Produktionsverfahren elektrischer Maschinen

17

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Benjamin Dorn, Michael Nankemann, Andreas Kraus, Christian Stäck und Henrik Born

Unabhängig von der Art der Energiebereitstellung, sei es durch einen Hochvoltspeicher wie einer Lithium-Ionen-Batterie oder durch eine Brennstoffzelle: Im elektrifizierten Fahrzeug sind eine oder mehrere elektrische Maschinen für den Antrieb verantwortlich.

H. H. Heimes
Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker
Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

B. Dorn
Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: b.dorn@pem.rwth-aachen.de

M. Nankemann
Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: m.nankemann@pem.rwth-aachen.de

A. Kraus (✉)
Senior Expert Data Engineering, PowerCo SE, Salzgitter, Deutschland
E-Mail: a.kraus@pem.rwth-aachen.de

C. Stäck · H. Born
Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail:c.staeck@pem.rwth-aachen.de; h.born@pem.rwth-aachen.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Kampker, H. H. Heimes (Hrsg.), *Elektromobilität*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-65812-3_17

Wie in Kap. 9 eingeführt, gibt es unterschiedliche Motortopologien. Aufgrund der besonderen produktbezogenen Bedeutung des Blechpakets der elektrischen Maschine wird im folgenden Kapitel das Herstellungsverfahren thematisiert. Aus produktionstechnischer Sicht ist insbesondere die Rotorproduktion als Differenzierungsmerkmal zwischen diesen Topologien zu beachten. Dabei werden auch unterschiedliche Möglichkeiten betrachtet, Technologien zur Produktion des Stators der elektrischen Maschine miteinander zu kombinieren. Aufgrund ihrer steigenden Bedeutung im Kontext der Traktionsanwendung im elektrischen Fahrzeug wird ein Hauptaugenmerk auf die Flachdraht-Technologie („Hairpin“) gelegt. Abschließend werden die Qualitätssicherung in der Produktion elektrischer Maschinen und unterschiedliche Aspekte der Montage beschrieben.

17.1 Herstellung des Elektroblechpakets

Um Wirbelstromverluste zu reduzieren, bestehen Blechpakete als Eisenkerne der aktiven Komponenten von Elektromotoren aus Paketen weichmagnetischen Elektroblechs. Das in der Automobilbranche zur Herstellung von Blechpaketen verwendete Elektroblech hat üblicherweise eine Materialstärke von zirka 0,3 Millimetern und ist mit einer wenige Mikrometer dünnen Isolationsschicht versehen.[1] Geringe Blechdicken von 0,2 Millimetern kommen meist nur in Hochleistungsanwendungen zum Einsatz, da den verbesserten Produkteigenschaften erhöhte Produktionskosten sowohl in der Rohmaterialherstellung als auch in der Verarbeitung gegenüberstehen. Für die Herstellung eines Elektroblechpakets werden einzelne Blechlamellen aus Rohmaterialband oder -tafeln ausgeschnitten und zu einem Stapel geschichtet, der im Anschluss zu einem kompakten Paket verbunden wird (vgl. Abb. 17.1). Für diese Prozessschritte existieren verschiedenen Verfahrensalternativen.

Der Produktionsprozess beginnt mit dem Zuschnitt des als Coil oder in tafelform gelieferten Elektroblechs. In Kleinserien beziehungsweise für Prototypenanwendungen werden meist Elektroblechtafeln im Laserstrahlschneideverfahren zugeschnitten. Dieser Prozess erlaubt eine flexible Gestaltung der Blechkontur, ist jedoch mit vergleichsweise hohen Zykluszeiten verbunden. Zusätzlich nimmt die entstehende Hitze negativen Einfluss auf die Kornstruktur und damit auf die elektromagnetischen Eigenschaften des Blechs.[2] Die geschnittenen Bleche müssen in einem separaten Prozessschritt manuell oder automatisiert gestapelt werden. Dies gilt ebenfalls für Bleche, die im Einzelnutungsverfahren hergestellt werden. Dabei erfolgt für jede Teilgeometrie der Blechkontur – beispielsweise jede Nut eines Statorblechs – ein einzelner Stanzhub. Dementsprechend groß ist die Zykluszeit, so dass dieses Verfahren lediglich bei der Herstellung von großen Generatoren, unter anderem für Windkraftanlagen, zur Anwendung kommt. Vor allem in der Großserienproduktion ist das Stanzen im Folgegesamtschnitt die wirtschaftlichere Alternative. Auf Schnellläuferpressen werden mit durchschnittlich 200 bis 300 Hüben pro Minute ganze Blechpakete in

[1] Vgl. Doerr et al. 2018, S. 20; Vgl. Leuning et al. 2019, S. 185.

[2] Vgl. Naumoski 2018, S. 41ff.

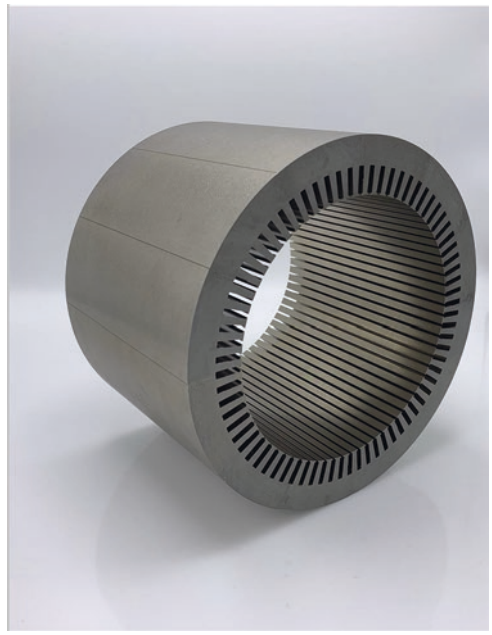


Abb. 17.1 Statorblechpaket eines Asynchronmotors. (Lifa AG)

wenigen Minuten hergestellt. Dazu wird das Elektroband durch eine Vorschubeinheit vom Coil abgewickelt und im Stanztakt über den Stanztisch geführt. Das ein bis drei Meter lange Stanzwerkzeug schneidet die vorgesehene Blechkontur innen beginnend in mehreren Schritten aus dem Coil. Im Sinne der effizienten Nutzung des Rohmaterials werden Rotor und Stator häufig in einer integrierten Anordnung gestanzt. Die fertigen Blechschnitte werden mit dem Stanzhub automatisch in der Matrize des Werkzeugs gestapelt. Aufgrund erheblicher Anlagenkosten ist dieses Verfahren insbesondere in der Großserienfertigung rentabel und zusätzlich durch hohe Werkzeugkosten in der Variantenflexibilität beschränkt.[3]

Das Verbinden der Blechlamellen zu einem kompakten Paket – als „Paketieren" bezeichnet – geschieht kraft- oder stoffschlüssig. Eine kraftschlüssige Verbindung der Bleche kann bereits im Stanzwerkzeug hergestellt werden, indem jedes Blech mit Hilfe von Durchsetzungen mit dem vorangegangenen Blech verbunden wird.[4] Dieses als „Stanzpaketieren" bezeichnete Verfahren ist mit Verlusten der Motorleistung verbunden, da die veränderte Kornstruktur des Blechs sowie mögliche Schäden an der Isolationsschicht störende Wirbelströme verursachen. Um diese Verluste zu begrenzen, werden die Durchsetzungen in elektromagnetisch weniger relevanten Randbereichen positioniert. Alternativ besteht die Möglichkeit, Bleche durch Verschweißen oder Verkleben stoffschlüssig zu paketieren. Werden Blechlamellen mit einer Schweißnaht ver-

[3] Vgl. Kolbe 2020, S. 357; Vgl. Schuler Pressen GmbH 2021, S. 4.

[4] Vgl. Kolbe 2020, 387.

sehen, sind aufgrund von elektrischen Verbindungen und Veränderungen der granularen Struktur ebenfalls Wirbelströme die Folge. Konstruktions- und prozessbedingt können Schweißnähte an Blechpaketen lediglich am äußeren Rand angebracht werden. Dies führt zum einen dazu, dass die Schweißnähte beim Stator im Randbereich liegen und die Verluste aus Wirbelströmen gering ausfallen; zum anderen würden Schweißnähte außen am Rotor genau im Luftspalt zwischen Rotor und Stator liegen und damit erheblichen Einfluss auf die elektromagnetischen Eigenschaften des Motors nehmen. Daher findet das Schweißen von Rotorblechen bei Elektromotoren mit innenliegendem Rotor keine Anwendung. Elektrisch leitende Verbindungen zwischen den Blechen und deren negative Auswirkungen auf die Produkteigenschaften werden bei Klebeverbindungen weitestgehend vermieden. Im Klebeprozess wird ein Klebstoff – zum Beispiel Cyanacrylat – mittels einer Düsenanordnung vor dem Stanzprozess einseitig auf das Blech aufgetragen. Das Aushärten des Klebstoffs erfolgt bei Raumtemperatur oder unter Erwärmung bis hin zu Temperaturen von 100 °C.[5] Neben dieser Form des Klebens hat sich das sogenannte Backlackverfahren etabliert. Dabei tritt ein wärmevernetzendes Epoxidharz an die Stelle des üblicherweise verwendeten Isolierlacks. Das separate Aufbringen von Klebstoff direkt vor dem Stanzprozess entfällt. Die gestanzten Bleche werden gestapelt in eine Backvorrichtung eingespannt und bei Temperaturen zwischen 200 und 300 °C unter Druck (>1 MPa) mehrere Stunden lang zu einem Paket verbacken.[6] Durch die vollflächige Verbindung der Lamellen entsteht ein Paket mit hoher Festigkeit und sehr guten elektromagnetischen Eigenschaften. Den produktseitigen Vorteilen stehen jedoch erhöhte Kosten mit Blick auf das Rohmaterial und den Anlagenbedarf sowie lange Prozesszeiten entgegen.

Eine deutliche Reduktion des Verschnitts und damit des Kostentreibers Rohmaterial lässt sich durch eine Segmentierung des Stators erzielen – also durch die Aufteilung der Statorgeometrie in Ringausschnitte, die bei günstiger Werkzeuggestaltung verschnittreduziert gestanzt werden können. Diese Bauform ist zusätzlich mit dem Vorteil verbunden, dass Rotor- und Statorbleche unabhängig voneinander gestanzt werden und die Materialparamater des Elektroblechs damit anforderungsgerecht wählbar sind. Im Falle einer Segmentierung des Stators werden die einzelnen Teilsegmente im paketierten Zustand, beispielhaft in Abb. 17.2 dargestellt, zu einem fertigen Stator gefügt.

Von den verschiedenen Verfahrensalternativen zur Herstellung einer Blechkontur ist für die Stückzahlen einer Großserienfertigung also lediglich der Folgegesamtschnitt geeignet. Bei der Wahl des Paketierverfahrens steht der Kompromiss zwischen Produkteigenschaften und Kosten im Vordergrund. Das vor allem in der Großserie wirtschaftliche Stanzpaketieren ist mit produktseitigen Limitationen behaftet, wohingegen die guten elektromagnetischen Eigenschaften verbackener Pakete mit höheren Materialkosten und längeren Prozesszeiten erkauft werden. Die Segmentierung des Stators ist ein möglicher Weg, den hohen Materialkosten entgegenzuwirken.

[5] Vgl. von Lindenfels et al. 2019, S. 415.

[6] Vgl. Voestalpine 2021, S. 4.

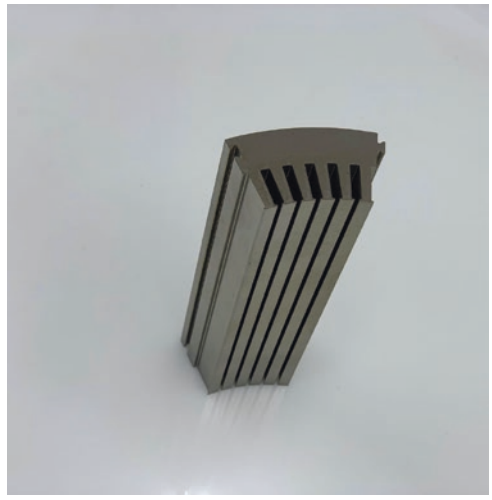


Abb. 17.2 Backpaketiertes Teilsegment eines Asynchronmotors. (SWD Stator und Rotortechnik AG)

17.2 Rotorproduktion

Im Rahmen der Rotorfertigung unterscheiden sich die zugrundliegenden Technologieketten zwischen den einzelnen Erregungsprinzipien maßgeblich (vgl. Abb. 17.3). Im Folgenden werden diese Unterschiede herausgearbeitet und die für die Fertigung eingesetzten Technologien beschrieben. Während in FSM Wickeltechnologien zum Einsatz kommen – vergleichbar zur Statorfertigung – und die Produktion von ASM insbesondere durch die urformende Herstellung des Käfigs geprägt ist, werden für die Produktion von PMSM-Rotoren Magnete montiert. Gemeinsame Bestandteile der Fertigungskette aller drei Rotortypen sind die Produktion der Rotorwelle, das Fügen der Welle in das Rotorblechpaket sowie das Auswuchten (vgl. Abb. 17.3). Diese Gemeinsamkeiten werden im Folgenden kurz erläutert, bevor sich die anschließenden Abschnitte den Prozessketten der FSM, PMSM und ASM widmen.

Die finale geometrische Form der Rotorwellen wird durch spanende Fertigungsverfahren aus dem Bereich der Hartbearbeitung hergestellt.[7] Zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften folgt darauf eine Einsatzhärtung, die aus den Prozessschritten Aufkohlen, Härten und Anlassen besteht.[8] Abschließend wird durch eine erneute spanende Hartbearbeitung – etwa durch Schleifen – die Oberflächengüte erhöht.

[7] Vgl. Fleischer et al. 2020.

[8] Vgl. Heco 2021.

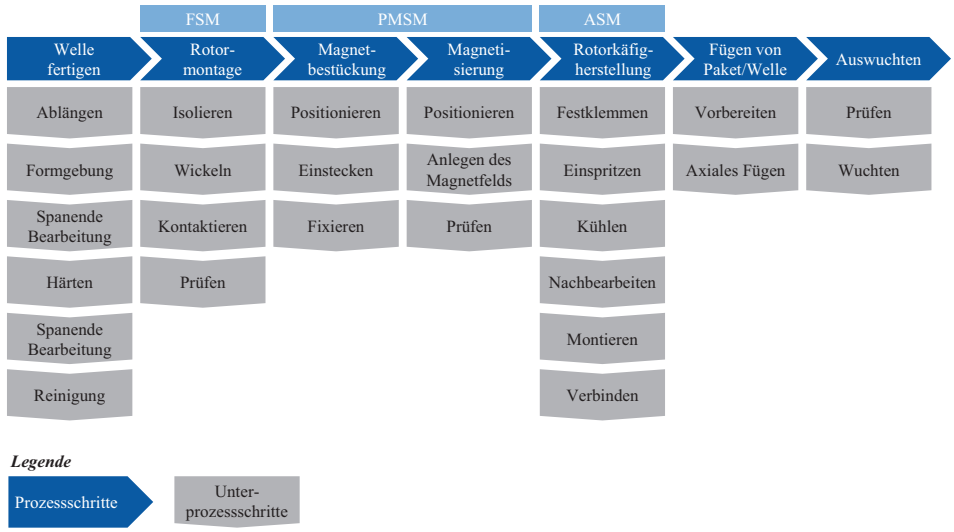


Abb. 17.3 Prozessschritte der Rotorproduktion

Zur Fügung der Welle in das Blechpaket existieren verschiedene Technologie-Alternativen.[9] Beim Eindehnen wird die Rotorwelle gekühlt und anschließend im geschrumpften Zustand in das Blechpaket gefügt. Der Temperaturausgleich führt zur Ausbildung eines Presssitzes. Üblicherweise wird in der Serienfertigung zur Kühlung der Welle Stickstoff eingesetzt. Beim Aufschrumpfen wird das Blechpaket entweder durch Induktion oder in einem Ofen erwärmt und die Welle anschließend in das ausgedehnte Blechpaket kraftlos gefügt. Sowohl durch Eindehnen als auch durch Aufschrumpfen werden Welle und Blechpaket während des Temperaturausgleichs kraftschlüssig gefügt. Möglich ist auch eine Kombination der beiden beschriebenen Verfahren. Beim Einpressen wird die Welle ohne thermische Vorbehandlung mit Kraft in das Blechpaket gefügt, so dass durch eine Passungsweitung die beiden Bauteile kraftschlüssig miteinander verbunden werden. Eine weitere Möglichkeit der Verbindung von Blechpaket und Rotorwelle stellt die Verwendung einer Passfeder dar. Diese kann mittels Einschlagen, Einlegen oder Einkleben montiert werden. Zur axialen Sicherung kommt in der Regel ein Sicherungsring zum Einsatz. Die Verwendung einer Passfeder entspricht dabei einer formschlüssigen Verbindung.[10]

Rotoren werden am Ende der Prozesskette ausgewuchtet, um etwaige Unwuchten zu neutralisieren. Dabei kann entweder das additive Wuchten oder das subtraktive Wuchten eingesetzt werden.[11] Beim additiven Wuchten wird dem Gesamtsystem an definierten Punkten Masse hinzugefügt – beispielsweise durch Auftragsschweißen. Beim subtraktiven

[9] Vgl. Hinzen 2018, S. 125 ff.

[10] Vgl. Fleischer et al. 2020.

[11] Vgl. Wossner et al. 2018, S. 1ff.

Wuchten, das derzeit den Stand der Technik darstellt, wird dem Gesamtsystem an definierten Punkten Masse entnommen. Üblicherweise werden dabei Bohrungen in die an den axialen Enden des Rotors befestigten Wuchtscheiben eingebracht.

17.2.1 Fremderregte Synchronmaschine (FSM)

Zu Beginn der FSM-Fertigung werden die Pole isoliert, die später die gewickelten Spulen aufnehmen. Für diesen Prozessschritt werden ähnliche Technologien wie zur Isolation der Statornuten eingesetzt. Nach der Isolation folgt die Bewicklung der Pole und somit der Kernprozess zur Fertigung von FSM. Die hierfür verwendeten Wickeltechnologien entsprechen den in Abschn. 17.3 (Statorproduktion) beschriebenen Verfahren. Nach der Bewicklung folgt die Montage eines Schleifrings, der in der Regel aus Kupfer hergestellt wird. Anschließend werden die Spulen mit dem Schleifring verbunden, der während des späteren Betriebs wiederum mit einer Gleichstromquelle verbunden ist. An Schleifringen kann während des Betriebs Verschleiß auftreten, wodurch die FSM im Gegensatz zur ASM und zur PMSM nicht wartungsfrei ist.[12] Um den Wartungsaufwand für FSM zu reduzieren, wurden alternative Lösungsansätze entwickelt, bei denen die Bestromung beispielsweise über Induktion realisiert wird. Durch solche Entwicklungen lässt sich der Vorteil der Wartungsfreiheit mit dem Verzicht von seltenen Erden im Rotor kombinieren.[13] Am Ende der Prozesskette wird eine Prüfung der FSM-Rotoren vorgenommen, bei der durch testweise Bestromung oder induktive Verfahren die Wicklungen getestet werden. Relevante Prozessparameter sind dabei zum einen der Drahtzug bei der Wicklung der Spulen und zum anderen die Rotationsgeschwindigkeit des Halbzeugs. Die Qualität der Rotoren wird in erster Linie durch den Füllfaktor, Drahtbeschädigungen und Isolationsbeschädigungen charakterisiert.

17.2.2 Permanenterregte Synchronmaschine (PMSM)

Die Kernkomponente des PMSM-Rotors sind die in den Rotor integrierten Permanentmagneten. Im Folgenden wird die Herstellung von Rohmagneten, ihre Magnetisierung sowie ihre Montage in das Rotorblechpaket beschrieben.

Zur Herstellung von Neodym-Magneten werden in einem Vakuumschmelzofen zunächst die verschiedenen Bestandteile der Legierung zu einer homogenen Masse verbunden. Anschließend werden die ausgehärteten Materialblöcke zu einem feinen Pulver vermahlen. Es folgt die Pressung des Pulvers in einem Magnetfeld. Danach werden die vorgepressten Pulverblöcke in einem Vakuumsinterofen gesintert. Bei Bedarf können die Rohblöcke im Anschluss noch mit Diamantwerkzeugen auf die gewünschte Form zu-

[12] Vgl. Schäfer 2018.

[13] Vgl. MAHLE GmbH 2021.

geschnitten werden. Vor der Magnetisierung wird je nach Materialzusammensetzung noch die Oberfläche der Magneten behandelt, um einen Korrosionsschutz aufzubauen. Der folgende Prozessschritt ist die Magnetisierung, die entweder direkt im Anschluss an die Oberflächenbehandlung oder erst nach der Montage der Magneten vorgenommen werden kann.[14] Beide Varianten sind im Kontext der PMSM-Rotorproduktion möglich und werden im Folgenden beschrieben.

Durch eine Magnetisierung vor der Magnetmontage wird der Montageprozess hinsichtlich Handling und Automatisierbarkeit erschwert. Die Magnetisierung wird durch ein extern angelegtes, starkes Magnetfeld erreicht. Das äußere Magnetfeld wird durch eine von einem Kondensator gespeisten Spule appliziert, wobei das äußere Magnetfeld über eine größere Sättigungsfeldstärke als die zu magnetisierenden Magnete verfügt. Die Folge ist eine irreversible Ausrichtung der Magnetspins bei Permanentmagneten. Relevante Prozessparameter, die bei der Magnetisierung zu berücksichtigen sind, sind Pulsfrequenz, Stromstärke und Außentemperatur. Ein übliches Qualitätsmerkmal des Prozesses ist die Magnetsättigung des Magnets. Wird die Magnetisierung erst nach der Magnetmontage durchgeführt, so wird ebenfalls ein starkes äußeres Magnetfeld appliziert. Dabei werden jedoch mehrere Spulen verwendet, und der Prozess muss in Abhängigkeit von der Rotorarchitektur mehrfach wiederholt werden. Dies kann wiederum die Entmagnetisierung von anderen Magneten verursachen. Die relevanten Prozessparameter und Qualitätsmerkmale entsprechen denen der Magnetisierung vor der Montage, wobei zusätzlich noch die gleichmäßige Magnetsättigung als Qualitätsmerkmal zu berücksichtigen ist.

Um das Blechpaket mit Magneten zu bestücken, können verschiedene Technologien eingesetzt werden. Es wird hierbei konstruktiv zwischen vergrabenen und oberflächennahen Magneten unterschieden. Bei vergrabenen Magneten können die Technologien „Einpressen“, „Verstemmen“ oder „Kleben“ zur Befestigung eingesetzt werden. Oberflächennahe Magneten werden durch eine Bandagierung am Blechpaket des Rotors befestigt. Beim Einpressen werden die magnetisierten oder auch noch unmagnetisierten Magnete von einem Greifer aufgenommen und in Fügerichtung in die Rotornuten gepresst. Beim Verstemmen werden die Magnete nach dem Fügeprozess im Blechpaket verstemmt und somit axial fixiert. Diese axiale Fixierung der Magnete erfolgt über eine plastische Deformierung vorgesehener Konturbereiche im Blechpaket. Beim Kleben wird der Klebstoff über Düsen in die Nuten des Rotorblechpakets eingeführt; anschließend werden die Magnete in die Nuten gefügt. Der Aushärteprozess des Klebstoffs erfolgt üblicherweise thermisch in einem Ofen. Beim Bandagieren als letzte Variante werden die Magnete zunächst temporär auf dem Umfang des Rotorblechpakets fixiert und anschließend für eine dauerhafte Fixierung mit epoxidharzgetränkter Kohlefaser umwickelt. Dies dient zusätzlich als mechanischer Schutz der Magnete.[15]

[14] Vgl. Franke et al. 2011.

[15] Vgl. Fleischer et al. 2020.

17.2.3 Asynchronmaschine (ASM)

Kernprozess der Rotorfertigung für ASM ist die Herstellung des Rotorkäfigs. Dabei wird zwischen der Herstellung durch Druckguss und der Herstellung durch Fügeprozesse unterschieden. Für den Druckgussprozess wird zunächst das Blechpaket festgeklemmt und somit in das Gusswerkzeug integriert. Anschließend wird flüssiges Aluminium oder Kupfer eingespritzt und somit das Druckgussverfahren ausgeübt. Sobald das geschmolzene Metall in den Gusswerkzeugraum gelangt, beginnt es abzukühlen und dadurch zu erstarren. Abschließend wird das Gussteil nachbearbeitet, wodurch die Angusslunker entfernt werden. Die für den Prozess relevanten Parameter sind der Anpressdruck, die Anpresszeit, die Schmelztemperatur, die Abkühlzeit, der Sauerstoffgehalt sowie die Legierungszusammensetzung. Als relevante Qualitätsmerkmale werden in der Regel der Füllfaktor und die Porosität herangezogen. Die Verwendung von Kupfer anstelle von Aluminium reduziert die Verluste während des Betriebs des Motors, was mit einer Erhöhung des Wirkungsgrades einhergeht. Aufgrund der geringeren Verluste durch die Verwendung von Kupferdruckguss ist es möglich, eine verminderte Motorkühlung zu wählen, wodurch sich in der Regel auch der benötigte Bauraum reduziert.[16] Als Alternative zur Käfigherstellung können ebenfalls vorgegossene Kupferstäbe und -ringe zusammengesteckt werden. Nach diesem Montageschritt werden die Kupferstäbe und -ringe mittels Schweiß- oder Lötverfahren stoffschlüssig miteinander verbunden. Die zu berücksichtigenden Prozessparameter sind dabei die Temperatur, der Druck und die Haltezeit. Das relevante Qualitätskriterium ist die Leitfähigkeit der Fügestellen.

17.3 Statorproduktion

Der Stator ist der feststehende Teil eines Elektromotors und dient der Erzeugung eines magnetischen Drehfeldes. Die Kernbestandteile des Stators sind das Blechpaket, die Spulenwicklung und das Isoliersystem sowie Komponenten zur Verschaltung und zur geometrischen Wicklungsführung (Abb. 17.4).

Die Wicklung wird in der Regel aus dem Halbzeug Kupferlackdraht hergestellt. Die Kupferlackdrahtproduktion wird in Abschn. 17.3.1 beschrieben.

Im Allgemeinen gliedert sich die Statorproduktion in die vier Teilprozesse „Nutisolation“, „Spulenwicklung“, „Sekundärisolation“ sowie „prozessbegleitende Prüfprozesse“.

Im Prozessschritt „Nutisolation“ werden die Statornuten isoliert, um das Blechpaket von der später einzulegenden Spulenwicklung elektrisch zu separieren.

Der Prozess der Spulenwicklung befasst sich mit der Herstellung und Einbringung des elektrischen Leitermaterials – in der Regel Kupferlackdrähte – in den Spulenkörper. Im Umfeld der automobilen Traktionsantriebe werden vorrangig klassische Wickelverfahren

[16] Vgl. Kienle + Spiess GmbH 2021.

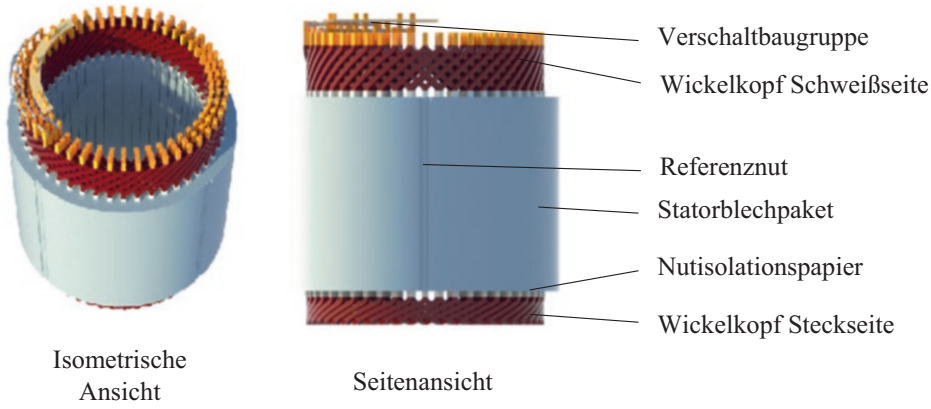


Abb. 17.4 Schematischer Aufbau eines Stators. (Exemplarisch in der Hairpin-Bauweise)

und montageseitig geprägte Steckspulensysteme wie die Hairpin-Technologie angewendet.[17] In Abschn. 17.3.2 werden die Prozessalternativen der Wicklungsherstellung vorgestellt.

Durch die Sekundärisolation, die zum Beispiel im Imprägnier- oder Vergussverfahren aufgebracht wird, wird der Stator zusätzlich in einem nachgelagerten Isolationsprozess isoliert. Dieser Schritt garantiert eine verbesserte Wärmeleitung durch die Schließung von Zwischenräumen in der Wicklung und bietet sowohl Fixierung als auch Schutz des Stators gegenüber äußeren Belastungen.

Die Nutisolation und die Sekundärisolation sind Bestandteile des Isoliersystems eines Stators (siehe Abschn. 9.4). Die Verarbeitung dieser Bestandteile wird in Abschn. 17.3.3 erläutert.

Die prozessbegleitende Prüfung beschäftigt sich mit der kostenoptimalen Qualitätssicherung des Stators. Sie wird zwischen verschiedenen Produktionsschritten vorgenommen. Ziel ist dabei, Fehler zu erkennen, bevor eine Nacharbeit nicht mehr möglich ist. Der für diesen Fall kritische Prozessschritt unterscheidet sich je nach Statorausführung. Bei herkömmlichen, gewickelten Statoren liegt er in der Regel im Wickelprozess, bei Hairpin-Statoren nach dem Prozessschritt des Kontaktierens der Hairpins. Außerdem wird eine elektrische Prüfung des fertigen Stators auf Funktionsfähigkeit vorgenommen. Dies erfolgt in der Regel durch Hochspannungs- und Widerstandsprüfungen (siehe Abschn. 17.4).

Mit dem zunehmenden Elektromotorenbedarf im Traktionsbereich steigt auch die Variantenvielfalt der Statoren. Die hohe Varianz in der Statorgestaltung führt zu einem diversifizierten Produktionstechnologie-Portfolio.

[17] Vgl. Fleischer et al. 2017.

17.3.1 Kupferlackdrahtproduktion

Die zentrale Komponente in der Statorproduktion ist der stromführende Kupferlackdraht. Insbesondere aufgrund des guten Verhältnisses zwischen optimalen elektrischen und thermischen Leitfähigkeiten bei gleichzeitig moderaten Kosten wird Kupfer für stromführende Teile im Elektromotor verwendet. Das elektrisch leitende Kupfer ist von einer isolierenden Lackschicht umgeben, um die stromführenden Drähte einerseits voneinander und andererseits vom Statorblechpaket elektrisch zu trennen. Je nach Art des Wickelverfahrens, wird Kupferlackdraht mit rundem oder mit rechteckigem Drahtquerschnitt eingesetzt, wobei Draht mit rechteckigem Querschnitt vorwiegend mit hoher Biegesteifigkeit zur Fertigung von Elektromotoren mit Steckspulen-Wicklungen zum Einsatz kommt (siehe Abschn. 17.3.2).

Die Wertschöpfung der Produktion von isoliertem Kupferdraht besteht aus zwei Schritten. Zunächst wird der blanke Kupferdraht hergestellt, wobei zwei verschiedene Produktionsverfahren zum Einsatz kommen (vgl. Abb. 17.5).

Ausgangsmaterial beim Prozess des Drahtziehens von Kupferdrähten ist ein per Stranggussverfahren hergestellter Kupferstrang. Dieser wird vorgewalzt und vorgewärmt im eigentlichen Ziehprozess durch eine Vielzahl sogenannter Zieheisen gezogen. Durch die Zieheisen wird der Kupferdraht von Ziehstufe zu Ziehstufe in Abhängigkeit vom Durchmesser der entsprechenden Ziehsteinbohrung verringert. Die Anzahl der Ziehstufen ist abhängig vom gewünschten Drahtdurchmesser. Das Drahtziehen ist für eine hohe Varianz von Drahtquerschnitten und Geometrien – beispielsweise rund, rechteckig, trapezförmig oder hohl – geeignet.

Ausgangsmaterial bei der Produktion von Kupferdraht mit dem Walzprozess ist ein durch das Drahtziehverfahren hergestellter Runddraht. Dieser wird senkrecht zur Walzenachse durch einen Walzspalt geführt, um so Durchmesser beziehungsweise Höhe des Drahtes zu ändern. Das Verfahren kommt vorwiegend bei der Erzeugung definierter, viereckiger Geometrien wie Rechteck oder Trapez zum Einsatz.[18]

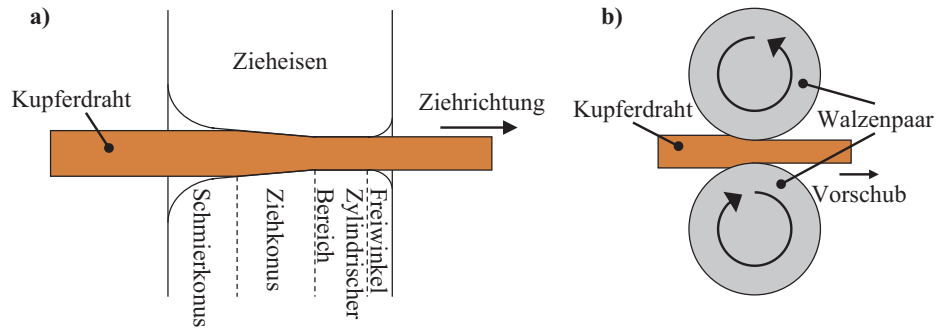


Abb. 17.5 Funktionsprinzip (**a**) des Ziehverfahrens und (**b**) des Walzverfahrens

[18] Vgl. Hagedorn et al. 2016.

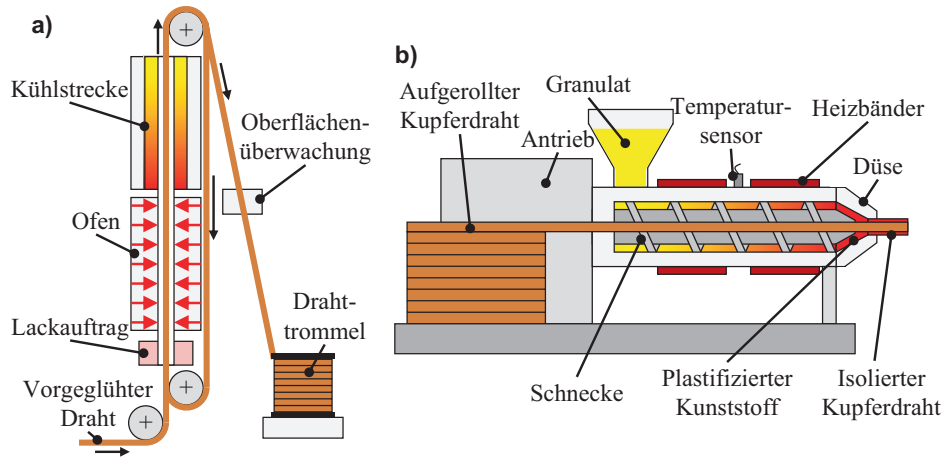


Abb. 17.6 Funktionsprinzip (**a**) des Lackierverfahrens und (**b**) des Extrusionsverfahrens

Abhängig von der gewählten Drahtisolation, werden ebenfalls zwei Verfahren zur Beschichtung unterschieden (vgl. Abb. 17.6).

Beim Lackierprozess wird der vorgeglühte Draht in die flüssige Isolation – etwa Polyimid (PI) oder Polyamidimid (PAI) – getaucht und das überschüssige Isolationsmaterial in nachfolgenden Matrizen abgestreift, so dass eine ebene Schicht der Isolation auf dem blanken Kupferdraht haften bleibt. In einem nachgelagerten Ofen verdampfen die Lösemittel in der flüssigen Isolation. Auf den Ofen folgt eine Kühlstrecke, wo der isolierte Draht von der Ofentemperatur ausgehend kontrolliert heruntergekühlt wird, wodurch die aufgetragene Isolation aushärtet. In Abhängigkeit von der gewünschten Isolationsschichtdicke durchläuft der Draht den Lackauftrag einschließlich des darauffolgenden Ofens sowie der Kühlstrecke mehrmals. Zur besseren Haftung des Isolationslackes kann vorab eine Grundierung aufgetragen werden. Neben einer potenziellen Grundierung sind vor allem die Parameter beim Lackierprozess – zum Beispiel die Ofentemperatur oder die Anzahl der aufgetragenen Schichten pro Durchlauf – von hoher Relevanz für die Flexibilität und die Adhäsion der Isolation auf dem Kupferdraht.

Bei der Beschichtung des Drahtes durch den Extrusionsprozess wird Kunststoffgranulat durch Heizbänder erhitzt, und eine Extrusionsschnecke presst den plastifizierten Kunststoff aus einer Düse heraus. Der blanke Kupferdraht durchläuft den Extruder ebenfalls und wird am Düsenausgang mit dem plastifizierten Kunststoff ummantelt. Der Kunststoff härtet im Anschluss aus und bleibt so am Draht haften. Durch den Extrusionsprozess wird die Isolationsschicht in einem Schritt aufgetragen. Für den Anwendungsbereich der Hairpin-Technologie werden als Isolationsmaterialien Polyetheretherketon (PEEK) oder Polyimid (PI) verwendet.

Die technischen Lieferbedingungen und Eigenschaften von lackisolierten Rund- und Flachdrähten werden in der DIN EN 60317[19] spezifiziert. Die dazugehörigen Prüfver-

[19] Vgl. DIN e.V. 2014.

fahren gehen aus der DIN EN 60851[20] hervor. Infolge der hohen automobilen Qualitätsanforderungen entspricht die Norm jedoch in vielen Fällen nicht mehr dem Stand der Technik. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Nachfrage zur 800-Volt-Technologie im elektrischen Antriebsstrang wachsen die Anforderungen an die elektrischen Isolationssysteme von Kupferflachdraht als hochsensibler Bauteil in der Antriebseinheit immer weiter. Neben den Produktionsprozessen und deren Einfluss auf die Isolation rückt vor allem der Herstellungsprozess selbst zunehmend ins Blickfeld.

17.3.2 Wicklungsherstellung

Für Effizienz und Leistung des Elektromotors ist die Wicklung eines Stators von entscheidender Bedeutung. Aufgrund steigender Rohstoffpreise und des Bestrebens, kompaktere Elektromotoren herzustellen, ist außerdem die Geometrie der Kupferwicklungen von zunehmendem Interesse.

Das zentrale Bestreben bei der Auslegung und Produktion von Statoren besteht darin, die Packungsdichte des Kupfers in den Statornuten zu maximieren. Zur Beurteilung der Kompaktheit einer Wicklung eignet sich die dimensionslose Größe des Füllfaktors. Dabei wird zwischen elektrischem und mechanischem Füllfaktor unterschieden. Der elektrische Füllfaktor k_{el} beschreibt das Verhältnis des leitfähigen Leiterquerschnitts zum Querschnitt des zur Verfügung stehenden Wickelraumes in der Statornut. Der mechanische Füllfaktor k_{mech} beschreibt analog dazu die mechanische Ausfüllung des Wickelraumes unter Einbezug der Isolationsmaterialien. Da bei der Wicklung mit Draht zwangsläufig Hohlräume entstehen, die nicht ausgefüllt werden können, wie Abb. 17.7 verdeutlicht, ist der Füllfaktor stets kleiner eins.

In der Runddrahtwickeltechnik wird zwischen der wilden und der orthozyklischen Wicklung unterschieden. Bei der wilden Wicklung liegen die Drähte unsortiert neben- und übereinander, was dazu führt, dass kein optimaler Füllfaktor erreicht wird. Der mechani-

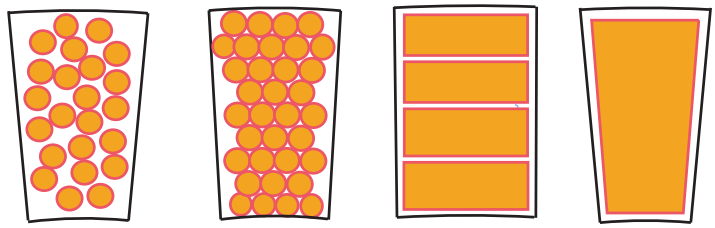


Abb. 17.7 Schematische Nutfüllung verschiedener Wicklungstopologien

[20] Vgl. DIN e.V. 2010.

sche Füllfaktor $k_{mech,\,max}$ beträgt etwa 73 %. Bei orthozyklischen Wicklungen liegen die Drähte der jeweiligen Oberwicklung in den Tälern der Unterwicklung. Diese Wicklungen zeichnen sich durch eine hohe Leistungsdichte, weniger Kupferverbrauch und bessere magnetische Eigenschaften aus. Theoretisch lässt sich ein mechanischer Füllfaktor von rund 91 % erreichen. In der Praxis sind diese Werte, unter anderem aufgrund der Wickelkörpergeometrie, nicht erreichbar. Es existieren jedoch Alternativen zur Bewicklung mit eckigen Profildrähten und sogenannten Formsteckspulen oder Hairpins, die den elektrischen Füllfaktor durch optimale Ausnutzung der Nutgeometrie weiter steigern können. Die theoretisch optimale Ausnutzung des Wickelraumes kann durch ein Einleitersystem – zum Beispiel als gegossene Spule – erzielt werden. Es ist zu beachten, dass das Bewicklungsverfahren stets einen Einfluss auf das Wickelschema – etwa über die Windungsanzahl – ausübt und somit auch die Eigenschaften und Charakteristika des elektrischen Antriebs beeinflusst.[21,22]

Darüber hinaus wird in der Wickeltechnik zwischen konzentrierten und verteilten Wicklungen unterschieden. Bei konzentrierten Wicklungen wird auf jedem Zahnpol über den Statorumfang eine Einzelwicklung erzeugt, und die Einzelsegmente werden anschließend verschaltet. Die homogene Verteilung der Spulenwicklung über den gesamten Umfang des Stators wird als „verteilte Wicklung“ bezeichnet und ermöglicht in der Regel homogenere Drehfeldqualitäten. Nachteilig ist jedoch der höhere Drahtverlegungsaufwand. Beim Bewickeln von Spulen entstehen sogenannte Wickelköpfe außerhalb des eigentlichen Spulenkörpers. Das Leitermaterial in den Wickelköpfen trägt nicht zur Drehmomenterzeugung des Elektromotors bei und senkt den Wirkungsgrad durch ohmsche Verluste und parasitäre Magnetfelder. Besonders bei konzentrierten Wicklungstopologien können die Wickelköpfe auf eine minimale geometrische Ausprägung reduziert werden, so dass axial kurzbauende Motoren erzielt werden können, die zum Beispiel Anwendung in Hybridantrieben in der Anordnung zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe finden. Die Länge des Stators, in der die Wicklung innerhalb des Blechpakets verläuft und damit zuträglich für die Drehfelderzeugung ist, wird als „aktive Länge“ bezeichnet. Für reine Fahr- und Traktionsantriebe kommt bevorzugt die verteilte Wicklung zum Einsatz, wobei die Leistung des Elektromotors einfach über die axiale Länge des Motors skaliert werden kann.[23]

Grundsätzlich erfolgt die Bewicklung eines Stators in einem Prozess aus vier Schritten: dem Terminieren, dem Wickeln und gegebenenfalls Einziehen, dem Abschneiden und dem Verschalten. Die Terminierung des Drahts bedeutet in diesem Zusammenhang die initiale Befestigung des Drahts am Wickelkörper. Im Anschluss erfolgt die eigentliche Bewicklung, deren unterschiedliche Technologien in den folgenden Abschnitten erläutert

[21] Vgl. Hagedorn et al. 2016.

[22] Vgl. Zerbe 2019.

[23] Vgl. Zerbe 2019.

werden (vgl. Abb. 17.8). Zuletzt wird die Befestigung des Drahtes durch Abschneiden wieder gelöst und die Drähte werden verschaltet.[24]

Die Wicklung eines Stators kann mit Hilfe zahlreicher Wickeltechnologien erzeugt werden. Vor allem die Spulenverteilung und das Verhältnis von Statorlänge zu Statordurchmesser hat eine Auswirkung auf die Wahl der Wickeltechnologie. Man unterscheidet zwischen den direkten Wickelverfahren, bei denen der Draht einzeln und unmittelbar in den Spulenkörper eingelegt wird, und den indirekten Wickelverfahren, bei denen die Wicklung zunächst außerhalb des Spulenkörpers vorbereitet und anschließend durch einen Zusatzprozess eingebracht wird. Klassische Vertreter der direkten Verfahren sind das Linear-, das Nadel- und das Flyerwickeln. Der Kategorie der indirekten Verfahren lassen sich zum Beispiel die Flyereinzugswicklung oder die Steckspulentechnologie zuordnen.[25,26]

In der Linearwickeltechnik wird der Draht mit einem sich in konstanter Geschwindigkeit bewegenden Drahtführer auf den rotierenden Formkörper gewickelt (vgl. Abb. 17.8 links). Dies ermöglicht eine kostengünstige, schnelle und gut parallelisierbare orthozyklische Drahtablage. Allerdings lassen sich mit der Linearwickeltechnik nur konzentrierte und vorrangig externe Wicklungen realisieren. Die Linearwickeltechnik eignet sich insbesondere für das Bewickeln rotationssymmetrischer Bauteile.[27]

Beim Nadelwickeln wird der Draht direkt in die Nuten eingezogen, wobei die Wickelnadel den Draht direkt im Stator ablegt (vgl. Abb. 17.8 Mitte). Dies bietet eine hohe Flexibilität, niedrige Werkzeugkosten und einen geringen Rüstaufwand, senkt allerdings

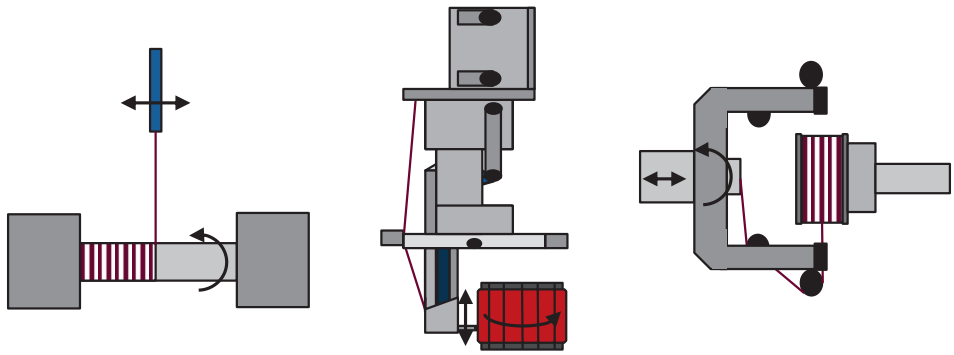


Abb. 17.8 Schematische Darstellung der klassischen Wickelverfahren. (In Anlehnung an vgl. Hagedorn et al. 2016)

[24] Vgl. Feldmann et al. 2014.
[25] Vgl. Hagedorn et al. 2016.
[26] Vgl. Fleischer et al. 2017.
[27] Vgl. Sequenz 1950.

aufgrund der Wickelnadeldurchfahrt den elektrischen Füllfaktor und ruft durch die notwendige Drahtvorspannung eine hohe Drahtbelastung hervor. Die Technologie eignet sich vor allem für kleinere Motoren, da sich dort flexible Wickelschemata ohne eine Segmentierung des Blechpakets realisieren lassen.

Das Flyerwickeln erhält seinen Namen vom sogenannten Flyerwickelarm, der den Draht in einer schnell rotierenden Bewegung aufwickelt (vgl. Abb. 17.8 rechts). Das zu bewickelnde Bauteil ist dabei stationär, was das wesentliche Unterscheidungsmerkmal zum Linearwickeln darstellt. Generell bietet das direkte Flyerwickeln eine kurze Taktzeit und eine relativ hohe Variantenflexibilität. Allerdings sind bei direktem Wickeln nur konzentrierte und wilde Wicklungen möglich.

Eine alternative Erweiterung des Flyerwickelns bieten die Einziehverfahren, die die Methode zum indirekten Wickelverfahren ausbauen. Dabei wird der Kupferlackdraht auf eine Schablone aufgewickelt oder als Luftspule gelegt und anschließend über ein Einbringwerkzeug in die Statornut eingezogen. Bei diesem Verfahren sind eine manuelle Nacharbeit und eine externe Kontaktierung der Drahtenden notwendig. Das Flyerwickeln ist bei geschlossenen Statoren die am häufigsten verwendete Wickeltechnologie. Vorteile bestehen in der Möglichkeit des Herstellens einer verteilten Wicklung sowie in den daraus resultierenden erhöhten elektrischen Füllfaktoren. Nachteile der Flyereinzugswicklung liegen in den langen Taktzeiten, einer hohen Drahtbeanspruchung und einem oftmals voluminösen Wickelkopf.[28]

Im Anschluss an den Wickelprozess erfolgt bei zahlreichen Verfahren die nachgelagerte Wicklungsbearbeitung. Dazu zählt zum Beispiel das Bandagieren des Wickelkopfes, das für die Stabilisierung von Wickelköpfen mit eingezogenen Wicklungen eingesetzt wird. Dieser Schritt ist zeitaufwendig und nur mit hohem Aufwand automatisierbar. Ein weiterer Prozess der Wicklungsbearbeitung kann das Zwischenformen von Wicklungen sein. Die Wicklung wird durch Presswerkzeuge in den Nutgrund gepresst, um den Füllfaktor zu erhöhen und sicherzustellen, dass Drähte vollständig in der Nut liegen. Im abschließenden Prozessschritt der Wicklungsherstellung erfolgt das Verschalten der einzelnen Teilwicklungen und Wicklungssegmente zu Phasen und zum gesamten Stator. Dieser Schritt ist je nach Stator-Topologie oder Wicklungsverfahren nicht immer automatisierbar und zudem durch äußerlich identisch erscheinende Wicklungen fehleranfällig.

Die klassischen Runddrahtwickelverfahren haben nicht nur den Nachteil niedriger Kupferfüllfaktoren aufgrund stochastischer Drahtverlegung, sondern sie erfüllen in vielen Anwendungen die hohen Anforderungen der Automobilindustrie an Qualität, Prozesssicherheit und -stabilität sowie geringe Stückkosten nur in unzureichendem Maße.

Große Potenziale zur Beseitigung dieser Produktionsschwächen bietet die Steckspulentechnologie in der Hairpin-Bauweise. Unter Hairpin-Spulen werden Steck- beziehungsweise Stabspulen verstanden, die aus massivem Profildraht oder aus sogenannten Kunststäben bestehen.[29] Um die Leiter in die notwendige Geometrie zur Erzeugung des

[28] Vgl. Hagedorn et al. 2016.

[29] Kunststäbe sind aus mehreren Einzelleitern zusammengefasste Stäbe.

Wickelschemas zu überführen, müssen aufgrund des massiven Drahtquerschnitts Umformprozesse gemäß DIN 8550-2 vorgenommen werden, bevor sie in die Nuten des Blechpakets eingebracht werden. Es handelt sich daher um ein indirektes Verfahren zur Wicklungsherstellung. Der Begriff „Hairpin“ basiert dabei auf der Geometrie des geformten Drahthalbzeuges, die der Form einer zwei- oder dreidimensionalen Haarnadel ähnelt. Auf den drahtformenden Prozess folgt ein Montageprozess zum Einbringen der Hairpins in das Blechpaket. Es wird zwischen der Segment-Hairpin-Wicklung und der kontinuierlichen Hairpin-Wicklung unterschieden.[30]

Aufgrund der vorgefertigten Geometrie der Hairpins lassen sich deutlich höhere elektrische Füllfaktoren von mehr als 70 % realisieren, was sich leistungssteigernd auswirkt (vgl. Abb. 17.7). Der zunehmenden Anforderung leistungsstärkerer Motoren kann zudem die Eignung von Steckspulen für axial lange Statoren gerecht werden. Eine Leistungsvariation von Elektromotoren wird oftmals über die Variation der aktiven Statorlänge gesteuert, da die Änderung des Spulendurchmessers erhebliche Konsequenzen für die gesamte Prozesskette implizieren kann. Außerdem weist die Produktion von Hairpin-Statoren gegenüber der klassischen Spulenwicklung eine höhere Prozesssicherheit auf. Als Nachteil von Hairpin-Statoren gilt die niedrige Variantenflexibilität, da die Hairpins der Statorgeometrie angepasst werden müssen.

Die Hairpin-Topologie umfasst drei verschiedene Hairpin-Ausführungen (vgl. Abb. 17.9). Die sogenannten U-Hairpins werden hufeisenförmig gebogen, so dass sie nur auf einer Seite kontaktiert werden müssen. Dies ermöglicht auf der Steckseite niedrigere

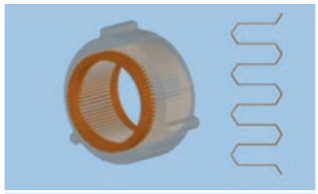
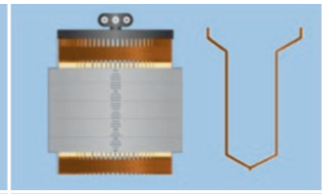
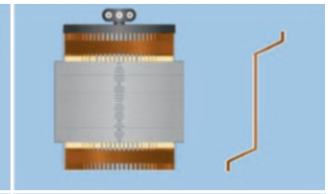
Kontinuierliche Hairpinwicklung	U-Hairpin	I-Hairpin
		
• Entfall der komplexen Schweißvorgänge • Hohe Komplexität der Biege- und Montagevorgänge • Beidseitig geringe Wickelkopfhöhe	• Moderate Anzahl von Schweißpunkten • Moderate Komplexität der Biegevorgänge • Reife Technologie • Einseitig geringe Wickelkopfhöhe	• Beidseitig hohe Wickelkopfhöhe • Beidseitig vorteilhafte Kühlmöglichkeiten aufgrund einer großen Oberfläche • Hohe Anzahl von Schweißpunkten

Abb. 17.9 Übersicht zu gängigen Hairpin-Topologien. (Schaeffler AG, BMW AG, Continental AG)

[30] Vgl. Pfund.

Wickelkopfhöhen. Zudem fallen die Anzahl der Schweißpunkte sowie die Komplexität der Biegevorgänge moderat aus. U-Hairpins bilden die im Automobilbau am häufigsten verwendete Hairpin-Geometrie.[31]

Im Gegensatz dazu werden bei der I-Hairpin-Technologie geradlinige Pins in den Stator eingeschoben und beidseitig verschaltet. Dies bedingt eine hohe beidseitige Wickelkopfhöhe, aber auch eine verbesserte Kühlmöglichkeit aufgrund der vergrößerten Oberfläche. Die I-Pins erfordern eine große Anzahl von Schweißpunkten, dafür entfallen jedoch die komplexen und kostenintensiven Biegevorgänge vollständig.

Zudem existiert noch die Möglichkeit, eine kontinuierliche Hairpinwicklung zu erstellen. Dadurch entfällt der Schweißprozess, allerdings erhöht diese Hairpin-Topologie die Komplexität der Biege- und Montagevorgänge in erheblichem Maße. Kontinuierliche Hairpinwicklungen erzeugen beidseitig eine geringe Wickelkopfhöhe. Das nachteilige Design der Statoröffnungen kann allerdings auch zu geringerer Effizienz in bestimmten Anwendungsfällen führen.

Da die Hairpin-Technologie hohe Anlageninvestitionen voraussetzt und zahlreiche Prozessschritte notwendig sind, wird Kosteneffizienz in der Automobilindustrie erst ab rund 100.000 Stück pro Jahr erreicht. Ein großes Problem bei der Hairpin-Technologie besteht in der teilweise noch nicht ausgereiften Produktionstechnologie und damit verbundenen Effizienzeinbußen in der Herstellung.

In Anbetracht der steigenden Stückzahlen von Elektrofahrzeugen sowie der fortschreitenden Entwicklung der Produktionstechnik im Bereich der Hairpin-Statorproduktion, zeichnet sich in der Automobilindustrie eine Überlegenheit der Hairpin-Technologie gegenüber klassischen Wickelverfahren ab. Die zunehmende Etablierung von Hairpins in der Automobilindustrie lässt sich am steigenden Marktanteil der Hairpin-Technologie ablesen.

17.3.3 Verarbeitung von Isoliersystemen

Das Isoliersystem eines Stators ist aus mehreren Isolationselementen aufgebaut, die verschiedene Komponenten des Stators voneinander trennen (siehe Abschn. 9.4). Im Folgenden wird auf die Verarbeitung der Isolationselemente innerhalb der Statorproduktion näher eingegangen.

Zunächst ist das Isolieren der Statornuten durch eine Nutgrundisolierung zu nennen – auch „Nutisolation“ genannt –, die den Drahtleiter vom Blechpaket trennt. Zur Realisierung der Nutisolation haben sich drei Verfahren durchgesetzt: die Papier-/Folienisolation, die Isolation durch Kunststoffformteile beziehungsweise Spritzguss sowie der Dünnwandspritzguss.[32,33]

[31] Vgl. Kampker et al. 2020.

[32] Vgl. Stone et al. 2014.

[33] Vgl. Feldmann et al. 2014.

Bei der Papier- beziehungsweise Folienisolation werden die Statornuten durch Einschub eines Flächenisolationsstoffes isoliert. Dafür wird ein papierähnliches Material entsprechend der Nutgeometrie gefalzt, gefaltet und anschließend in das Blechpaket eingeschoben respektive mittels Luftdrucks eingeschossen. Vorteil dieser Variante ist die konstante Schichtdicke des Isolationsmaterials, allerdings ist auch die potenzielle Reibung zwischen Flächenisolation und Blechpaket zu beachten, ebenso wie die geringe Wärmeleitfähigkeit der Isolation durch Lufteinschlüsse. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, die Nuten durch Kunststoffformteile zu isolieren. Die Kunststoffformteile werden entweder vor der Wicklung auf das Statorblechpaket appliziert oder statorextern bewickelt und anschließend montiert. Allerdings sinkt der Kupferfüllfaktor mit steigendem Volumen der Kunststoffformteile aufgrund ihrer prozessbedingt hohen Wandstärken. Eine weitere Möglichkeit zur Isolation bietet der sogenannte Dünnwandspritzguss, bei dem Kunststoff in die Statornuten eingespritzt wird. Anschließend wird eine dünne Isolationsschicht durch das Abschaben überflüssiger Masse realisiert.[34]

Zur Phasenisolation der Leiter zueinander können optional Phasentrenner bei der Produktion in den Stator eingebracht werden. Dafür werden während der Wicklungsherstellung üblicherweise zusätzliche Flächenisolationen im Wickelkopf oder speziell geformte Nutgrundisolationen eingesetzt. Zum Verschluss offener oder halboffener Statornuten und zur Fixierung der Wicklung in den Nuten dienen sogenannte Deckschieber – in der Regel Kunststoffformteile –, die dem Isoliersystem zugeordnet werden und die Blechpaketnut mechanisch verschließen. Die Montage von Phasenisolationen oder eines Deckschiebers sind in der Statorproduktion optionale Prozessschritte und von den mechanischen und elektrischen Anforderungen des Stators abhängig.

Zuletzt ist die Sekundärisolation innerhalb der Isoliersysteme zu nennen. Dabei besteht zunächst die Möglichkeit, Imprägnierharze auf die Wickelköpfe zu träufeln und somit Lufteinschlüsse zwischen den Einzelkomponenten zu verringern. Dieser Prozess erfolgt zumeist bei erhöhter Prozesstemperatur unter konstanter Rotation des Stators. Der Kapillareffekt bewirkt eine Durchdringung der Nut durch das niedrigviskose Harz. Ein weiteres Verfahren besteht im sogenannten Tränken, bei dem ein erwärmter Stator in ein Harzbad getaucht wird. Bei dieser Methode sind eventuell reinigende Nacharbeiten vorzusehen. In der Kleinserien- und Prototypenfertigung werden mit dem Imprägnierharz zur Erreichung höherer und vollständiger Nutdurchdringungen auch Vakuum- oder Vakuumdruckimprägnierungsverfahren eingesetzt. Die Imprägnierung im Vakuum sorgt für eine gleichmäßigere und dünnere Imprägnierschicht, weshalb das Verfahren sehr hohe Füllfaktoren ermöglicht und als flexibel gilt. Für ausgewählte Anwendungen werden in der Imprägniertechnik auch der Spritz- und der Vollverguss eingesetzt. Allen Imprägnierverfahren ist indes gemeinsam, dass sie eine Erwärmung des Stators auf etwa 80 bis 150 °C erfordern.[35,36] In der Hairpin-Technologie besteht neben der Verdrängung von Lufteinschlüssen innerhalb der Wicklung die Anforderung an die Sekundärisolation der

[34] Vgl. Kampker et al. 2016.

[35] Vgl. Stöck 2016.

[36] Vgl. Thurman 1989.

Kontaktierstellen. Diese Funktion lässt sich durch die zuvor genannten Verfahren realisieren. Zunehmend setzt sich dafür auch die Pulverisolation im Wirbelsinterverfahren durch.[37]

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das Isoliersystem in der Statorproduktion ein vielschichtiges System mit einer vielfältigen Prozessalternativen-Morphologie darstellt. Die notwendigen Produktionsprozessschritte sind individuell gemäß dem Produktdesign auszuwählen.

17.4 Endmontage elektrischer Maschinen

Die Montage der einzelnen Komponenten unterliegt hohen Anforderungen, die für den langlebigen Betrieb einzuhalten sind. Aufgrund der hohen Drehzahlen müssen die rotierenden Bauteile passgenau eingesetzt werden, da sich dies sonst auf das Schwingungsverhalten, die Lebensdauer und die Dichtigkeit der Antriebseinheit auswirkt. Eine weitere Herausforderung entsteht infolge der Verkettung mit vorgelagerten Prozessen. Ungenauigkeiten in der Fertigung der Einzelkomponenten haben einen negativen Einfluss auf die Montierbarkeit und Qualität des Gesamtprodukts. Dem wird durch komplexe Fehler-Ursachen-Analysen begegnet, allerdings treten infolge der hohen Komplexität der gesamten Wertschöpfungskette häufig unvorhergesehene Prozessinterdependenzen auf, die einen negativen Einfluss auf die Gesamtqualität haben. Zur Vermeidung von Feldausfällen ist trotz hochpräziser Endmontagetechniken eine abschließende Qualitätssicherung unabdingbar. Die Prüftechnik stellt damit einen zentralen Wertschöpfungsbeitrag im Rahmen der Elektromotorenproduktion dar.

Vor diesem Hintergrund werden nachstehend zunächst die aufeinanderfolgenden Prozessschritte der Endmontagetechnik beschrieben (siehe Abschn. 17.4.1). Auf dieser Basis wird an- und abschließend die „End-of-Line“ (EoL)-Prüfung samt der verschiedenen mechanischen und elektrischen Prüftechnologien beleuchtet (siehe Abschn. 17.4.2).

17.4.1 Endmontagetechnik

Die Effizienzpotenziale bei der Montage von Elektromotoren liegen im Wesentlichen im Variantenmanagement und in der Automatisierung. Ziel des Variantenmanagements ist die Reduktion der Bauteilanzahl sowie die Auslagerung variantenbildender Produktionsschritte oder deren Verlegung an das Ende der Montagelinie, um die Montagekomplexität zu verringern. Aufgrund der überwiegend axialen Fügeoperationen ist in der Elektromotorenmontage bereits ein hoher Automatisierungsgrad vorhanden. Nichtsdestotrotz wird weiterhin das Ziel verfolgt, substituierbare manuelle Prozesse zu identifizieren und zu automatisieren, um die Produktionskosten sowie die Qualität zu verbessern. Die Endmontage der elektrischen Antriebseinheit erfolgt im Wesentlichen in sechs Schritten, die nachstehend im Einzelnen kurz beschrieben werden.

[37] Vgl. Kampker et al. 2020.

Prozessschritt 1
Im ersten Schritt wird der gefertigte Stator durch Aufschrumpfen in das Gehäuse eingefügt. Durch induktives Erwärmen des Gehäuses wird dieses aufgeweitet, so dass der Stator kraftfrei axial in das Gehäuse eingefügt werden kann. Durch das Abkühlen des Gehäuses schrumpft dieses wieder, so dass eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Gehäuse und Stator entsteht. Alternativ dazu kann der Stator in das ungedehnte Gehäuse eingepresst oder mit diesem verklebt werden. Formschlüssige Verbindungen können durch eine Passfeder oder kraftschlüssige Verbindungen durch Verschrauben realisiert werden.

Prozessschritt 2
Die Montage der Kugellager erfolgt analog zur Montage des Stators in das Gehäuse. In der Regel werden die Kugellager auf die entsprechenden Absätze der Rotor-Welle gepresst. Alternativ kann auch dabei ein thermisches Verfahren eingesetzt werden, bei dem das Lager thermisch aufgeweitet beziehungsweise die Rotorwelle thermisch eingedehnt wird.

Prozessschritt 3
Bei der Montage des Rotors wird dieser als komplette Baugruppe mit Hilfe einer Fügespindel gegriffen und in den Stator eingefügt. Ein Führungsdorn nimmt das untere Wellenende entgegen, um ein Ausschlagen des Rotors durch die hohen Magnetkräfte (bei PSM-Maschinen) zu verhindern. Um eine hohe Positionsgenauigkeit zu gewährleisten und um der Kollisionsgefahr infolge des geringen Luftspalts zwischen Rotor und Stator entgegenzuwirken, wird der Rotor mit geringer Vorschubgeschwindigkeit eingefügt.

Prozessschritt 4
Der drehende Teil des Resolvers wird auf der Rotorwelle mittels Verkleben externer Bauteile – etwa Schrauben und Passfeder – oder thermischen Pressens montiert. Gleiches gilt für den stehenden Teil des Resolvers, der auf dem Stator montiert wird.

Prozessschritt 5
Beim Kontaktieren werden die einzelnen Phasen mit Kabelschuhen versehen, um diese bei der Montage im Fahrzeug mit dem elektrischen Gesamtsystem verbinden zu können. Das Kabel wird in den Kabelschuh eingeführt, wonach eine mechanische Verformung des Kabelschuhs eine formschlüssige Verbindung zwischen Kabelschuh und Kabel erzeugt.

Prozessschritt 6
Anschließend werden die Lagerschilde montiert. Sie beinhalten Lagersitze, die die jeweils äußeren Ringe des Lagers aufnehmen, welche zuvor auf die Rotorwelle montiert wurden. Gleichzeitig wird durch die Lagerschilde das Gehäuse geschlossen. Um die Dichtigkeit zu gewährleisten, wird zwischen den Lagerschilden und dem mit ihnen verschraubten Gehäuse zusätzlich ein Klebestreifen aufgetragen.

17.4.2 EoL-Prüftechnik

Nach abgeschlossener Montage erfolgt die EoL-Prüfung. Dabei werden die Funktionalität und die Leistungsfähigkeit des Elektromotors getestet und die elektrische Maschine charakterisiert, um die Leistungselektronik entsprechend zu parametrisieren. Dazu wird der Motor in einen Prüfstand eingespannt und elektrisch sowie mechanisch kontaktiert. Im Zuge der EoL-Prüfung werden verschiedene Testverfahren eingesetzt, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

Bei der *Belastungsprüfung* durchläuft der Elektromotor verschiedene Lastzustände entsprechend einem vorab definierten Prüfprogramm. Der Motor wird dabei an einen Belastungsmotor gekoppelt, der über eine integrierte Messeinheit für Drehzahl und Drehmoment verfügt. Dadurch kann der Elektromotor flexibel belastet und sowohl im motorischen als auch im generatorischen Betrieb überprüft werden. Die abgegebene Leistung in diesen Lastzuständen wird aufgezeichnet, so dass zahlreiche Erkenntnisse über die Leistungscharakteristika des Motors gewonnen und gegebenenfalls auch fehlerhafte Motoren aussortiert werden können.

Bei permanenterregten Synchronmaschinen kommt bei der Überprüfung mitunter die Messung der Back-„Electro Magnetic Force“ (EMF) zum Einsatz. Dabei wird diejenige elektromagnetische Kraft im Rahmen der *Belastungsprüfung* gemessen, die durch (elektro-)magnetische Induktion verursacht wird. Die elektrischen Phasen werden an ein Spannungsmessgerät angeschlossen, und der Motor wird mit Hilfe einer externen Lastmaschine angetrieben. Die durch die magnetischen Kräfte induzierte Spannung in den Phasen wird aufgezeichnet, wodurch Rückschlüsse auf die Phasensymmetrie sowie Beschädigungen bei den Magneten oder den Wicklungen gezogen werden können.

Die *Leerlaufprüfung* gibt Aufschluss über Eigenschaften des magnetischen Kreises, auftretende Verluste sowie das rein mechanische Verhalten während des Laufs. Beim motorischen Verfahren wird der Elektromotor ohne Last mit Nenndrehzahl betrieben, und durch Analyse der Wirkzusammenhänge zwischen angelegter Spannung und Magnetfeldveränderungen werden Rückschlüsse auf die auftretenden Verluste gezogen. Beim generatorischen Verfahren wird der Motor durch einen kalibrierten, fremderregten Elektromotor angetrieben und hinsichtlich des elektromagnetischen Verhaltens untersucht.

Bei der *Widerstandsmessung* am montierten Motor werden Verschaltung und Verkabelung des Elektromotors auf den Innenwiderstand der einzelnen Windungen sowie auf Kurzschlüsse überprüft. In EoL-Prüfständen wird eine Spannung in der Größenordnung der Betriebsspannung angelegt und der Strom sowie die abfallende Spannung über die Wicklung vermessen. Aus den ermittelten Werten wird mit Hilfe des Ohm’schen Gesetzes der Innenwiderstand errechnet und mit den Vorgaben verglichen.

Der *Geräusch- und Schwingungsprüfung* kommt im Rahmen der EoL-Prüfung die größte Bedeutung zu. Aufgrund der hohen Drehzahlen des Elektromotors liegen dort hohe Anforderungen an auftretende Schwingungen vor, da diese zu einem schnelleren Verschleiß und damit zum Ausfall der Antriebseinheit beitragen. Solche Anomalien können durch verschiedene Ursachen hervorgerufen werden, zum Beispiel durch Exzentrizitäten, Unwuchten oder Lagerschäden. Mit Hilfe von piezoelektrischen Beschleunigungssensoren oder Laser-

Doppler-Vibrometern erfassen die Messsysteme den Körperschall beziehungsweise die mechanischen Schwingungen. Die Integration der Geräusch- und Schwingungsprüfung in eine laufende Produktion ist häufig sehr komplex, da die hochsensiblen Messeinrichtungen von den laufenden Maschinen der Produktionssysteme nicht beeinflusst werden dürfen.

Literatur

Teil III: Produktion von elektrofahrzeugspezifischen Systemen

DIN e.V.: DIN EN 60851-1Wickeldrähte – Prüfverfahren – Teil 1: Allgemeines (IEC 60851-1:1996 + A1:2003 + A2:2009). Berlin: Beuth-Verlag, 2010

DIN e.V.: DIN EN 60317-0-2Technische Lieferbedingungen für bestimmte Typen von Wickeldrähten – Teil 0–2: Allgemeine Anforderungen – Lackisolierte Flachdrähte aus Kupfer (IEC 60317-0-2:2013). Berlin: Beuth-Verlag, 2014

Doerr, J; Attensperger, T; Wittmann, L; Enzinger, T.: *Die neuen elektrischen Achsantriebe von Audi*. In: ATZ Elektron, Jg. 13, 2018, Nr. 3, S. 16–27

Feldmann, K; Schöppner, V; Spur, G. (Hrsg.):*Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren.* Edition Handbuch der Fertigungstechnik, /hrsg. von Günter Spur; 5. 2., vollständig neu bearbeitete Auflage Aufl., München: Hanser, 2014

Fleischer, J; Haag, S; Hofmann, J.: *Quo Vadis Wickeltechnik. Eine Studie zum aktuellen Stand der Technik und zur Recherche zukünftiger Trends im Automobilbau*, 2017

Fleischer, J; Haag, S; Hofmann, J.: *Quo Vadis Wickeltechnik. Eine Studie zum aktuellen Stand der Technik und zur Recherche zukünftiger Trends im Automobilbau*, 2017

Fleischer, J; Hausmann, L; Halwas, M; Hofmann, J; Wirth, F; Wößner, W.: *Wissen Kompakt: Produktion elektrischer Traktionsmotoren*. https://www.wbk.kit.edu/downloads/Wissen_kompakt_Elektromotoren_Produktion.pdf. Abruf 01.06.2022

Franke, J; Tremel, J; Kuhl, A.: *Innovative developments for automated magnet handling and bonding of rare earth magnets* Tampere, 2011

Hagedorn, J; Sell-Le Blanc, F; Fleischer, J.: *Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren. Ein Beitrag zur Energieeffizienz*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016

Heco: *What is Rotor Manufacturing? Understanding rotors is key to saving maintenance dollars on your plant floor*. https://www.hecoinc.com/heco-system/rotor-manufacturing#Shafts. Abruf 01.06.2022

Hinzen, H. (Hrsg.):*Maschinenelemente 2. Lager, Welle-Nabe-Verbindungen, Getriebe.* De Gruyter Studium. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage Aufl., Berlin, Boston: De Gruyter, 2018

Kampker, A; Heimes, H; Kawollek, S; Treichel, P; Kraus, A; Rassmann, A; Hitzel, T.: *Produktionsprozess eines Hairpin-Stators.* 2 Aufl. Frankfurt am Main, 2020

Kampker, A; Kreiskother, K; Buning, M. K; Adam, M.:*Thin-walled injection molding for slot insulation of long stator sheet stacks*. In: Conference, I. E. D. P. (Hrsg.): 2016 6th International Electric Drives Production Conference (E|DPC): *November 30th-December 1st, 2016, Nuremberg, Germany proceedings*. [Piscataway, NJ]: IEEE 2016.

Kienle + Spiess GmbH: *Energiesparende Elektromotoren. Premium Efficiency (IE3).* https://kienle-spiess.com/kupferdruckguss.html

Kolbe, M.: *Stanztechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020

Leuning, N; Elfgen, S; Weiss, H. A; Volk, W; Hameyer, K.: *Der Einfluss des Schneidens von Elektroblechlamellen und die geeignete numerische Modellierung*. In: Elektrotech. Inftech., Jg. 136, 2019, Nr. 2, S. 184–194

Lindenfels, J. von; Ziegler, M; Kneidl, M; Kuehl, A; Franke, J.: *Challenges in bonding processes in the production of electric motors*. In: Wulfsberg, J. P; Hintze, W; Behrens, B.-A. (Hrsg.): Production at the leading edge of technology Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 411–420

MAHLE GmbH: *MAHLE entwickelt hocheffizienten magnetfreien E-Motor* Stuttgart, 05.05.2021

Naumoski, H.: *Untersuchung des Einflusses der Bearbeitung auf die magnetischen Eigenschaften von nichtkornorientiertem Elektroblech*. Dissertation, 03. Dezember 2018

Pfund, T.:*Die Schaeffler eDrive Plattform. Modular und hochintegriert*: Schaeffler Kolloquium 2018, S. 173–180

Schäfer, P.: *Projekt erforscht Betrieb der fremderregten Synchronmaschine. Wird der stromerregte Synchronmotor zur Alternative für den Antrieb von Elektrofahrzeugen? Ein Projekt der TH Nürnberg forscht am sicheren Betrieb des Elektromotors.* https://www.springerprofessional.de/elektromotor/elektrische-antriebstechnik/projekt-erforscht-betrieb-der-fremderregten-synchronmaschine/15443622. Abruf 01.06.2022

Schuler Pressen GmbH: *Produktbroschüre Smartline-Baureihe*. https://www.schulergroup.com/major/download_center/broschueren_drives_generators/download_drives_generators/drives_generators_broschuere_smartline_d.pdf. Abruf 16.12.2021

Sequenz, H.: *Die Wicklungen elektrischer Maschinen. 1. Wechselstrom-Ankerwicklungen*. Wien: Springer Vieweg, 1950

Stöck, M.: *Steigerung der Leistungsdichte und der Wirtschaftlichkeit von Elektromotoren für atomotive Fahrantriebe*, 2016

Stone, G. C; Culbert, I; Boulter, E. A; Dhirani, H. (Hrsg.):*Electrical insulation for rotating machines. Design, evaluation, aging, testing, and repair.* IEEE press series on power engineering. Second edition Aufl., Hoboken New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2014

Thurman, C. E.:*Trickle impregnation of small motors*. In: IEEE Electr. Insul. Mag., Jg. 5, 1989, Nr. 3, S. 30–35

Voestalpine: *Verarbeitungsrichtlinien Backlack*. https://www.voestalpine.com/isovac/content/download/35344/file/Verarbeitungsrichtlinien_Backlack_D_130421.pdf. Abruf 20.12.2021

Wossner, W; Stoll, J; Flammer, M. O; Wurster, P; Peter, M; Fleischer, J.: *Intelligent Rotor Assembly Enabling Positive Balancing Concepts for High-Performance Permanent Magnet Rotors* 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC), 2018

Zerbe, J.: *Innovative Wickeltechnologien für Statorspulen zur Erhöhung des Füllfaktors und Reduzierung der Beanspruchungen im Wickelprozess*: Universitätsverlag der TU Berlin, 2019

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de) 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 Kapitel 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.

