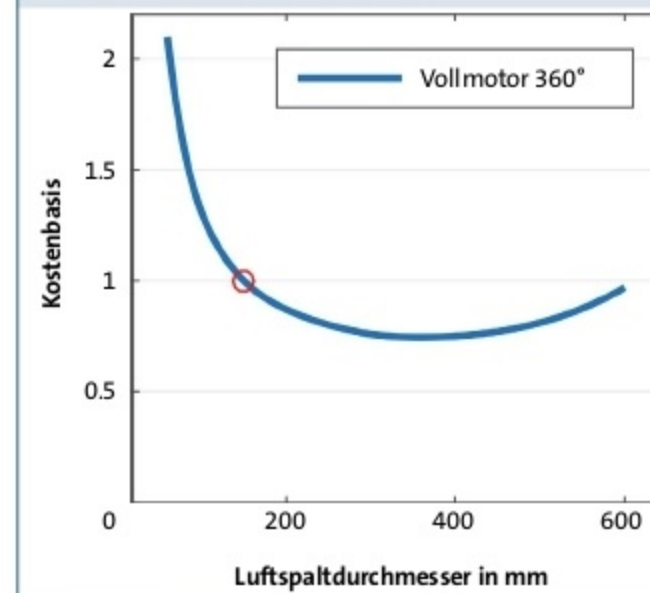
Die flache, scheibenförmige und segmentierte Bauform bewirkt wenige konstruktive Änderungen an einem klassischen Torquemotor. Der Läufer wird aus Gewichtsgründen als Ring auf eine Trägerscheibe mit z. B. Speichen montiert (Bild 07), er verfügt damit über ein sehr geringes Trägheitsmoment. Der Stator wird als Segmentblock mittels einer mit Passstiften tolerierten Arretierung passend für einen bestimmungsgemäßen Luftspalt um den ringförmigen Läufer positioniert (Bild 07).

Asymmetrische Lagerbelastung

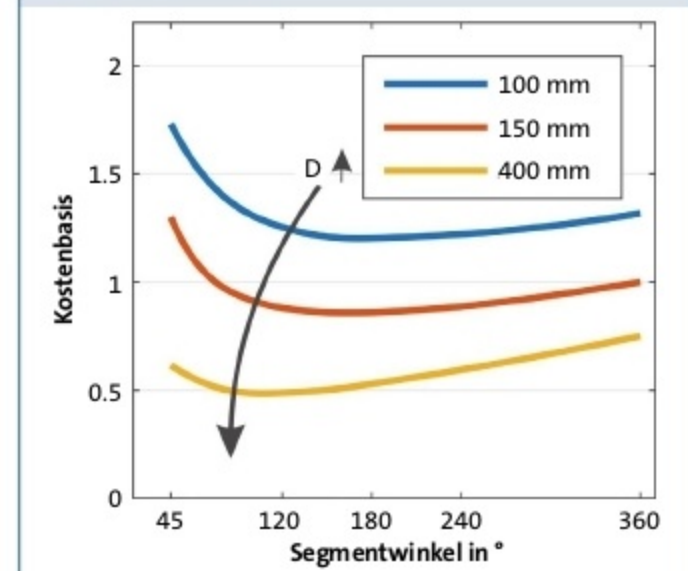
Bei asymmetrischem Aufbau der Segmente um einen Läufer entsteht aufgrund der magnetischen Kräfte im Luftspalt eine nicht ausgeglichene Radialkraft. Diese wirkt auf die Statoraufnahme, auf den Läufer ring und auf die Läuferlagerung. Sie ist vergleichbar zu einer einseitig eingreifenden Stirnradgetriebestufe oder einem Riementrieb, die ebenfalls beide Prinzipien bedingt Radialkräfte auf die Lagerung und Tragstruktur einwirken lassen.

Die Luftspaltradialspannung (LRSr) ist faktoriell an den bereits beschriebenen Luftspalttangentialschub τ_t gekoppelt und beträgt bei dem hier vorgestellten Beispiel das ca. 5-fache. Die Radialspannung LRSr liegt damit im Mittel bei ca. 0,12 MPa. Die Radialkraft wirkt als Normalkraft und hebt sich bei gekrümmter Statorfläche

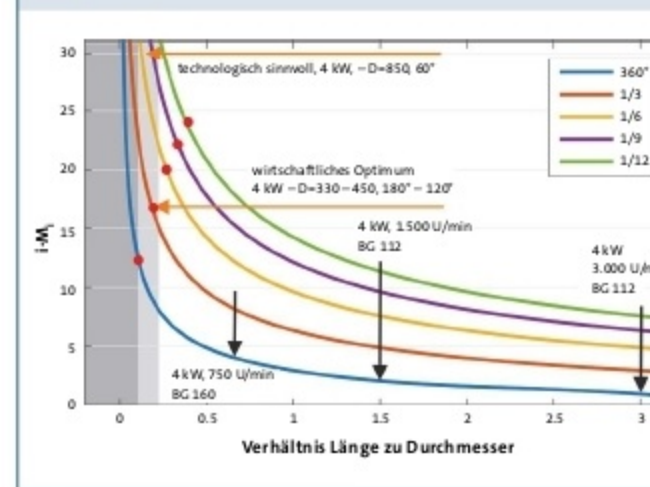
04 Kostenvergleich eines 360°-Vollmotors bei konstantem Drehmoment, Drehzahl, Leistung



05 Kostenbewertung des Maschinendurchmessers und des Segmentwinkels



06 Einsatzgrenzen für den Segmentmotor, beispielhaft für 4 kW



07 Bau- und Montagekonzept – segmentierter Einbaumotor



mit steigendem Winkel teilweise auf. Abhängig vom Segmentwinkel α ergibt sich die Radialkraft zu:

$$F_r(\alpha) = LRS_r \cdot L \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot x$$

$$= LRS_r \cdot L \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \int_{90^\circ-\alpha/2}^{90^\circ+\alpha/2} \sin(\alpha) d\alpha \quad (5)$$

Für die Segmentwinkel von 60 bis 180° ergeben sich die in Tabelle 01 dargestellten Faktoren x zur Ermittlung der jeweils wirksamen Luftspaltradialspannung und zur weiteren Berechnung der daraus resultierenden Radialkraft F_r . Diese Radiallast wirkt zusätzlich zu den für den Motor anzusetzenden gewichts- und betriebsbedingten Axial- und Radiallasten auf die Lagerungen. In Tabelle 01 wird anhand einer heute üblichen Lagerung mit einem 6206-ZZ-C3 für zwei Segmentmotoren die Lagerlebensdauer unter Einwirkung dieser Lasten für fettgefüllte Lager in Stunden (h) angegeben.

Die in den heute bekannten Baugrößen äquivalent verwendeten Lagergrößen erreichen eine ausreichende Lagerlebensdauer von über 35 000 bis 50 000 h und sind ohne weitere externe Lasten im Grunde überdimensioniert.

Die bei Verwendung von nur einem Segment maximal entstehende zusätzliche Radiallast führt zu einer relevanten Erhöhung der Lagerbelastung. Bei den vom Konzept favorisierten höheren Durchmessern fallen die Radialbelastungen bedingt durch den Radius geringer aus (Tabelle 01). Die Radiallast trägt gerade bei Sonderanwendungen positiv zur Sicherstellung der benötigten Lagermindestlast bei. Der Einfluss auf die Lagerreibung kann energetisch vernachlässigt werden.

Zusammenfassung der Bauausführung

Folgende konstruktive Randwerte und Vorteile lassen sich anhand der geführten mechanischen Betrachtung für eine segmentierte Reluktanzmaschine aufzählen:

Nuten/Pole		6	8	10
9	$k_{w,p}$	0,866	0,945	0,945
	σ_δ	0,46	1,18	2,4
	F_M	0,687	<0,3	<0,3
12	$k_{w,p}$		0,866	0,933
	σ_δ		0,46	0,96
	F_M		0,687	<0,3
15	$k_{w,p}$			0,866
	σ_δ			0,46
	F_M			0,687
18*	$k_{w,p}$			0,724
	σ_δ			0,12
	F_M			0,764

Tabelle 02: Bewertung der Konfigurationen

- flache, scheibenförmige Bauweise
- Segmentbauweise von 360 bis bevorzugt 120 bis 60° sinnvoll
- Anwendung bei geringen Drehzahlen als Direktantrieb
- volle Freiheit bei der Segmentpositionierung
- Übersetzungen bis $i = 32$ können sinnvoll erreicht werden
- heute branchenübliche Lager verwendbar

Insbesondere für die folgende elektromagnetische Auslegung derartiger Elektromotoren und Motorkomponenten sind die Aspekte der Teilbarkeit der Statorsegmente, eine hohe spezifische Leistungsdichte und das hohe Durchmesser-zu-Länge-Verhältnis ein zusätzliches Optimierungskriterium, aus dem weitere bauartbedingte Restriktionen entstehen. Das Durchmesser-zu-Länge-Verhältnis stellt sich dabei für die autark arbeitenden Segmentblöcke jedoch geringer dar, da diese sich nur über einen Teil des Durchmessers erstrecken. Dennoch ergibt sich als optimale Grundgeometrie eine ausgeprägte flache Grundbauform.

Flache Synchron-Reluktanzmotoren

Die im vorigen Kapitel aufgeführten mechanisch-technologischen Randwerte ergeben die Forderung nach einer SynRM in flacher Bauweise mit der Grundvoraussetzung der Teilbarkeit in Statorsegmente. Der magnetische Rückfluss muss innerhalb eines Segmentes erfolgen und die Wickelköpfe sollten einen kurzen Überhang aufweisen.

Somit lassen sich diese höherpolige Maschinen mit verteilten Wicklungen oder konzentrierten Wicklungen aufbauen. Hier sollen jedoch zunächst unter Berücksichtigung der guten Zugänglichkeit der Statorsegmente für ein automatisches Bewickeln und der Anforderung der Minimierung des Wickelkopfüberhangs insbesondere konzentriert gewickelte Zahnspulen Berücksichtigung finden.

Konzentrierte Wicklungen

Synchron-Reluktanzmotoren (SynRM) gehören zur Kategorie extern, im speziellen durch den Stator, erregter Maschinen. Da es sich um ein 3-phasiges synchron-rotierendes Feld handelt, ist die Unterdrückung von luftspaltharmonischen Komponenten besonders wichtig. Herkömmliche konzentrierte Wicklungen führen zu hohem Streufluss und somit zu einem geringen Leistungsfaktor (Lehner & Gerling, 2016). Der effiziente und kompakte Entwurf von SynRM ist vom Wicklungsfaktor, dem Luftspalt-Streufluss-Faktor und der im Projekt erarbeiteten Berechnung des Drehmomentfaktors abhängig.

Wicklungsfaktor, Luftspalt-Streufluss-Faktor, Drehmomentfaktor

Der Wicklungsfaktor bestimmt maßgeblich die Kupferverluste der Maschine und wird durch die Anordnung der Wicklung und durch die Statornuten n_s und die Rotorpolpaarzahl p definiert. Ein hoher Wicklungsfaktor ermöglicht, außer bei SynRM, eine kompakte und effiziente Maschine. Herkömmliche Wicklungsfaktoren für 1- und 2-lagige Wicklungen können aus hinreichend bekannter Literatur und Tabellenwerken entnommen werden.

Zur optimierten Ausnutzung der SynRM zeigt sich, dass ein geringerer Wicklungsfaktor hilfreich sein kann. Daher wird hier kurz auf Berechnung des Wicklungsfaktors eingegangen. Hierzu werden die Statornuten (Bild 09) durchnummeriert und die Nutenzahlen einer Phase in einem Vektor \vec{S} definiert. Der Wickelsinn einer Wicklung definiert das positive bzw. negative Vorzeichen des Vektors.

$$\vec{S} = [-1, 3, -4, 6, -7, 9] \quad (6)$$

Die induzierte Spannung kann nun anhand der Nutpositionen \vec{S} sowie der Ordnung der harmonischen Oberwellen p und der Statorzahnzahl n_s berechnet werden.

$$\vec{E}_i = \text{sign}(\vec{S}) \cdot e^{j\omega p \vec{S}/n_s} \quad (7)$$

Danach kann der Wicklungsfaktor aus den Komponenten der induzierten Spannung bestimmt werden.

$$k_w = \frac{3 \cdot \left| \sum_{i=1}^{2n_s/3} \vec{E}_i \right|}{n_s \cdot n_s} \quad (8)$$

Luftspalt-Streufluss-Faktor

Eine SynRM mit herkömmlicher konzentrierter Wicklung erreicht aufgrund des hohen Streuflusses nur einen geringen Leistungsfaktor. Der Leistungsfaktor bestimmt die Scheinleistung des Antriebsumrichters und beeinflusst in Teilen die resultierende Effizienz des Motors. Das erreichbare Maximum kann mithilfe des Induktivitätsverhältnisses von Längs- und Querinduktivität abgeschätzt werden.

$$\cos \varphi = \frac{\zeta - 1}{\zeta + 1}$$

$$\zeta = \frac{L_{sl}}{L_q} = \frac{L_{msl} + L_{msq}}{L_{msl} + L_{msq}} \quad (9)$$

Wie in obiger Formel zu sehen, verringert die Streuinduktivität das Induktivitätsverhältnis und somit den Leistungsfaktor. In (Lehner & Gerling, 2016) wird der Streuflussfaktor als maßgebliches Auswahlmerkmal von konzentrierten Wicklungen in SynRM beschrieben. Dieser verursacht den überwiegenden Anteil der Streuinduktivität (Ponomarev, Alexandrova, Petrov, Lindh, & Lomonova, 2014).

$$L_\sigma = L_{\sigma s} \cdot \sigma_\delta \quad (10)$$

Der Faktor wird aus der räumlichen Verteilung der Durchflutung ermittelt (Nürnberg, 1962).



$$\sigma_\delta = \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{p \cdot k_{w,i}}{i \cdot k_{w,p}} \right)^2 \quad (11)$$

Die Amplituden der Wicklungsfaktoren der jeweiligen i -ten harmonischen Welle $k_{w,i}$ sowie der Arbeitswelle $k_{w,p}$ gehen in die Summe des Faktors ein. Dieser kann für beliebige Wicklungsanordnungen berechnet werden.

Drehmomentfaktor

Zuletzt wird der Drehmomentfaktor eingeführt um für SynRM mit konzentrierter Wicklung ohne Finite-Elemente-Berechnung eine gute Vorhersage der Drehmomentausbeute treffen zu können. Allgemein wird das Reluktanzmoment wie folgt analytisch bestimmt (Boldea, 1996), (Doncker, Pulle, & Veltman, 2011):

$$M = \frac{3}{2} p \cdot (L_d - L_q) \cdot i_d i_q \quad (12)$$

In der analytischen Berechnung wird eine gleichmäßige Verteilung der Induktivität über die Rotorpole angenommen. Der Streufluss verringert das Induktivitätsverhältnis, sagt aber nichts über die tatsächliche Rotorausnutzung und somit die mögliche Drehmomentdichte aus. Es zeigt sich in Finite-Elemente-Berechnungen, dass die Rotorpole positionsabhängig unterschiedlich gut ausgenutzt werden (Bild 09). Diese Besonderheit fällt insbesondere bei konzentrierten Wicklungen ins Gewicht.

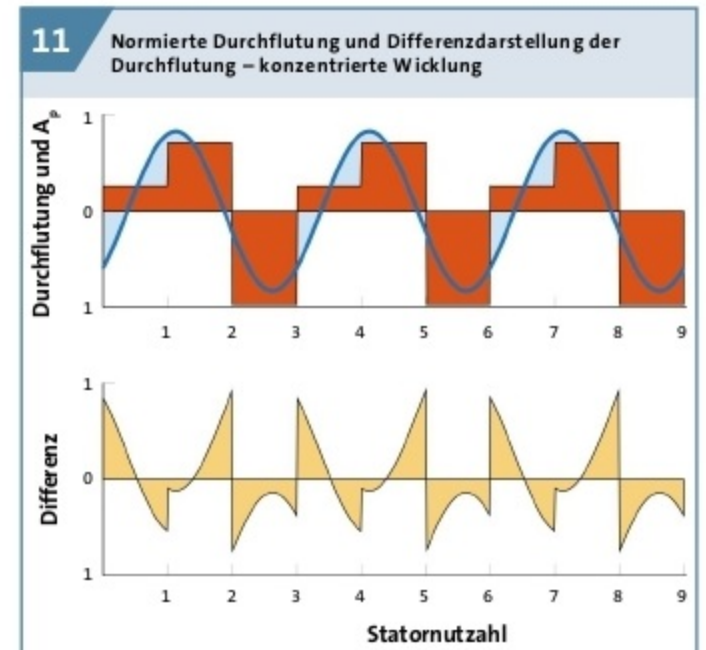
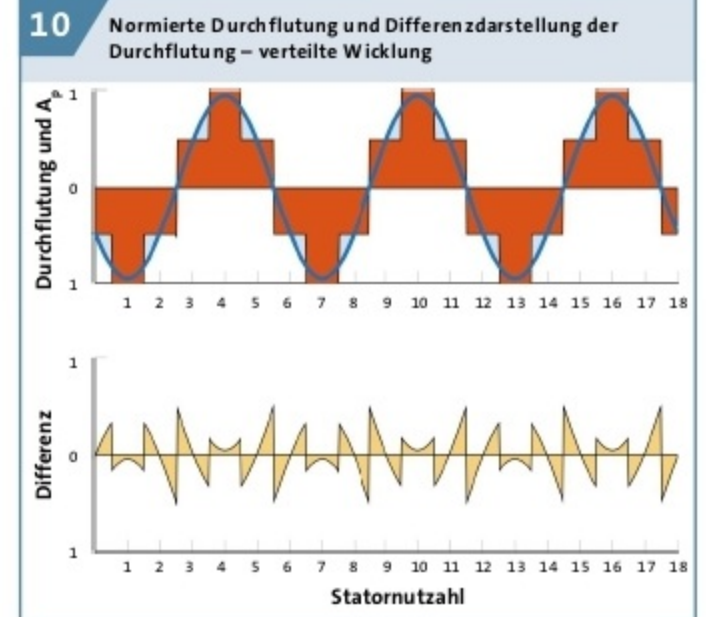
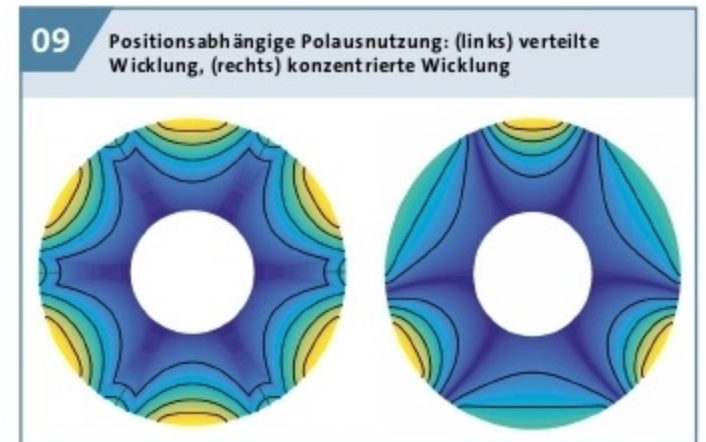
In Bild 09 ist ein massiver Rotor mit jeweils sechs Polen dargestellt. Bei der verteilten Wicklung (links) lässt sich die Annahme gleichmäßiger Polverteilung bestätigen. Hingegen zeigt sich bei der konzentrierten Wicklung (rechts) eine ungleichmäßige Ausnutzung. Bereits aus den Abbildungen lässt sich vermuten, dass die Pole nur zu einem Anteil von etwas über 50 % ausgenutzt werden. Der Grad dieser Ausnutzung kann ohne FEM-Berechnungen analytisch anhand der Verteilung der Durchflutung im Stator berechnet werden. Hierzu werden mittels Fourieranalyse die spektralen Komponenten der Amplitude A_i und Phase φ_i der Durchflutung über räumliche Koordinaten eines Statorumlaufs γ bestimmt.

$$(A_i | \varphi_i) = \mathcal{F}(A(\gamma)) \quad (13)$$

Anschließend lässt sich die Arbeitswelle entsprechend der Polzahl inklusive der korrekten Phasenlage extrahieren und über den Winkel γ aufrufen. In dem gezeigten Beispiel ist die Polpaarzahl $p = 3$. Nun kann die Abweichung von der idealen Arbeitswelle definiert werden. Hierzu wird von der Durchflutung die Arbeitswelle räumlich aufgetragen und subtrahiert.

$$D_{\text{diff}} = A(\gamma_{st}) - A_p(\gamma_{st}) \quad (14)$$

Die Durchflutung, die Arbeitswelle und die zuvor berechnete Differenz sind zur Verdeutlichung in Bild 10 gezeigt. Die Fläche unter



Leistungsdaten	
Leistung	3 (9; 18) kW
Spannung	Y-400 V
Strom	10,9 (32,7; 65,4) A
Außendurchmesser	320 mm
Aktive Länge	50 mm
Drehmoment	41 Nm (max. 57 Nm)
Drehzahl	600 (1 800; 3 600) U/min
Kühlart	luftgekühlt, aktiv
σ (kNm/m ³)	25–28 kNm/m ³
Wirkungsgrad	87,3 % @ 3 kW
Gewicht (Einbausatz)	25 kg

Tabelle 03: Motordaten der 150-mm-Referenzmaschine

Formelzeichen		
P	W	Leistung
n	min^{-1}	Drehzahl
M	Nm	Drehmoment
i		Anzahl der Segmente, äquivalente Getriebeübersetzung
D	mm	Rotordurchmesser
$A_{\text{Luftspaltfläche}}$	mm^2	Oberfläche des Luftspalt
τ_t	MPa	Luftspalttangentialschub
α	$^\circ$	Segmentwinkel
L	mm	Aktivlänge des Blechpakets
F_t	N	Luftspalttangentialkraft
F_r	N	Luftspaltradialkraft
$LSRr$	MPa	Luftspaltradialspannung
x		Faktor zur Berechnung der anteiligen Radialkraft
\vec{S}		Positionsvektor der Wicklung
n_s		Statorzahnzahl
p		Statorpolpaarzahl
k_w		Wicklungsfaktor
n_i		Anzahl der Lagen in einer Nut
\bar{E}_i		Normierte induzierte Spannung je Zahn
ζ		Induktivitätsverhältnis
L_d	H	Längsinduktivität
L_q	H	Querinduktivität
$L_{d\sigma}$	H	Streuinduktivität in Längsrichtung
$L_{q\sigma}$	H	Streuinduktivität in Querrichtung
L_δ	H	Luftspaltstreuinduktivität
L_m	H	Magnetisierungsinduktivität
$\cos \varphi$		Leistungsfaktor
σ_δ		Luftspaltstreuflussfaktor
$i_{d,q}$	A	Strom der d,q-Achse
$A(\sim)$		Normierte Durchflutung
$A_p(\varphi_i)$		Spektrale Amplitude und Phase der normierten Durchflutung
γ	$^\circ$	Winkel des Statorumlaufts
D_{moy}		Störanteil der normierten Durchflutung
F_M		Drehmomentfaktor

der Differenzkurve kann als nicht drehmomenterzeugender Anteil der Durchflutung verstanden werden. Dies gilt es zu minimieren.

Aus dem Quadrat dieser Fläche lässt sich nun ein auf die Arbeitswelle normierter Drehmomentfaktor zur Beschreibung der Rotorausnutzung in Prozent berechnen.

$$F_M = 1 - \int_{\gamma_s=0^\circ}^{\gamma_s=360^\circ} \left(\frac{A(\gamma_{st}) - A_p(\gamma_{st})}{A(\gamma_{st})} \right)^2 d\gamma_{st} \quad (15)$$

Für segmentierte Motoren wird das Integral über den Segmentwinkel der kleinsten Teilungseinheit gebildet. Der Drehmomentfaktor der erstmalig in (Lange, Weiss, & De Doncker, 2017) dargestellten Beispiele beträgt für die verteilte Wicklung $F_M = 0,92$ und für die konzentrierte Wicklung $F_M = 0,687$.

Anhand der hergeleiteten Formel wurden die Drehmomentfaktoren unterschiedlichster Konfigurationen wie in **Tabelle 02** gezeigt ermittelt. Für den Bau der ersten Segmentmaschine wurde eine Maschinenkonfiguration mit 18 Nuten und zehn Polen gewählt. Hier wird ein hoher Drehmomentfaktor bei geringem Streufluss und ausreichendem Wicklungsfaktor erreicht. Die Maschine verfügt über eine kleinste Segment-Teilung von 18 Nuten. Es bleibt zu bemerken, dass der Drehmomentfaktor nicht nur für konzentrierte Wicklungen, sondern auch für verteilte Wicklungen aller Maschinentypen gilt. Allerdings ist der Einfluss bei z. B. Permanentmagnet-Synchronmaschinen ungleich geringer.

Zusammenfassung der Faktoren

Es wurden die drei wichtigsten Faktoren zur Auswahl einer SynRM mit konzentrierter Wicklung vorgestellt. Besonders wichtig ist das Verständnis, dass nicht nur ein hoher Wicklungsfaktor zu einem erfolgreichen Entwurf der Maschine führt. Bei SynRM muss von üblichen Wicklungskonfigurationen abgewichen werden um einen geringen Streufluss und hohen Drehmomentfaktor zu erreichen. Nur so lässt sich eine effiziente und kompakte Reluktanzmaschine als Scheibenläufer mit hoher Drehmomentdichte entwerfen.

Referenzmotor, Montage

Für die Erprobung dieses Maschinentyps wurde eine Vollmaschine (360°) mit einem 18-nutigen-Segment ausgewählt und zur Erprobung gebaut. Bild 12 zeigt die Zahnspulen bei der Montage. Der Luftspaltdurchmesser wurde für den Prototypen mit 150 mm angesetzt. Die Kenndaten der Maschine sind Tabelle 03 zu entnehmen.

Auslegung und Erprobung

Der Motor lässt sich je nach Verschaltung der Zahnspulen mit drei Leistungen und Eckdrehzahlen betreiben. **Bild 13** zeigt den Prüfstand zur Validierung der Auslegungsdaten.

Fazit und Ausblick

Der Schlüssel für eine moderne und langfristig industriell tragfähige Antriebslösung ist die Kombination eines modularen Konzeptes mit einer hocheffizienten und kostengünstigen Antriebstechnologie. Hier wird diese in Form der konzeptionell und praktisch vorgestellten Entwicklung einer segmentierten Synchron-Reluktanzmaschine gezeigt. In einem interdisziplinären Projektteam wurden moderne Methoden der Elektromaschinenentwicklung mit aktueller Fertigungstechnik kombiniert, um einen hochgradig modular und fertigungstechnisch optimierten Baukasten für Elektromaschinen auszuführen. Dies erfolgte im Sinne der anwender- und applikationsspezifischen Schnittstellen für einen Einbaumotor.

Gleichzeitig entstand eine effiziente Synchron-Reluktanzmaschine mit gesteigerter Leistungsdichte.

Der segmentierbare Torquemotor wurde je nach Verschaltung mit einer Leistung von 3, 9 oder 18 kW im Drehzahlbereich von 0 bis 3600 Umdrehungen pro Minute gebaut und erprobt. Durch die Ausnutzung des vergrößerten Rotordurchmessers als zusätzlichem Hebelarm entsteht eine Maschine mit hohem Drehmoment. Somit ist ein Ersatz von Getriebeübersetzungen bis $i = 32$ sinnvoll möglich (Bild 06).

Damit erweitert das Konzept den Einsatzbereich für heutige Torquemotoren und bietet eine zukunftsfähige Antriebstechnik für den industriellen Maschinenbau. Die modularen Segmentmotoren bieten sich insbesondere für den produktübergreifenden Aufbau von Antriebsbaugruppen mit gezielt abgestuften Leistungsklassen an. Der direkte Anbau an Applikationen mit größerem Durchmesser kommt der scheibenförmigen Bauweise des Motors entgegen. Fundamente, zusätzliche Kupplungen, Lagerungen und Wellen können eingespart werden (**Bild 14**, rechts).

Als weitere Stufe der Integration ist die Vollintegration der Rotorstruktur in die Struktur der anzutreibenden Maschine möglich, da der Rotor weder Magnete noch einen Läuferkäfig enthält. Der Rotor besteht nur aus gestanzten Blechen und ist überaus robust.

Ziel des derzeit laufenden Exist-Forschungstransferprojektes ist es, eine abgestufte Produktreihe von Standardmotoren und Einbaumotoren zu entwickeln und in eine industrielle Verwendung in diversen Applikationsfeldern zu überführen. Die mittels der Segmente abbildbare Motorpalette soll zukünftig von wenigen Kilowatt bis zu großen Leistungen skalierbar sein und einen großen Drehzahlbereich abdecken.

Die entwickelte modulare Antriebstechnologie für drehzahlvariable Sonderantriebe kann in der industriellen Umsetzung eine effiziente, flexible und in Serie kostengünstige Antriebsform für Sondermaschinen aller Art bieten.

Fotos: 01–06 und 12–14: Torque Werk 2018

Literaturverzeichnis:

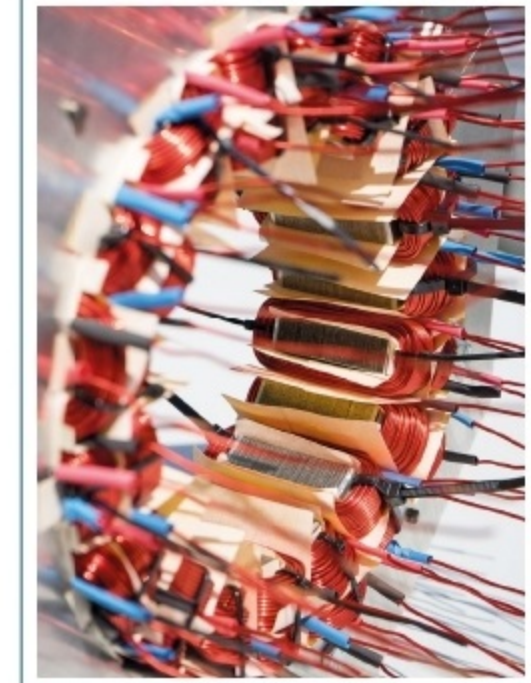
- [1] Boldea, I. (1996). *Reluctance Synchronous Machines and Drives* (1. Ausg.). Oxford: Clarendon Press
- [2] Doncker, R. D., Pülle, D. W., & Veltman, A. (2011). *Advanced Electrical Drives*, Springer
- [3] Lange, T., Weiss, C., & De Doncker, R. (12 2017). *Key Factors for the Design of Synchronous Reluctance Machines with Concentrated Windings*. IEEE PEDS2017
- [4] Lehner, B., & Gerling, D. (2016). *Design Considerations for Concentrated Winding Synchronous Reluctance Machines*. IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC-Asia-Pacific), Busan, S. 485–490
- [5] Nürnberg, W. (1962). *Die Asynchronmaschine*. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag OHG
- [6] Ponomarev, P., Alexandrova, Y., Petrov, I., Lindh, P., & Lomanova, E. (November 2014). *Inductance Calculation of Tooth-Coil Permanent Magnet Synchronous Machines*. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 61, NO. 11
- [7] TorqueWerk. (31. Januar 2018). *TorqueWerk.de*. Abgerufen am 31. Januar 2018 von [TorqueWerk.com: https://torquewerk.de/en/](https://torquewerk.de/en/)

Förderhinweis

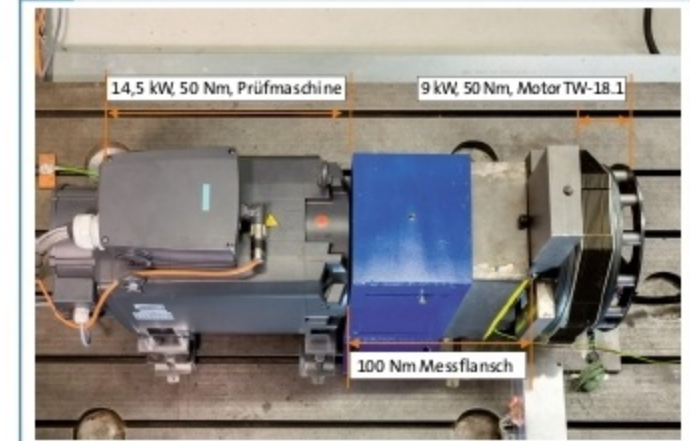
Das Projekt Torque-Drive (03EFHNW135) wird im Rahmen des Exist-Programms durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und den Europäischen Sozialfonds gefördert.



12 Bau des 150-mm-Referenzmotors, hier mit Montage der Zahnspulen



13 Referenzmotor (TW-18.1) und Prüfstand



14 Konzept des segmentierten Einbaumotors, (links) klassischer Antrieb, (rechts oben) angebauter Einbaumotor, (rechts unten) integrierter Direktantrieb

