

Produktion elektrischer Traktionsmotoren

Der Traktionsmotor stellt unabhängig des eingesetzten Energiespeichersystems eine zentrale Komponente elektrischer Fahrzeugkonzepte dar. Aus den im Vergleich zu konventionellen Elektromotoren gehobenen Anforderungen der Automobilindustrie hinsichtlich der Stückzahlen sowie Leistungs- und Qualitätsmerkmale resultieren neue produktionstechnische Herausforderungen, welche Unternehmen eine Chance bieten an der anspruchsvollen Prozesskette zu partizipieren.



© sdecoret/AdobeStock

1. Antriebsarchitekturen

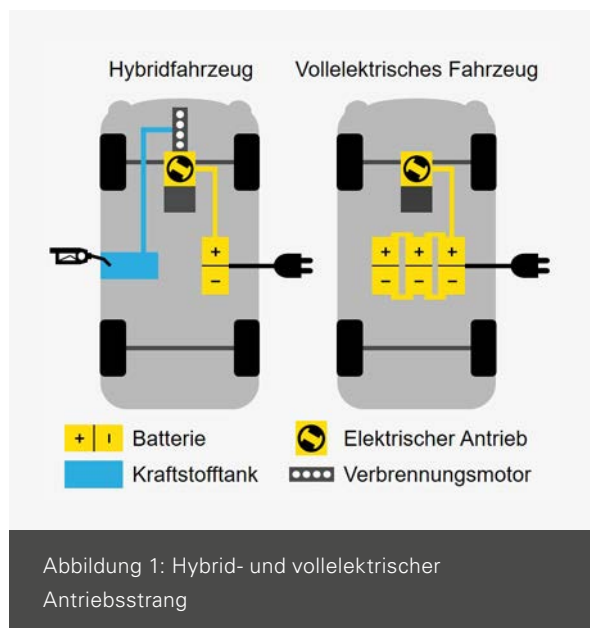
Unabhängig vom eingesetzten Energiespeichersystem ist der Elektromotor die zentrale Komponente aller modernen Antriebskonzepte. Obwohl das Wirkprinzip des Elektromotors bereits seit über 150 Jahren bekannt ist und weltweit jährlich Millionen von Industriemotoren produziert werden, stellt die Elektrifizierung des Antriebsstrangs die Produktentwicklung und Produktionstechnik vor neue Herausforderungen. Die geforderten Qualitäts- und Leistungsmerkmale, die Betriebs- und Umgebungsbedingungen sowie die Stückzahl- und Kostenanforderungen der Automobilindustrie haben in den letzten Jahren die Entwicklung neuer Motor topologien und Fertigungsverfahren massiv vorangetrieben. Um die aufgrund der Gewichts- und Bauraumbeschränkung notwendige hohe Leistungsdichte des elektrischen Antriebs zu erreichen, geht der Trend zunehmend in Richtung hochdrehender Maschinen mit Betriebsdrehzahlen von über 20.000 U/min. Um eine maximale Reichweite und Effizienz der Fahrzeuge zu gewährleisten, werden gleichzeitig hohe Wirkungsgrade über den gesamten Drehzahl-Drehmoment-Verlauf gefordert. Neben den typischen Motorkenngrößen Leistung, Drehmoment und Drehzahl bestimmt die Antriebsarchitektur des Fahrzeugs maßgeblich die geforderte Betriebscharakteristik des elektrischen Antriebs. Aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen weichen die optimalen Lösungskonzepte stark voneinander ab, was bei der Betrachtung und Diskussion der Komponentenwerkstoffe, Anlagen und Fertigungsprozesse im Rahmen der Produktion stets zu berücksichtigen ist.

Die Antriebsarchitektur beschreibt die Konfiguration der am Antrieb eines Fahrzeugs beteiligten Komponenten. Dabei kann grundsätzlich zwischen hybridelektrischen Fahrzeugen (HEV) und vollelektrischen Fahrzeugen (EV) unterschieden werden, siehe Abbildung 1. In hybriden Architekturen wird neben dem klassischen Verbrennungsmotor zusätzlich ein Elektromotor mit Batteriesystem verbaut und in Kombination betrieben. In den unteren Fahrzeugklassen und für kleinere Leistungsbereiche lassen sich noch kostengünstige Antriebe mit einer Betriebsspannung von 48 Volt einsetzen. Hingegen hat sich bei leistungsstarken Fahrzeugen der meisten Automobilhersteller die Plug-in-Hybrid-Bauweise mit einem leistungsstarken Hochvolt-Elektromotor durchgesetzt. In der Regel wird die elektrische Maschine dabei entweder zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe (P2-Anordnung) oder als separates Achsmodul (P4-Anordnung) in das Fahrzeug integriert. Auf die weitere Benennung hybrider Architekturen wird an dieser Stelle verzichtet und auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen, siehe beispielsweise.¹

Im Pkw-Bereich liegen typische elektrische Motorleistungen hybrider Fahrzeuge zwischen 20 und 150 kW. Bei den getriebeintegrierten Elektromotoren lassen sich aufgrund der geringeren Anforderungen hinsichtlich Drehmoment- und Drehzahlwelligkeit

günstige und kompakte Zahnspulenmotoren mit konzentrierter Statorwicklung einsetzen. Verbrennungsmotor, Kupplung und Getriebe werden dabei so ausgelegt, dass die Schwingungen vom Elektromotor möglichst kompensiert werden. Das schlechtere akustische Verhalten von Zahnspulenmotoren mit konzentrierten Statorwicklungen kann aufgrund des Geräuschniveaus des konventionellen Antriebsstrangs bei hybriden Fahrzeugkonzepten in Kauf genommen werden.

Im Gegensatz zu hybriden Antrieben muss der Traktionsmotor im vollelektrischen Fahrzeug die gesamte Antriebsleistung auch im Teillastbetrieb bereitstellen und wird dementsprechend größer dimensioniert. Für Antriebe in vollelektrischen Fahrzeugen werden vom Fahrzeughersteller in Hinblick auf Komfort und Fahrdynamik Drehmomentwelligkeiten < 5 % gefordert. Zusammen mit den hohen Anforderungen hinsichtlich der Motorakustik stellen diese häufig ein Ausschlusskriterium bei der Auswahl geeigneter Motortopologien dar. Aus diesem Grund werden bei Antrieben für vollelektrische Fahrzeuge fast ausschließlich verteilte Statorwicklungen mit ho-



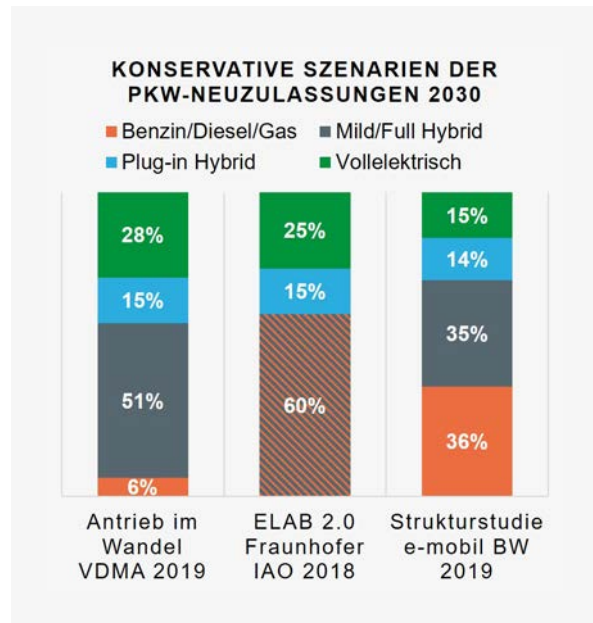
1 | Tschöke, H., Gutzmer, P., und Pfund, T. (2019). Elektrifizierung des Antriebsstrangs, Springer Vieweg, Berlin.

her Laufruhe verwendet, wie später noch detailliert dargestellt wird. Neben allen technischen und produktspezifischen Anforderungen ist die zentrale Herausforderung der Zulieferer, Anlagenbauer und Fahrzeugproduzenten in Deutschland die Entwicklung der Absatzzahlen hybrider und vollelektrischer Fahrzeuge für das kommende Jahrzehnt sicher zu prognostizieren und frühzeitig die richtigen strategischen Entscheidungen zu treffen. Der Aufbau einer flexiblen und skalierbaren Produktion wird hierbei eine wichtige Rolle spielen.

In den letzten Jahren wurde der Trend hin zur Elektromobilität mit all seinen wirtschaftlichen und sozialökonomischen Folgen vielfach in unabhängigen Studien detailliert aufgezeigt. Trotz teilweise sehr unterschiedlicher Annahmen und Herangehensweisen zeigt sich das Gesamtbild doch auffallend übereinstimmend. Beispielsweise zeigt die Gegenüberstellung der konservativen Szenarien des prognostizierten Fahrzeugmixes für Europa der VDMA Studie Antrieb im Wandel (2019), der Fraunhofer IAO Studie ELAB 2.0 (2018) sowie der e-mobil BW Strukturstudie (2019), dass im Jahr 2030 40–66 % aller Neufahrzeuge hybrid und 15–28 % vollelektrisch fahren werden, vgl. Abbildung 2. Anders ausgedrückt wird in mindestens 60 % aller Fahrzeuge ein elektrischer Antrieb integriert sein. Eine wichtige Voraussetzung hierfür stellt der parallele Ausbau der Ladeinfrastruktur dar, der mit rund 40 % Steigerung der öffentlichen Ladesäulen in Deutschland im Vorjahr einen deutlichen Zuwachs verzeichnen konnte. Noch deutlicher kann aktuell das Wachstum in China beobachtet werden, wo allein im vergangenen Jahr die Ladeinfrastruktur um rund 80 % ausgebaut wurde. Mit 1,2 Millionen neu zugelassenen Elektrofahrzeugen im Jahr 2019 bleibt China damit weiterhin der wichtigste Schlüsselmarkt für die Elektromobilität.

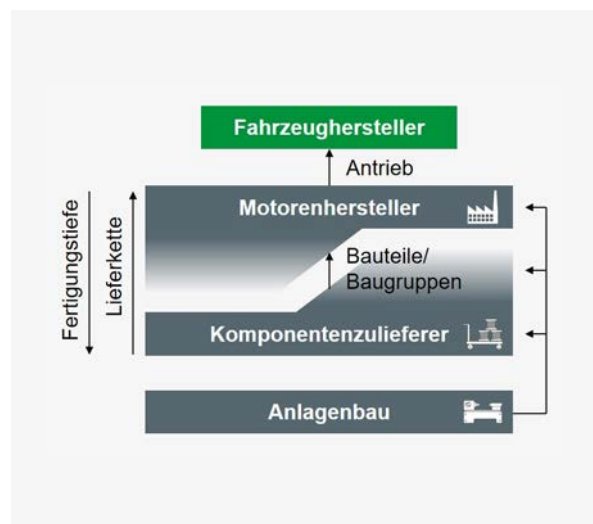
Der Transformationsprozess hin zur Elektromobilität bewirkt entlang der Wertschöpfungskette des elektrischen Antriebs sowohl unterschiedliche Handlungsbedarfe als auch unterschiedliche Handlungsspielräume. Zur Diskussion dieser Handlungsfelder soll in dieser Broschüre zwischen folgenden Arten von Unternehmen differenziert werden: Motorenhersteller, Komponentenzulieferer und Anlagenbau, siehe Abbildung 3. Je nach Fertigungstiefe konzentrieren sich die Aktivitäten des Motorenherstellers auf die Montage zugelieferter oder selbst montierter Baugruppen. Ein Prozessschritt, der eindeutig dem Handlungsfeld des Motorenherstellers zugeordnet werden kann, ist bspw. die Endmontage von Rotor und Stator sowie die abschließende Prüfung des Antriebs.

Die Produktion einzelner Komponenten sowie Baugruppen mit reduzierter Anzahl an Einzelteilen soll in dieser Broschüre dem Komponentenzulieferer zugeordnet werden. Prozess-



Quelle: © eigene Darstellung in Anlehnung an KIT/wbk

Abbildung 2: Gegenüberstellung des Fahrzeugmixes im Jahr 2030



Quelle: © eigene Darstellung in Anlehnung an KIT/wbk

Abbildung 3: Akteure im Umfeld der Produktion elektrischer Antriebe

schritte, die hauptsächlich dem Komponentenzulieferer zugeordnet werden können, sind bspw. die Herstellung von Wickeldraht und Rotorwellen. Durch eine enge Zusammenarbeit von Komponentenzulieferer und Motorenhersteller, insbesondere bei der Entwicklung innovativer Produkte, unterschiedliche Fertigungstiefen der Motorenhersteller sowie abweichende Produktportfolios der Komponentenzulieferer ist eine klare Trennung der Tätigkeitsbereiche allerdings oft nicht möglich. In diesen Fällen wird das Handlungsfeld sowohl dem Komponentenzulieferer als auch dem Motorenhersteller zugewiesen.

Unabhängig von diesem Wechselspiel werden sowohl beim Komponentenzulieferer als auch beim Motorenhersteller Produktionsanlagen benötigt, um die jeweiligen Produktionsprozesse umsetzen zu können. Dem Anlagenbau wird hier vereinfacht sowohl die Entwicklung und Bereitstellung von Apparaten und Anlagen als auch die Integration verschiedener Anlagen zu gesamten Produktionseinheiten zugeteilt. Eine Zuordnung des Anlagenbaus zu einzelnen Prozessschritten erfolgt dann, wenn in diesem Prozess ein besonderer Bedarf an Sondermaschinen gesehen wird, ohne die eine wettbewerbsfähige, hochautomatisierte Serienproduktion elektrischer Antriebe nicht möglich ist. Dies ist beispielsweise bei der Produktion von Statoren mit Hairpin-Technologie der Fall. Im Gegensatz hierzu wird bspw. der Fertigung von Rotorwellen kein Bedarf für die Entwicklung neuer Anlagentechnik zugesprochen. Die hierfür benötigte Anlagentechnik weist eine hohe Überschneidung zu Anlagen auf, die für die Herstellung der Komponenten des konventionellen Antriebsstrangs bereits heute zum Einsatz kommen. Dies ist allerdings ebenfalls als vereinfachte Darstellung zu verstehen und soll nicht ausschließen, dass durch innovative Anlagenkonzepte neue Wettbewerbsvorteile erarbeitet werden können oder Produktneuheiten zukünftig neue Anlagentechnik erfordern.

Die Zuordnung der Prozessschritte zu Motorenhersteller, Komponentenzulieferer und/oder Anlagenbau erfolgt pro Prozesssteckbrief durch eine Hervorhebung der in Abbildung 3 eingeführten Symbole.

2. Funktionsweise und Aufbau

Wirkprinzip

Basierend auf den in Kapitel 1 erläuterten Anforderungen für hybride und vollelektrische Antriebe werden nach dem aktuellen Stand der Technik in der Regel Drehstrommaschinen verwendet. Besonders entscheidend für diese Auswahl sind die hohen erreichbaren Leistungsdichten und Wirkungsgrade. Drehstrom bezeichnet hierbei dreiphasigen Wechselstrom, was die Verwendung von Umrichtern notwendig macht, da die gängigen Energiespeicher in Fahrzeugen Gleichstromquellen sind, wie beispielsweise Batterien oder Brennstoffzellen. Auf die Energiespeicher, die Leistungselektroniken sowie deren Steuerungen und Managementsysteme soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden, hierzu sei auf die Literatur verwiesen.²

Elektrische Maschinen können prinzipiell in zwei Zuständen betrieben werden: Wird die Maschine als Wandler elektrischer zu kinetischer Energie betrieben, wirkt die elektrische Maschine als Motor – in umgekehrter Reihenfolge als Generator. In der generatorischen Betriebsart kann die Bewegungsenergie des Fahrzeuges als elektrische Energie in die Batterie zurückgespeist werden, wie es beispielsweise bei Bremsvorgängen vorkommt. Dies ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber Verbrennungskraftmaschinen. Außerdem liegt der ungefähre Wirkungsgrad von herkömmlichen Kolbenmaschinen bei maximal 33 % – bei elektrischen Maschinen liegt er in der Regel bei 95 %. Diese Angabe bezieht sich aber nur auf die Betrachtung der reinen Antriebssysteme ohne Verluste durch die Energiebereitstellung.

Die drei wesentlichen Baugruppen einer elektrischen Maschine sind der Stator, der Rotor und das Gehäuse, siehe Abbildung 4. Der Stator, klassischerweise auch Ständer genannt, besteht aus geschichteten, untereinander isolierten Einzelblechen und enthält in seinen Nuten die Ständerwicklung, die durch das Anlegen eines elektrischen Drehstromfeldes ein elektromagnetisches Drehfeld erzeugt. Dieses prägt ein Drehmoment auf den Rotor auf und versetzt diesen in rotatorische Bewegung. Die Wirkweisen des Rotors können aufgrund der verschiedenen Motorbauformen variieren. Grundsätzlich besteht der Rotor aber auch aus einem geschichteten Blechpaket. Das Gehäuse erfüllt mehrere Funktionen innerhalb einer elektrischen Maschine. Es realisiert die Befestigung des Stators, beinhaltet die Rotorlagerung, schützt die Komponenten vor Umwelteinflüssen wie Spritzwasser oder sonstigen Verschmutzungen und erfüllt bei Traktionsantrieben die Kühlfunktion. Gängig ist eine Mantelkühlung, bei der das Gehäuse Kühlkanäle enthält. Das Gehäuse gehört dementsprechend nicht wie Stator und Rotor zu den aktiven – also zum Dreh-

² | Bauer, W., Riedel, O., Herrmann, F., Borrman, D., Sachs, C., Schmid, S., Klötzke, M. (2018), ELAB 2.0 – Wirkungen der Fahrzeugelektrifizierung auf die Beschäftigung am Standort Deutschland, Fraunhofer IAO, Stuttgart. http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-5313834.pdf

moment beitragenden – Komponenten, ist aber für die Funktionsweise besonders in Bezug auf die Lebensdauer und das akustische Verhalten essenziell.

Bauweisen

Drehstrommaschinen lassen sich aufgrund der Bauweise des Rotors und dessen Funktionsweise in zwei Überkategorien aufteilen: Synchronmaschinen und Asynchronmaschinen. Die Begriffe synchron und asynchron beziehen sich auf die Drehzahl des Rotors in Bezug zu der des elektromagnetischen Drehfeldes: Bei Synchronmaschinen ist die Drehzahl von Rotor und Statorfeld gleich, bei Asynchronmaschinen sind die Umdrehungszahlen schlupfbehafte.

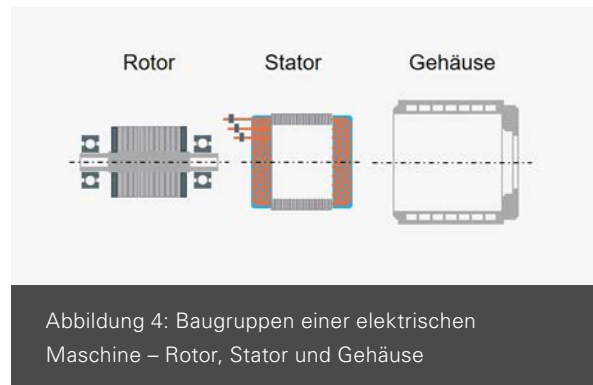
Wie in Abbildung 5 dargestellt, lassen sich die aktuell in Traktionsantrieben verwendeten Synchronmaschinen in permanenterrgte Synchronmaschinen (PMSM), fremderregte Synchronmaschinen (FESM) und Reluktanzmaschinen (RM) unterscheiden. Für Asynchronmaschinen (ASM) kommen in Traktionsmaschinen momentan hauptsächlich Käfigläufer in Betracht.

Bei der PMSM ist der Rotor mit Magneten bestückt, die ein dauerhaftes Rotormagnetfeld erzeugen. Je nach Anordnung der Magnete im Rotor kann das Drehmomentkennfeld insbesondere im feldgeschwächten Bereich beeinflusst werden. PMSM sind die drehmomentstärksten Drehstrommaschinen und besitzen einen hohen Wirkungsgrad, weshalb sie aktuell häufig in Fahrzeugantrieben eingesetzt werden. Nachteilig gestalten sich allerdings die hohen Kosten der seltenen Erden, die in den Magneten Verwendung finden, und die Empfindlichkeit der Magnete gegenüber Entmagnetisierung bei zu hohen Temperaturen. Diese können im Betrieb bei Überlast entstehen und zu einem Ausfall des Motors führen.

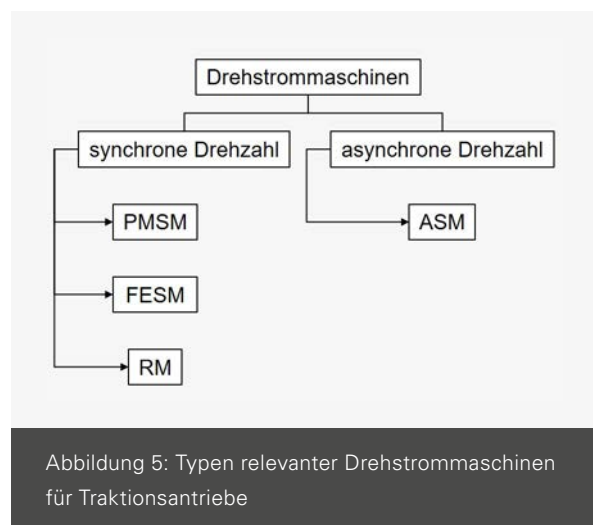
Die FESM besitzt eine Wicklung im Rotor, die beispielsweise durch Schleifringe kontaktiert und bestromt werden muss. Hierdurch entstehen leichte Nachteile in Bezug auf den Wirkungsgrad und den Bauraum im Vergleich zur PMSM, ansonsten ist diese Maschine aber ebenfalls sehr drehmomentstark. Die Wicklung der Rotoren bedeutet einen zusätzlichen Schritt der Wicklungsherstellung.

Die synchrone RM besitzt die prinzipiell einfachste Rotortopologie, da der Aktivteil des Rotors ausschließlich aus einem geschlitzten Blechpaket besteht. Die geometrische Anordnung der Schlitze bewirkt, dass sich der Rotor dem geringsten magnetischen Widerstand entsprechend im Statorfeld ausrichtet – es wirkt die sogenannte Reluktanzkraft. Diese Bauform befindet sich aktuell im Entwicklungsstadium in Bezug auf Traktionsantriebe, ist aber aufgrund der Ressourceneffizienz und Einfachheit eine zukunftsweisende Technologie, bei der insbesondere die Leistungskennzahlen und die Drehzahlfestigkeiten optimiert werden müssen.

Die ASM in Form eines Käfigläufers besitzt druckgegossene Stäbe in einem Blechpaket aus Aluminium oder Kupfer. Diese sind an ihren Stirnseiten kurzgeschlossen. Durch Bewegung des Drehfeldes werden in diesen Stäben elektrische Ströme induziert. Aufgrund des Kurzschlusses der Stäbe entsteht wiederum ein Rotormagnetfeld, das mit dem Statorfeld in Wechselwirkung



Quelle: © eigene Darstellung in Anlehnung an KIT/wbk



Quelle: © eigene Darstellung in Anlehnung an KIT/wbk

tritt und zur Aufprägung eines Drehmoments führt. Dadurch läuft der Rotor dem Stator stets mit einem bestimmten Schlupf hinterher und die Drehzahl ist asynchron. Bei synchroner Drehzahl des Rotors mit dem Statorfeld würden keine Ströme induziert und kein Drehmoment ausgebildet. Die Bauweise der ASM ist sehr robust und wird deshalb in der Industrie häufig verwendet. Allerdings sind die Anforderungen an die Statorwicklungen höher als bei Synchronmaschinen, da das Rotormagnetfeld durch das Statormagnetfeld bedingt ist. Drehmoment- und Leistungsdichte sind im Vergleich zu Synchronmaschinen, besonders zur PMSM, als geringer einzuschätzen.

Ein nennenswertes Differenzierungsmerkmal bei dem Aufbau von Statorwicklungen stellt die Anzahl der übersprungenen Nuten dar. Ist eine Wicklung konzentriert aufgebaut, so ist sie „konzentriert“ um einen Zahn gewickelt. Von verteilten Wicklungen wird hingegen gesprochen, wenn die Spule mehrere Nuten umspannt. In Abbildung 7 sind die beiden Wicklungsarten grafisch dargestellt. Prinzipbedingt eignen sich konzentrierte Wicklungen nur für PMSM und deren Anwendung in hybriden Fahrzeugen, da diese Wicklungsart hohe Drehmomentschwankungen erzeugt. Durch die daraus resultierende starke Geräuschentwicklung, besonders bei hohen Drehzahlen, ist daher ein mehrstufiges Getriebe vorteilhaft. In Kombination mit Verbrennungskraftmaschinen fallen diese Nachteile allerdings nicht so stark ins Gewicht, weshalb sie für hybride statt für vollelektrische Anwendungen verwendet werden. Vorteilhaft sind das maximale Drehmoment und die kompakte Baugröße aufgrund kleiner Wickelköpfe. Verteilte Wicklungen hingegen besitzen größere Wickelköpfe und benötigen daher mehr Bauraum, entwickeln aber wesentlich geringere Drehmomentschwankungen und weisen daher eine bessere Laufruhe und Leistungsentfaltung bei höheren Drehzahlen auf. Folglich kommen verteilte Wicklungen für vollelektrische Anwendungen in Frage. Grundsätzlich können alle vorgestellten Maschinentypen mit verteilten Statorwicklungen ausgelegt werden.

Maschine	ASM	PMSM	FESM	RM
Schematischer Aufbau				
Stator	Wicklungen			
Rotor	E-Blech & Stäbe	E-Blech & Magnete	E-Blech & Wicklungen	E-Blech

Quelle: © eigene Darstellung in Anlehnung an KIT/wbk

Abbildung 6: Gegenüberstellung der Maschinentypen PMSM, FESM, RM und ASM

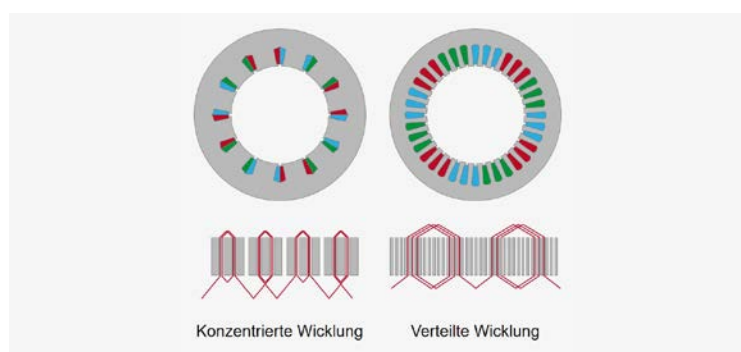


Abbildung 7: Die linke Seite der Abbildung zeigt einen Stator in der Schnittansicht (links oben) und im abgewickelten Zustand (links unten) für eine konzentrierte Wicklung. Rechts ist analog eine verteilte Wicklung dargestellt. Eine Farbe kennzeichnet eine der drei Phasen bzw. den zugehörigen Wicklungsstrang.

Quelle: © eigene Darstellung in Anlehnung an KIT/wbk

Ausgangskomponenten

Statorherstellung

Rotorherstellung

Endmontage

Recycling

3.1.1 Rotor- und Statorblechpaket



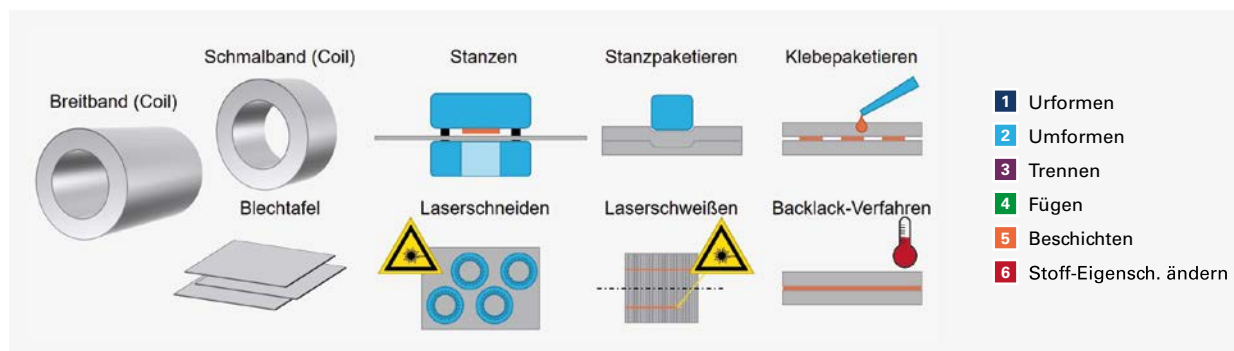
Rotor- und Stator Blechpaket

Lack-isolierter Wickeldraht

Rotorwelle

Gehäuse

Blechpakete für automobiler Antriebe werden aus nichtkornorientiertem Elektroband basierend auf Fe-Si-Legierungen hergestellt, das als kaltgewalztes und geglühtes Material in Dicken zwischen 0,1 und 1,0 mm angeboten wird und nach DIN EN 10106 spezifiziert ist. Als Standard-Dicken haben sich 0,35 mm und 0,50 mm mit Trend zu geringeren Blechstärken etabliert. Elektrobleche sind zur Isolation und zum Schutz vor Korrosion mit einem Isolierlack von etwa 1–2 µm ein- oder beidseitig beschichtet (DIN EN 10342). Die Herstellung von Einzelblechen zum Aufbau von Blechpaketen erfolgt durch Stanzen oder Schneiden. Häufig erfolgt das Stanzen in Folgeschnittwerkzeugen über moderne Schnellläuferpressen mit hohen Schnitzzahlen, für große Stanzteile und komplizierte Schnittformen ist der Komplettschnitt das bevorzugte Verfahren. Im Gegensatz zu hochproduktiven Stanzprozessen wird höchste Flexibilität auf speziellen Laserschneidanlagen mit Hochleistungsdiodenlasern erreicht. Das nachfolgende Paketieren der Einzelbleche kann je nach Anforderung direkt in den Stanzprozess integriert werden oder in einem nachgelagerten Stapel- und Fügeprozess erfolgen. Neben den konventionellen Fügeverfahren Stanzpaketieren und Laserschweißen sind neue Verfahren wie das Klebepaketieren und Backlackverfahren entwickelt worden. Aufgrund der guten elektrischen Isolation und des Verzichts auf Schweißnähte oder Stanznasen werden interlaminaire Wirbelstromverluste reduziert und unerwünschte Vibrationen zwischen den Einzelblechen durch eine vollflächige Klebeverbindung unterbunden.



Quelle: © eigene Darstellung in Anlehnung an KIT/wbk

Qualitäts- und Leistungsmerkmale

- Elektroblech: magnetische und mechanische Eigenschaften (magnetische Polarisierung, Ummagnetisierungsverluste, Streckgrenze, Temperaturbeständigkeit, Schneideignung)
- Prüfverfahren (Dichte, Widerstand, Stapelfaktor): DIN EN 60404-13
- Blechschnitt: gratfreie Schnittkanten
- Blechpaket: Stapelfaktor, geringer Verzug, ganzflächige Verbindung, kein Ausfedern, gute elektrische Isolation, keine Ölaufnahme

Einflussgrößen

- Legierungselemente, Wärmebehandlung
- Blech- und Beschichtungsdicke beeinflussen maßgeblich den Stapelfaktor
- Auslegung der Stanzwerkzeuge und Wahl der Schneidparameter
- Abnutzungsgrad der Werkzeuge

- Verringerung der Blechdicke erschwert Fügeprozesse wie Stanzpaketieren oder Schweißen
- Verbackstrategie

Alternativen und Entwicklungstrends

- Elektroblech
 - Erhöhung der Mindeststreckgrenze und Verringerung der Blechdicke
 - Neue hochreine Legierungen mit erhöhten Silizium- und Aluminiumanteilen zur Verringerung frequenzabhängiger Verluste
 - Entwicklung alternativer Werkstoffe wie Soft Magnetic Composites (zur Verarbeitung im Spritzguss)
 - Entwicklung umweltfreundlicher Lacksysteme auf Wasserbasis
- Paketieren
 - Entwicklung schnell aushärtender Backlacke zur Verringerung der Prozesszeiten

Ausgangskomponenten

Statorherstellung

Rotorherstellung

Endmontage

Recycling

3.1.2 Wickeldraht



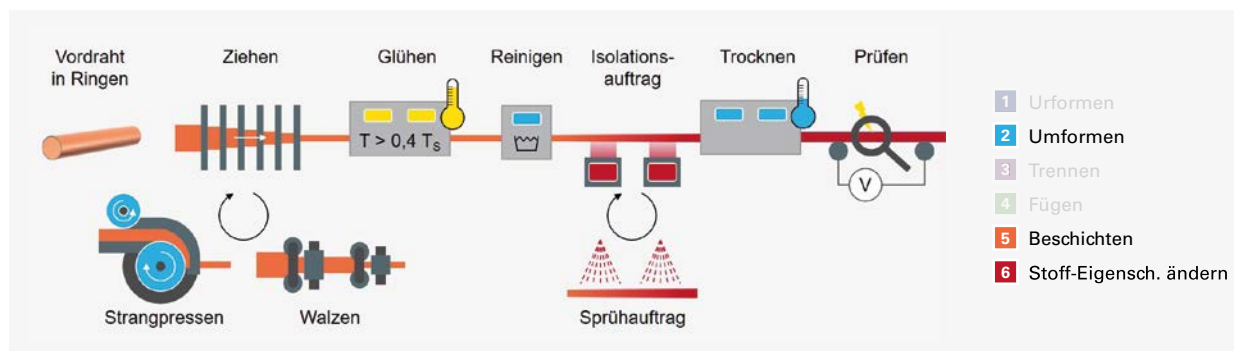
Rotor- und Stator Blechpaket

Lack-isolierter Wickeldraht

Rotorwelle

Gehäuse

Der Wickeldraht stellt neben dem Blechpaket die wichtigste Ausgangskomponente zur Fertigung von Statorn elektrischer Maschinen dar. Im Kontext elektrischer Traktionsmotoren werden in der Regel lackisolierte Rund- und Flachdrähte aus hochreinem Kupfer mit Legierungsanteilen von weniger als 0,1 % eingesetzt. Unabhängig von der späteren Leitergeometrie werden Kupferlackdrähte in der Regel aus rundem Ausgangsmaterial gefertigt, dessen charakteristische Eigenschaften in der DIN EN 1977 näher spezifiziert werden. Je nach produkt- und prozessbedingtem Anforderungsprofil an den späteren Leiter finden hierbei sowohl sauerstofffreies Kupfer der Qualitätsklasse Cu-OF1 als auch elektrolytisch raffiniertes Kupfer (Cu-ETP1) Verwendung. Während klassische Wickeldrähte mit rundem Querschnitt zumeist durch Ziehverfahren hergestellt werden, kommen zur Fertigung von Flachdrähten in der Regel mehrstufige Walzverfahren oder das kontinuierliche Strangpressen im CONFORM-Verfahren zum Einsatz. Um die durch prozessbedingte Kaltverfestigung verschlechterten mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Leiters zu verbessern, folgt auf diesen Prozessschritt in der Regel ein Rekristallisationsglühen. Nach der anschließenden Reinigung des Drahtes wird die funktionale Isolationsbeschichtung durch getränkte Filze oder einen Sprühprozess in einer Vielzahl von Schichten aufgetragen, die in Abhängigkeit von der Temperatur- und Isolationsklasse in der Regel auf PEI, PI oder PAI basieren. Abschließend wird der Wickeldraht in Drahtfässern oder auf Spulen für die E-Motoren-Produktion bereitgestellt.



Qualitäts- und Leistungsmerkmale

- Spezifische elektrische Leitfähigkeit
- Mechanische Eigenschaften des Leiters und der Isolationsbeschichtung
- Geometrische Toleranzen des Leiters und des Gesamtdrahtes
- Elektrische, thermische und chemische Eigenschaften der Isolationsbeschichtung
- Technische Lieferbedingungen: DIN EN 60317
- Prüfverfahren: DIN EN 60851

Einflussgrößen

- Legierungsanteile im Leitermaterial
- Formgebungsverfahren des Leiters
- Temperatur und Dauer des Rekristallisationsprozesses
- Kaltverfestigung des Wickeldrahtes infolge von Verpackungs- und Transportprozessen
- Abmessungen und Aspektverhältnis des Wickeldrahtes

Alternativen und Entwicklungstrends

- Wickeldrähte mit PEEK-Beschichtung: Um teilentladungsfreie Elektromotoren produzieren zu können, finden im Kontext der E-Mobilität z. T. Drähte mit thermoplastischer PEEK-Beschichtung Verwendung
- Litzendrähte: Da die Wechselstromverluste der Wicklung insbesondere bei großen Leiterquerschnitten und hohen Drehzahlen einen signifikanten Einfluss auf den Wirkungsgrad des Elektromotors haben, stehen Wickeldrähte aus verseilten Litzen im Fokus aktueller Forschungsarbeiten
- Hohlleiter: Um die Wechselstromverluste zu verringern und eine direkte Kühlung der Wicklung zu ermöglichen, wird im Kontext aktueller Forschungsarbeiten der Einsatz von Hohlleitern untersucht
- Aluminiumdrähte: Eine kostengünstige Alternative zu Kupferleitern stellen Wickeldrähte aus Aluminium dar, die bei geringerer Dichte jedoch schlechtere elektrische Eigenschaften aufweisen

Ausgangskomponenten

Statorherstellung

Rotorherstellung

Endmontage

Recycling

3.1.3 Rotorwelle



Rotor- und Stator Blechpaket

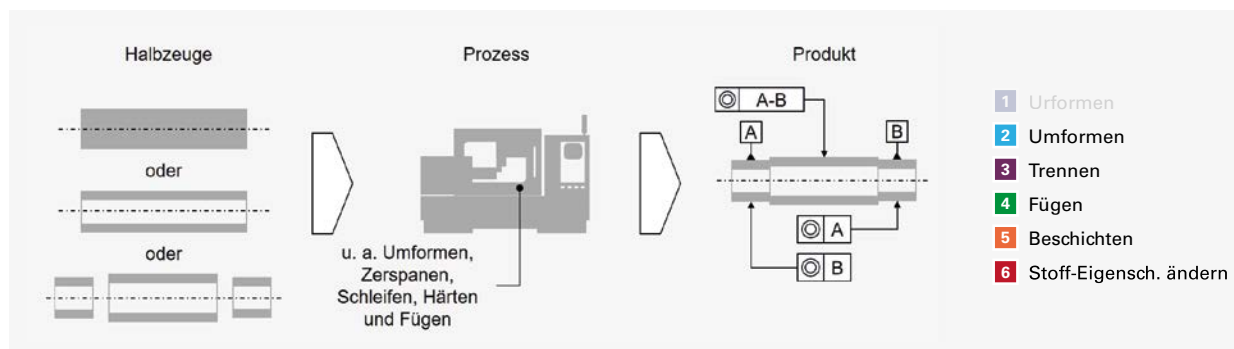
Lack-isolierter Wickeldraht

Rotorwelle

Gehäuse

Die Übertragung des Drehmoments von den Blechpaketen zum Getriebe wird durch die Rotorwelle umgesetzt. Je nach gewählter Art der Welle-Nabe-Verbindung (bspw. zylindrischer Pressverband, Passfedern) ist eine entsprechende Gestaltung des Bereiches der Rotorwelle erforderlich, der die Drehmomentanbindung zwischen Blechpaket und Rotorwelle realisiert. Die Schnittstelle zum Getriebe ist meist eine koaxiale Verzahnung, die als Innen- oder Außenverzahnung gestaltet ist. Verwendet werden hier zumeist Steckverzahnungen. Zur Einhaltung eines besonders kleinen und möglichst gleichmäßigen Luftspalts zwischen Rotor und Stator ist bei der Herstellung der Rotorwelle auf die Koaxialität der beiden Lagersitze sowie die Koaxialität des Wellenabschnitts, der die Blechpakete aufnimmt, zu den Lagersitzen zu achten. Zur Gewichtseinsparung kommen in elektrischen Traktionsantrieben Hohlwellen zum Einsatz. Je nach thermischer Auslegung des Antriebs kann die Hohlkontur ebenfalls für eine Rotorinnenkühlung verwendet werden. In diesem Fall ist an der Rotorwelle eine Abdichtung vorzusehen, um den Eintritt des Kühlmediums in den Luftspalt zu verhindern. Für die Aufnahme eines Encoders ist ebenfalls ein Wellenabschnitt vorzusehen.

Die Herstellung der Rotorwelle kann über spanende Verfahren oder die Kombination umformender und spanender Verfahren erfolgen. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Koaxialität einzelner Wellenabschnitte ist auch bei umformenden Verfahren eine spanende Endbearbeitung erforderlich. Die Hohlkontur kann durch Bohren, Ausdrehen, Umformen oder das Fügen der Welle aus mehreren Einzelteilen realisiert werden.



Quelle: © eigene Darstellung in Anlehnung an KIT/wbk

Qualitäts- und Leistungsmerkmale

- Hohe mechanische und thermische Belastbarkeit
- Hohe Oberflächengüte an Dichtflächen
- Hohe Genauigkeit der Verzahnung
- Koaxialität von Träger der Blechpakete zu Lagerstellen
- Geringe Rotormasse und Unwucht
- Geringe geometrische Toleranzen

Einflussgrößen

- Drehmomentanbindung zu Blechpaket
- Drehmomentanbindung zu Getriebe
- Drehzahlen und Rotortemperaturen im Betrieb
- Kühlkonzept (falls Rotorkühlung vorgesehen)
- Materialeigenschaften der verwendeten Halbbezeuge sowie Bearbeitungsprozess

Alternativen und Entwicklungstrends

- Massereduktion an der Rotorwelle durch bspw. Verwendung von Hybridwellen mit Anteil aus faserverstärktem Kunststoff sowie metallischen Werkstoffen mit geringer, konstanter Wandstärke
- Modularer Aufbau der Rotorwelle, um eine Flexibilität hinsichtlich unterschiedlicher Abmessungen des Blechpakets und des Getriebes zu ermöglichen

Ausgangskomponenten

Statorherstellung

Rotorherstellung

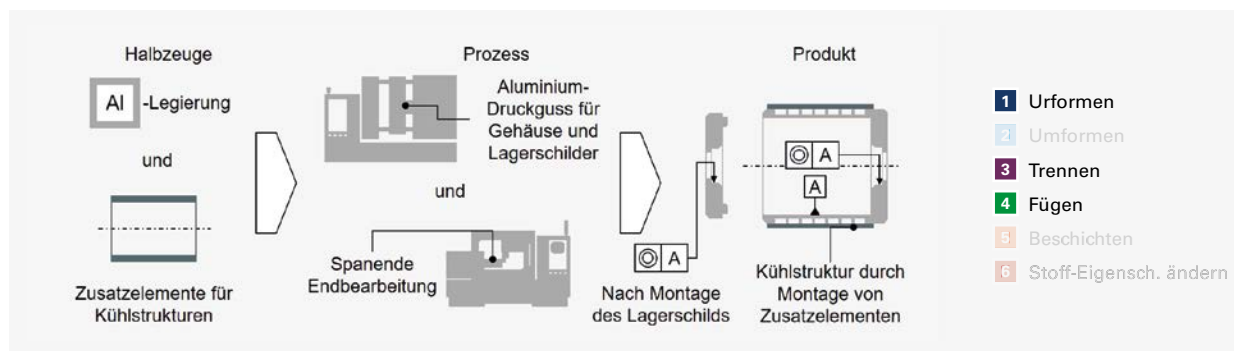
Endmontage

Recycling

3.1.4 Gehäuse

Die mechanische Integrität von Stator zu Rotor sowie die mechanische Anbindung des Getriebes an den Elektromotor werden durch das Gehäuse geschaffen. Je nach Gestaltung des Gehäuses bildet dieses eine Schnittstelle zu einem oder zwei Lagerchildern. Durch geeignete Abdichtung zwischen Gehäuse, Lagerchildern und Getriebe wird zudem sichergestellt, dass keine Fremdkörper in den Innenraum des Motors und somit in den Luftspalt zwischen Rotor und Stator gelangen können. Ebenfalls möglich ist die Integration eines Teils des Getriebegehäuses in das Motorgehäuse, um einen möglichst kompakten Aufbau der Antriebseinheit zu ermöglichen. In den meisten Fällen ist eine Kühlstruktur integriert, die während des Betriebs über eine Kühlflüssigkeit die im Stator anfallende Wärme abführt. Zudem können Aufnahmen für Sensoren erforderlich sein, um bspw. die Betriebstemperatur des Stators kontinuierlich zu erfassen.

Für Großserien erfolgt die Herstellung des Gehäuses im Druckgussverfahren mit anschließender spanender Endbearbeitung. Hierbei soll insbesondere eine hohe Koaxialität von Lagersitz und Aufnahme des Stators erreicht werden. Je nach Gestaltung der Kühlleitungen kann die Herstellung zusätzlicher Komponenten erforderlich sein, um durch Montage- und Fügevorgänge geschlossene Kühlstrukturen zu erzeugen.



Quelle: © eigene Darstellung in Anlehnung an KIT/wbk

Qualitäts- und Leistungsmerkmale

- Hohe mechanische und thermische Belastbarkeit
- Koaxialität von Lagersitzen und Aufnahme des Stators
- Hohe Wärmeleitung zwischen Kühlkanälen und Aufnahme des Stators
- Geringer Bauraum und geringe Masse
- Geringe geometrische Toleranzen

Einflussgrößen

- Drehzahlen und Rotortemperaturen im Betrieb
- Kühlkonzept
- Erforderliche Schnittstellen zu Getriebe, Kühlung, Leistungselektronik
- Materialeigenschaften der verwendeten Halbzeuge sowie Bearbeitungsprozess

Alternativen und Entwicklungstrends

- Entwicklung von Werkzeugen zur gleichzeitigen Bearbeitung von Lagersitz und Statoraufnahme
- Direkte Kühlung des Statorblechpakets
- Einsatz faserverstärkter Kunststoffe, bspw. zur Gewichtsreduktion in Lagerchildern
- Integration der Kühlstruktur in die Statorwicklung
- Ergänzung/Ersatz spanender Prozesse zur Herstellung von Lagerchildern durch umformende Prozesse

Ausgangskomponenten

Statorherstellung

Rotorherstellung

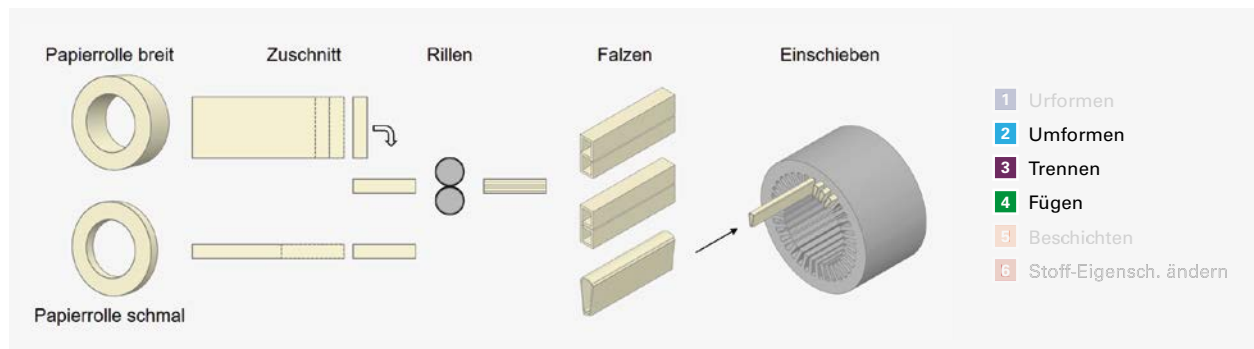
Endmontage

Recycling

3.2.1 Nutgrundisolation

Neben der Isolation jedes einzelnen Leiters durch die eigene Lackschicht ist eine zusätzliche elektrische Isolation zum Blechpaket des Stators erforderlich. Die Nutgrundisolation dient zudem zum mechanischen Schutz des Wickeldrahtes gegenüber scharfen Kanten des Blechpakets. Im Falle einer Rotorwicklung kann die Nutgrundisolation auf das Blechpaket des Rotors aufgebracht werden.

Während bei Einzelzahnspulen eines Hybridmoduls die Nutgrundisolation über eine Kunststoffumspritzung erfolgt, werden in Antrieben vollelektrischer Fahrzeuge meist Isolationspapiere verwendet. Je nach Aufbau der Kupferdrahtwicklung und je nach Anforderungen an die Spannungsfestigkeit der Wicklung wird eine U-, O-, B- oder S-Form der Papierisolation gefordert. Über einen Rill-, Falz-, Einschub- und Trennvorgang erfolgt das automatisierte Einbringen der Papierisolation in alle Nuten des Stators. Hierbei ist auf eine präzise Einstellung des Überstands des Papiers an beiden Planflächen des Stators zu achten, um den Draht einerseits bei der Ablage vor scharfen Kanten des Blechpakets zu schützen und ihn andererseits auch nicht bei seiner Ablage zu hindern. Genauso ist die Einhaltung der gefalteten Form des Isolationspapiers entscheidend, um das Einbringen der Kupferdrahtwicklung nicht zu erschweren. Der beschriebene Vorgang zum Einbringen der Papierisolation erfolgt in der Regel in vollautomatisierten Anlagen.



Quelle: © eigene Darstellung in Anlehnung an KIT/wbk

Qualitäts- und Leistungsmerkmale

- Elektroisolierstoffe: DIN EN 60216-2
- Hohe Spannungsfestigkeit
- Hohe Wärmeleitfähigkeit
- Hohe thermische Belastbarkeit
- Genauigkeit bei Form und Lage des Isolationsmaterials
- Geringe Wandstärke der Isolation

Einflussgrößen

- Drehzahlen und Rotortemperaturen im Betrieb
- Gewähltes Isolationsmaterial
- Art der Einspannung des Stators
- Anforderungen an Form und Lage der Isolation werden durch nachfolgende Prozessschritte sowie Qualitätsanforderungen des Motors beeinflusst

Alternativen und Entwicklungstrends

- Modularer Aufbau der Anlage, um Variantenflexibilität in der Statorherstellung zu ermöglichen
- Inline-Qualitätssicherung durch Bilderkennung

Ausgangskomponenten

Statorherstellung

Rotorherstellung

Endmontage

Recycling

3.2.2 Wicklungsherstellung mit Runddraht

Wickelf Verfahren mit Runddrahnten können in direkte und indirekte Technologien unterteilt werden. Direkte Wickelf Verfahren zeichnen sich durch eine direkte Bewicklung des Spulenkörpers aus. Zu den direkten Wickelf Verfahren zählen das Linear-, das Flyer- und das Nadelwickeln. Die Funktionsweise ist bei allen drei Verfahren ähnlich: Zu Beginn wird der Wickeldraht an dem Spulenkörper befestigt (terminiert), im Anschluss wird der Draht durch eine Düse auf den Spulenkörper gewickelt. Beim Linearwickelf Verfahren dreht sich der Spulenkörper, beim Flyer- und Nadelwickeln führt hingegen die Düse die Hauptbewegung aus. Mit Hilfe des Linearwickelf Verfahrens können nur konzentrierte Wicklungen für Anwendungen im hybriden Fahrzeugeinsatz hergestellt werden. Das Flyerwickeln ist nur für Rotoren, segmentierte oder auengentete Statoren anwendbar. Im Nadelwickelf Verfahren können konzentrierte oder verteilte Wicklungen sowohl für Rotoren als auch für Statoren im Vollblechschnitt hergestellt werden. Somit ist es das aktuell flexibelste direkte Wickelf Verfahren, benötigt aber auch die längsten Durchlaufzeiten. Bei indirekten Wickelf Verfahren wird die Spule, die vorher durch ein direktes Verfahren hergestellt wurde, von einem Werkzeug oder einer Schablone auf den Spulenkörper übertragen. Die Einziehtechnik ist das aktuell einzige in einer automatisierten Serienanwendung vorhandene indirekte Wickelf Verfahren für Runddrahnte. Durch das sogenannte Einziehen der Wicklungen in den Stator wird die Ordnung der Drahnte jedoch aufgehoben und es entstehen geringere Füllgrade als bei direkten Verfahren.

Nutgrund-

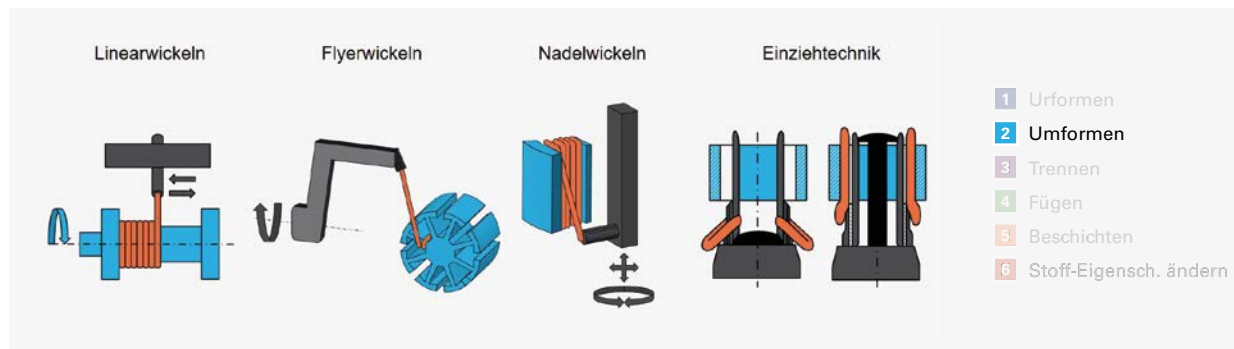
Wicklungs-

Verschalten

Impragnie-

Elektrische

Prüfung



Quelle:  eigene Darstellung in Anlehnung an KIT/wbk

Qualitäts- und Leistungsmerkmale

- Hohes Verhältnis von Draht- zu Nutflache der Wicklung (Füllfaktor)
- Kleine Wickelköpfe
- Schonende Verarbeitung des Wickeldrahtes
- Produktivität und Effizienz im Prozess
- Reproduzierbarkeit im Prozess
- Prozessstabilität
- Automatisierbarkeit

Einflussgrößen

- Baugröße
- Stückzahlen
- Kosten
- Drahtdurchmesser
- Drahttoleranzen
- Nutgeometrien
- Zahnkopfgeometrie

Alternativen und Entwicklungstrends

- Aktuelle Entwicklungstrends im Bereich der Herstellung von Runddrahtwicklungen zielen darauf ab, die hohen Füllfaktoren und geringen Wickelkopflangen bei der Herstellung von direkten Wickelf Verfahren mit den geringen Drahtbelastungen von indirekten Wickelf Verfahren zu kombinieren. Um hochperformante Maschinen produzieren zu können, ist hier besonders die Verwendung von Vollblechschnitten eine wichtige Randbedingung. Dies kann entweder durch kontinuierliche Optimierung der bekannten Verfahren oder Neuentwicklungen angestrebt werden
- Ein weiterer entscheidender Entwicklungsbedarf liegt bei der wirtschaftlichen Fertigung verschiedener Baugrößen und Variantenvielfalten. Zwar sind die Varianten und Baugrößen im automobilen Umfeld begrenzt, dennoch ist eine gewisse Flexibilisierung anzustreben
- Kompaktieren von Wicklungen zur Erhöhung des Füllfaktors

Ausgangskomponenten

Statorherstellung

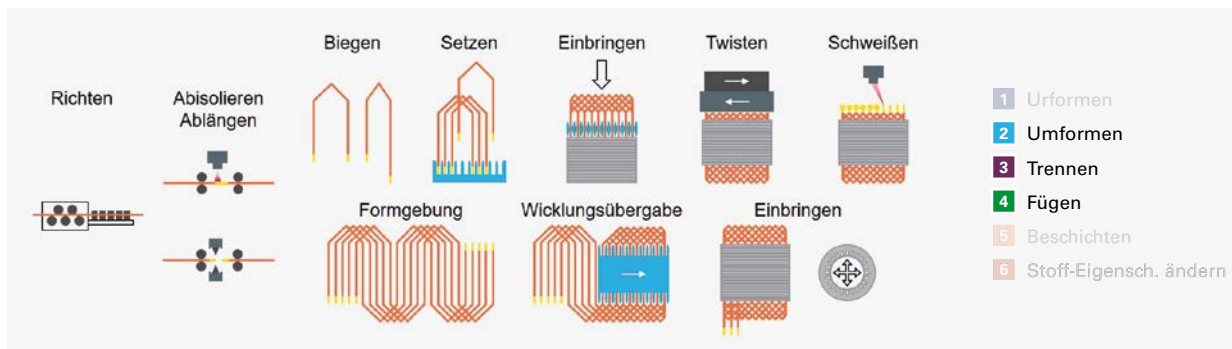
Rotorherstellung

Endmontage

Recycling

3.2.3 Wicklungsherstellung mit Flachdraht

Als Alternative zur klassischen Wickeltechnik konnte sich in den vergangenen Jahren die Herstellung von verteilten Statorwicklungen aus Flachdraht am Markt etablieren. Die beiden Verfahrenstypen sind als Hairpin-Technologie und Flachdrahtwellenwicklung (Continuous Hairpin) bekannt und zeichnen sich durch hohen Automatisierungsgrad, hohe Wiederholbarkeit sowie höchste Produktivität aus. Der Einsatz vergleichsweise massiver Wickeldrähte rechteckigen Querschnitts gestattet eine Erhöhung des Kupferfüllfaktors und damit die Herstellung qualitativ hochwertiger Traktionsmotoren mit hoher Drehmomentdichte. Das Grundprinzip der Wicklungsherstellung mit Flachdraht basiert dabei stets auf einer signifikanten Reduktion der Leiteranzahl sowie einer Abfolge von mehrstufigen Formgebungs-, Montage- und Kontaktierprozessen. Die Prozesskette zur Fertigung von Statorwicklungen mit Hairpin-Technologie besteht daher im Kern aus den vier sequentiellen Prozessschritten der Formgebung (Ablängen, Abisolieren, Biegen), des Einbringens (Setzen und axiales Fügen), des Twistens (Weiten und Schränken) sowie des Kontaktierens der Spulen. Die Flachdrahtwellenwicklung hingegen zeichnet sich durch die kontinuierliche Verarbeitung des Wickeldrahtes und eine höhere Komplexität der Einzelprozesse aus, woraus eine Verkürzung der Prozesskette auf die Formgebung und das radiale Fügen der Wicklung in das Blechpaket resultiert. Als generelle Nachteile beider Verfahren sind hohe Kosten, die Beschränkung auf mittlere/große Stückzahlen sowie signifikante Fertigungsrestriktionen und Wechselstromverluste anzusehen.



Quelle: © eigene Darstellung in Anlehnung an KIT/wbk

Qualitäts- und Leistungsmerkmale

- Füllfaktor der Wicklung
- Schonende Verarbeitung des Wickeldrahtes
- Produktivität und Effizienz im Prozess
- Reproduzierbarkeit im Prozess
- Robustheit der Einzelprozesse und der gesamten Prozesskette gegenüber Störgrößen
- Variantenflexibilität und kurze Rüstzeiten
- Inline-Qualitätssicherung

Einflussgrößen

- Motortopologie, Betriebsverhalten und Wickelschema des Elektromotors
- Geometrische und mechanische Eigenschaften des isolierten Flachdrahtes
- Aspektverhältnis des isolierten Flachdrahtes
- Art des Formgebungsverfahrens (werkzeugbasiert oder flexibel)
- Art des Schweißverfahrens (Laser- oder Elektronenstrahlschweißen)

Alternativen und Entwicklungstrends

- Umformung von Runddrähten: Um die Produktionskosten signifikant zu senken und gleichzeitig die prinzipbedingten Vorteile der Flachdraht-Wickeltechnologien zu wahren, wurde im Kontext der Hairpin-Technologie die Verarbeitung von Runddrähten und deren nachfolgende Formänderung beschrieben
- Litzendrähte: In der jüngeren Vergangenheit wurde vermehrt die Substitution des massiven Leitermaterials durch verseilte Litzen untersucht, um die frequenzabhängigen Wechselstromverluste der Flachdrahtwicklung zu verringern – in diesem Zusammenhang stellen insbesondere das veränderte Formgebungsverhalten sowie komplexe Abisolier- und Schweißprozesse Herausforderungen dar
- Variantenflexibilität: Da der Einsatz werkzeugbasierter Herstellungsverfahren zumeist nur für mittlere bis große Stückzahlen wirtschaftlich möglich ist, steht die Flexibilisierung der Prozesskette zur Wicklungsherstellung mit Flachdraht im Fokus aktueller Forschungsarbeiten und Entwicklungen

Ausgangskomponenten

Statorherstellung

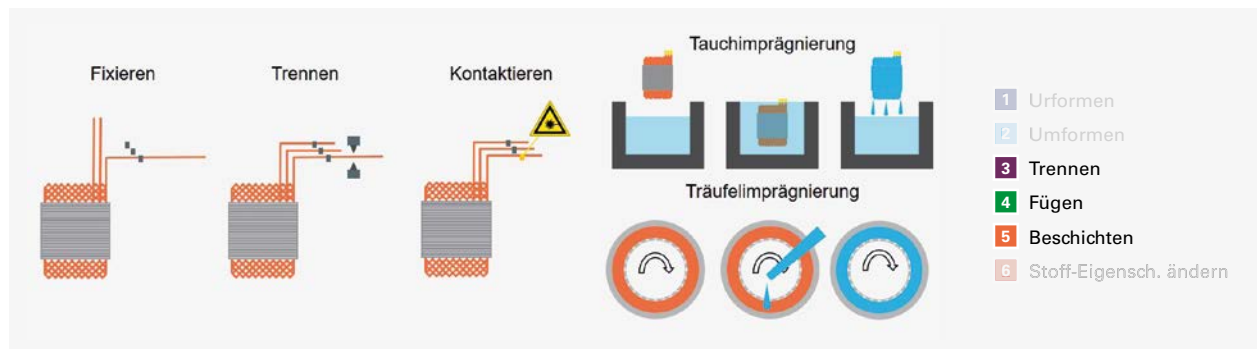
Rotorherstellung

Endmontage

Recycling

3.2.4 Verschalten und Imprägnieren

Prinzipiell sollte bei der Verschaltung von Wicklungen eine Unterscheidung von Spulenwicklungen mit vielen Einzeldrähten und Formspulen mit stabilen Leitern, wie beispielsweise bei Hairpins, vorgenommen werden. Die Verschaltung bezeichnet die Trennung, Fixierung und anschließende Kontaktierung der offenen Leiterenden. Die Trennung kann durch das weiche Kupfer einfach mechanisch realisiert werden. Bei Wicklungen mit vielen Einzeldrähten stellt in erster Linie die erschwerte Handhabung eine Herausforderung bei der Verschaltung dar. Da die Drahtbündel der Spule dazu neigen, sich auseinanderzubiegen, erfolgt die Fixierung häufig in manuellen oder teilautomatisierten Prozessen. Die anschließende Kontaktierung kann durch Crimpen oder ähnliche Verfahren vorgenommen werden. Bei Formspulen hingegen ist die Formstabilität gegeben, weshalb die Fixierung einfacher realisiert werden kann. Allerdings muss bei dem Schritt der Kontaktierung, der häufig durch das Laser- oder alternativ das Elektronenstrahlschweißen realisiert wird, die Klemmung sichergestellt sein. Imprägnieren ist zur Verbesserung der Lebensdauer zwingend notwendig, dient aber nicht primär der weiteren Isolation. Hierbei kann die Wicklung mit dem Blechpaket beispielsweise in Harz getaucht werden (Tauchimprägnierung) oder auch durch Düsen mit Harz bedeckt werden (Träufel-Imprägnierung). Wichtig bei den Imprägnierverfahren sind Kenntnisse der chemischen Zusammensetzung des Harzes sowie von dessen Fließ- und Aushärteverhalten. Die beiden Prozesse Verschalten und Imprägnieren bestehen aus vielen Fertigungsschritten und erfordern daher spezifische Fachkenntnisse.



Quelle: © eigene Darstellung in Anlehnung an KIT/wbk

Qualitäts- und Leistungsmerkmale

- Mechanisch stabile und sichere Kontaktierung
- Gute Leitfähigkeit der Kontaktierstellen
- Ausreichende, aber nicht übermäßige Harzimprägnierung
- Reproduzierbarkeit
- Prozessstabilität und -robustheit
- Energiebedarf
- Wärmeleitfähigkeit der Imprägnierung bei gleichzeitig hoher Isolationsfestigkeit

Einflussgrößen

- Anzahl Kontaktstellen
- Wickelschema
- Wicklungsart
- Drahtabmessungen und Isolationstyp
- Temperatur im Prozess
- Luftfeuchtigkeit

Alternativen und Entwicklungstrends

- Im Bereich der Verschaltung gehen die Entwicklungstrends zu gut automatisierbaren Verfahrenskombinationen
- Bei der Imprägnierung von Wicklungen ist ein deutlicher Trend zum Träufel-Imprägnieren zu erkennen. Dies liegt an der vorteilhaften Ressourceneffizienz und der geringeren Blechpaketverschmutzung

Ausgangskomponenten

Statorherstellung

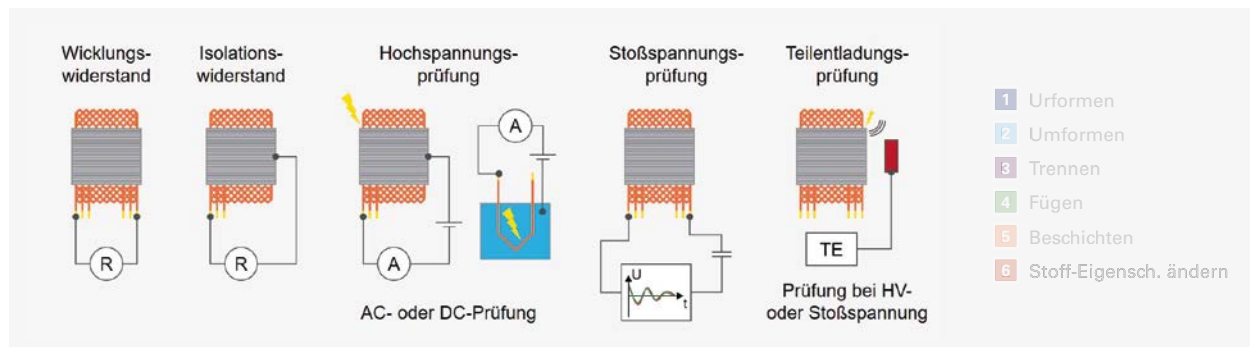
Rotorherstellung

Endmontage

Recycling

3.2.5 Elektrische Prüfung

Um die Funktionsfähigkeit der Statorwicklung sowie des Isolationssystems vor der Montage des Stators in das Motorgehäuse sicherzustellen und damit eine effiziente Nacharbeit oder direkte Rückführung in den Recyclingkreislauf zu ermöglichen, ist an das Imprägnieren des Stators ein elektrischer Prüfprozess angeschlossen. Darüber hinaus können insbesondere bei indirekten Wickelverfahren vereinfachte elektrische Prüfungen der Teilkomponenten prozessbegleitend zum Einsatz kommen, um Fehler frühzeitig erfassen und korrigieren zu können. Den ersten Schritt der elektrischen Prüfung stellt zumeist die Messung des ohmschen Widerstands der Wicklung dar, der die Detektion prozess- und produktseitiger Fehler ermöglicht. Des Weiteren gilt es, in einer nicht zerstörenden Prüfung den ohmschen Widerstand des Isolationssystems der Wicklung zum Blechpaket zu erfassen, der Rückschlüsse auf mögliche Kurzschlüsse zwischen Wicklung und Blechpaket gestattet. Zudem kann die Hochspannungsfestigkeit des Isolationssystems in einem potenziell zerstörenden Prozess geprüft werden, um Isolationsfehler sowie unzulässige Luft- und Kriechstrecken zu identifizieren. Im Gegensatz zu den vorherigen Prüfmethode ermöglicht die Durchführung von Stoßspannungsprüfungen anhand der Auswertung der Sprungantwort des Systems die Detektion von Kurzschlüssen und Isolationsfehlern innerhalb der Wicklung, die zu einem kurzfristigen Versagen des Motors im Betrieb führen würden. Ergänzend können durch Teilentladungsprüfungen Schwachstellen im Isolationssystem der Wicklung frühzeitig identifiziert werden, was die langfristige Betriebsfähigkeit des Elektromotors sicherstellt.



Quelle: © eigene Darstellung in Anlehnung an KIT/wbk

Qualitäts- und Leistungsmerkmale

- Geschwindigkeit der Prüfung
- Vergleichbarkeit/Wiederholbarkeit der Prüfung
- Diagnosefähigkeit des Prüfgerätes
- Kompensation von Umwelteinflüssen
- Automatische Protokollierung und Messdatenverwaltung

Einflussgrößen

- Messunsicherheiten
- Anbindung der Wicklung an das Prüfgerät bzw. die Messklemmen
- Umwelteinflüsse
 - Umgebungstemperatur
 - Luftdruck
 - Luftfeuchtigkeit
- Elektromagnetische Störfelder
- Kalibrierung der Prüfgeräte

Alternativen und Entwicklungstrends

- Elektrische Eingangsprüfung von Wickeldraht und Flächenisolation zur Detektion potenzieller Fehlerursachen
- Elektrische Prüfung der Statorwicklung vor dem Imprägnieren zur frühzeitigen Erfassung und Korrektur von Wicklungs- und Isolationsfehlern
- Prozessbegleitende Prüfung der Komponenten sowie der Statorwicklung durch Inline-Messung und Auswertung von Qualitätsmerkmalen
- Korrelation von Prozessgrößen mit produktseitigen Qualitätsmerkmalen
- Einsatz optischer Messtechnik zur prozessbegleitenden Fehlerdetektion, wie z. B. Isolationsfehlern des Wickeldrahtes oder der Flächenisolation

Ausgangskomponenten

Statorherstellung

Rotorherstellung

Endmontage

Recycling



Aktivkomponente

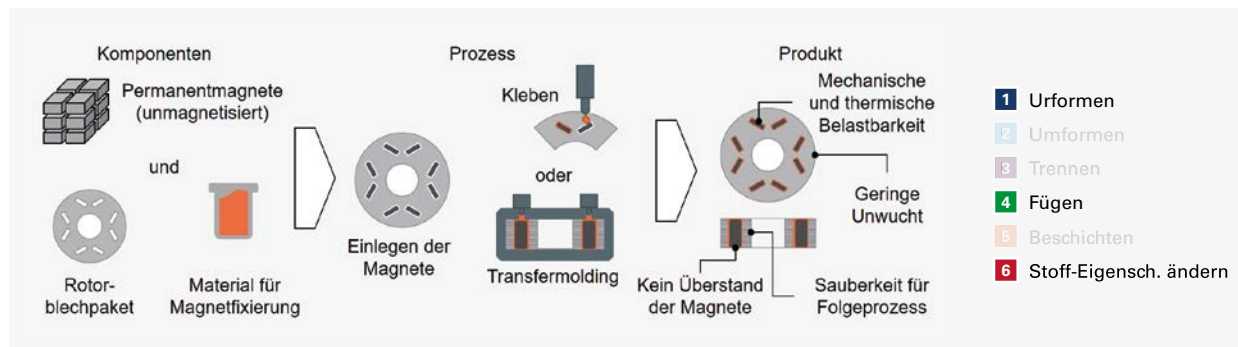
Welle-Nabe-Verbindung

Auswuchten

3.3.1 Magnetmontage und -fixierung

In der PMSM kommen zur Erzeugung des rotorfesten Magnetfelds Permanentmagnete zum Einsatz. Während die Magnete in Industrieantrieben üblicherweise am Umfang des Rotorblechpakets montiert wurden (sogenannte Oberflächenmagnete), werden sie in elektrischen Traktionsantrieben innerhalb des Blechpakets verbaut. Hieraus ergibt sich der Vorteil, im Feldschwächebereich des Motors besonders hohe Drehzahlen zu ermöglichen. Zudem liegt somit im Vergleich zu Oberflächenmagneten eine höhere Sicherheit gegenüber Fliehkräften im Betrieb vor, ohne dass eine Bandagierung des Rotors benötigt wird.

Das Magnetmaterial (meist NdFeB) ist aufgrund seiner Neigung zu Korrosion mit einer entsprechenden Schutzschicht versehen. Dies kann bspw. eine Epoxy- oder Nickelbeschichtung sein. Aufgrund der Sprödigkeit des Magnetmaterials liegt beim Fügen der Magnete in das Blechpaket ein Fügepalt vor. Um diesen Fügevorgang als kraftfreies Einlegen umsetzen zu können, werden nicht magnetisierte Permanentmagnete eingesetzt. Die Magnetisierung erfolgt erst im späteren Verlauf der Rotorproduktion. Zur Sicherung der Lage der Magnete innerhalb des Blechpakets sowie zum Schutz vor Erschütterungen ist eine zusätzliche Fixierung der Magnete notwendig. Diese kann durch Verkleben, Umspritzen, Spritzpressen, Verstemmen oder eine Kombination dieser Prozesse umgesetzt werden. Je nach Auswahl des Prozesses zur Magnetfixierung sind thermisch oder durch UV-Licht unterstützte Aushärtvorgänge notwendig.



Quelle: © eigene Darstellung in Anlehnung an KIT/wbk

Qualitäts- und Leistungsmerkmale

- Hohe magnetische Feldstärke und hohe Entmagnetisierungstemperatur
- Homogenität des magnetischen Feldes (somit geringe magnetische Unwucht)
- Geringer Unwuchtbeitrag durch Magnetmontage und -fixierung
- Sicherheit der Magnete gegenüber dem Setzverhalten im Betrieb
- Schonende Behandlung der Magnete beim Einlegevorgang

Einflussgrößen

- Maximale Drehzahl und Rotortemperatur im Betrieb
- Magnetanordnung im Blechpaket
- Fügepiel zwischen Blechpaket und Magnet
- Technische Sauberkeit der Magnete und des Blechpakets
- Fertigungsabweichungen an Blechpaket und Magneten

Alternativen und Entwicklungstrends

- Senkung des Energiebedarfs durch gezielten Einsatz induktiver Erwärmung oder UV-Licht für das Aushärten der Magnetfixierung
- Durch eine selektive Montage der Permanentmagnete kann eine gezielte Beeinflussung der Unwucht des Blechpakets erreicht werden; dies hat positive Auswirkungen auf die Initialunwucht des Rotors (siehe „Auswuchten“)
- Da die in elektrischen Traktionsantrieben verwendeten Permanentmagnete meist quaderförmig sind, kann durch die Entwicklung additiver Fertigungsverfahren eine Anpassung an die benötigten magnetischen Eigenschaften und somit eine Steigerung der Materialeffizienz erreicht werden

Ausgangskomponenten

Statorherstellung

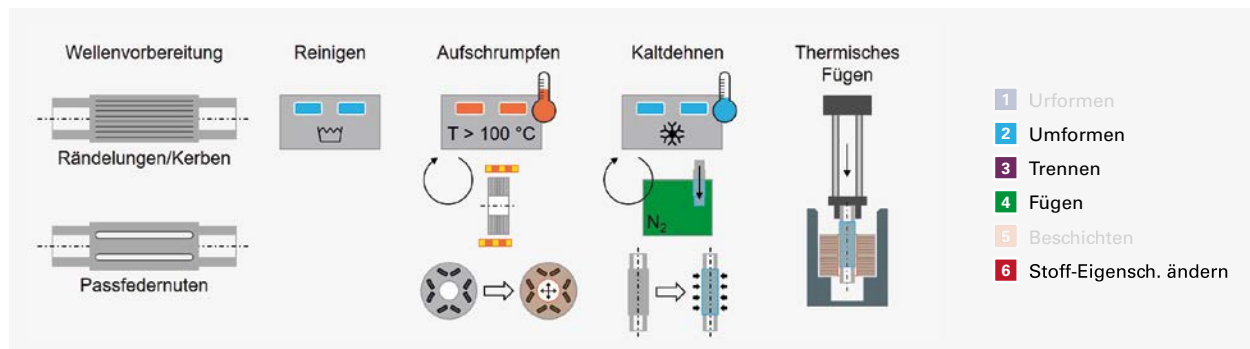
Rotorherstellung

Endmontage

Recycling

3.3.2 Welle-Nabe-Verbindung

Die Welle-Nabe-Verbindung (WNV) der Aktivkomponente des Rotors und der Rotorwelle ist in den direkten Leistungsfluss der elektrischen Maschine integriert und daher hohen statischen und dynamischen Betriebsbelastungen unterworfen. Während grundsätzlich sowohl form- und kraft- als auch stoffschlüssige Verbindungstypen in der E-Motoren-Produktion eingesetzt werden, dominieren derzeit im Bereich automobiler Anwendungen kraftschlüssige WNV. Obgleich durch die Wahl der Verbindung sowohl die Anzahl kostenintensiver Bearbeitungsoperationen der Rotorwelle minimiert als auch auf zusätzliche Übertragungselemente wie Passfedern verzichtet werden kann, weist die flächige Verbindung der Fügepartner darüber hinaus insbesondere im dynamischen Betrieb Vorteile hinsichtlich des Übertragungsverhaltens auf. Um trotz hoher Belastungen der WNV durch hohe Drehmomente, Schwingungen und Temperaturgradienten eine ausreichende Betriebssicherheit des Elektromotors zu gewährleisten, müssen in der Regel zylindrische Presspassungen mit großem Übermaß realisiert werden. Infolgedessen werden zur Reduktion der erforderlichen Prozesskräfte beim Fügen der Komponenten zumeist thermische Fügeprozesse wie das induktive Aufschumpfen der Aktivkomponente, das Kaltdehnen der Rotorwelle oder die Kombination beider Verfahren eingesetzt. Da eine ausschließlich kraftschlüssige WNV insbesondere bei hochausgenutzten Maschinen technisch und/oder wirtschaftlich nicht immer möglich ist, kann das notwendige Übermaß unter Einhaltung der Betriebssicherheit durch die Kombination mit form- und stoffschlüssigen Prinzipien verringert werden.



Quelle: © eigene Darstellung in Anlehnung an KIT/wbk

Qualitäts- und Leistungsmerkmale

- Beitrag der Welle-Nabe-Verbindung zur Unwucht des Rotorpakets
- Setzverhalten der WNV
- Wärmeleitfähigkeit der WNV
- Energiebedarf des Fügeprozesses
- Taktzeit des Fügeprozesses
- Genauigkeit des Fügeprozesses
- Robustheit gegenüber Toleranzen der Aktivkomponente und der Rotorwelle

Einflussgrößen

- Drehmomentanforderung
- Geometrische Toleranzen der Aktivkomponente
- Geometrische Toleranzen der Rotorwelle
- Oberflächentopographie der Fügepartner
- Werkstoffe der Fügepartner
- Betriebsverhalten und -temperatur des Elektromotors
- Kühlsystem des Elektromotors

Alternativen und Entwicklungstrends

- Kaltes Fügen der Welle-Nabe-Verbindung: Um sowohl den zur Temperierung der Fügepartner erforderlichen Energie- als auch den Zeitbedarf zu verringern, wird in vielen Anwendungsfällen eine Substitution des thermischen Fügeprozesses durch ein Fügen bei Raumtemperatur angestrebt. Da hiermit prinzipbedingt eine Verringerung der maximalen Presspassung einhergeht, sind in der Regel zusätzliche Maßnahmen zur Erreichung der geforderten Betriebssicherheit notwendig
- Kombination von Wirkprinzipien: Eine Möglichkeit zur Verringerung des notwendigen Übermaßes kraftschlüssiger Welle-Nabe-Verbindungen bei gleichzeitiger Einhaltung der Betriebssicherheit stellt deren Kombination mit form- oder stoffschlüssigen Verbindungselementen dar. Beispiele hierfür sind Rändelungen der Wellenoberfläche, Passfederverbindungen, Klebungen der Kontaktflächen oder Schweißungen an den Übergangsstellen beider Fügepartner

Ausgangskomponenten

Statorherstellung

Rotorherstellung

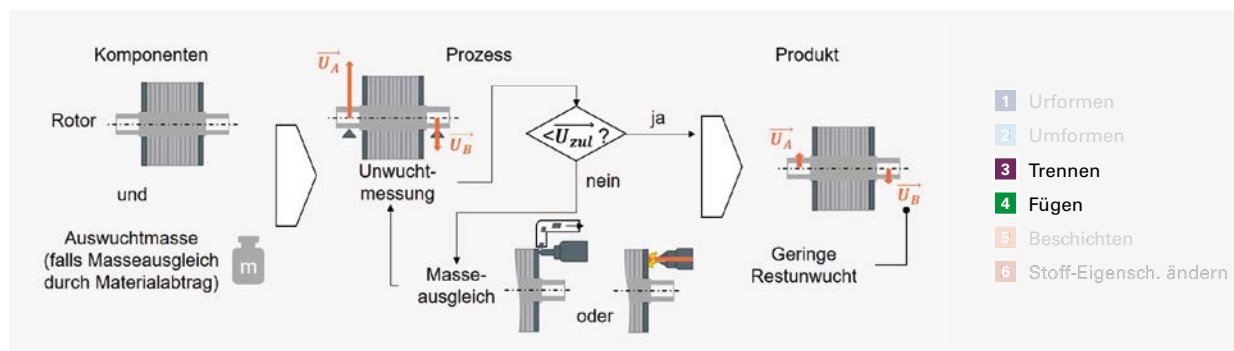
Endmontage

Recycling

3.3.3 Auswuchten

Aufgrund von Materialinhomogenitäten sowie Fertigungs- und Montageabweichungen, die bei der Rotorproduktion auftreten können, ist ein Auswuchtvorgang für jeden einzelnen Rotor zwingend erforderlich. Nur so kann für jeden Rotor die von der Wuchtgüte (bspw. G2,5) geforderte Massenexzentrizität von wenigen Mikrometern erreicht werden. Durch das Auswuchten werden hör- und spürbare Vibrationen im Betrieb des Motors reduziert und die zu erwartende Lebensdauer des Rotors wird gesteigert.

Der Auswuchtprozess umfasst mindestens eine Messung der Initialunwucht, einen Masseausgleich sowie eine erneute Unwuchtmessung. Wird bei der zweiten Unwuchtmessung keine zulässige Restunwucht erreicht, wird ein erneuter Masseausgleich durchgeführt, bis der Rotor die geforderte Wuchtgüte erreicht. Der Masseausgleich kann durch Materialabtrag (bspw. Bohren, Fräsen) oder Materialauftrag (bspw. Schweißen, Nieten, Kleben, Einpressen von Auswuchtmassen) erfolgen. Eine höhere Sicherheit im Betrieb erreicht das Auswuchten durch Materialabtrag, da kein Ablösen einer aufgetragenen Auswuchtmasse auftreten kann. Allerdings wird zum Materialabtrag meist eine zusätzliche Komponente am Rotor benötigt (bspw. Wuchtscheibe), um den Abtrag nicht direkt am Blechpaket oder Rotor vornehmen zu müssen. Der Auswuchtvorgang erfolgt in der Serienproduktion durch automatisierte Anlagen mit integrierter Handhabung der Rotoren zwischen Unwuchtmessung und Masseausgleich.



Quelle: © eigene Darstellung in Anlehnung an KIT/wbk

Qualitäts- und Leistungsmerkmale

- Genauigkeit der Unwuchtmessung und des Masseausgleichs
- Hohe erreichbare Wuchtgüte (entspricht einer geringen Restunwucht)
- Geringe Anzahl an Durchläufen bis zum Erreichen der Wuchtgüte
- Sicherheit des Auswuchtergebnisses auch im Betrieb (trotz auftretender hoher mechanischer und thermischer Belastungen)

Einflussgrößen

- Wuchtgüte (Vorgabe durch Auslegung)
- Initialunwucht des Rotors
- Rotortemperatur (bspw. durch vorausgehende thermische Fügevorgänge beeinflusst)
- Einfluss der Auswuchtmaschine auf Ergebnis der Unwuchtmessung (bspw. Lagerung und Antrieb des Rotors in der Auswuchtmaschine)
- Werkstoff für Materialabtrag oder -auftrag

Alternativen und Entwicklungstrends

- Reduktion der Initialunwucht der Rotoren durch geeignete Konstruktion, Fertigung und Montage der Rotoren
- Entwicklung additiver Auswuchtverfahren mit hoher mechanischer und thermischer Belastbarkeit der Auswuchtmasse
- Selektive Montage der Rotorkomponenten, um die beim Auswuchten im ersten Messschritt erfasste Initialunwucht zu reduzieren. Hiermit soll sowohl eine Verringerung der bei der Unwuchtmessung auftretenden Messabweichungen erreicht als auch der für den Masseausgleich erforderliche Aufwand reduziert werden

Ausgangskomponenten

Statorherstellung

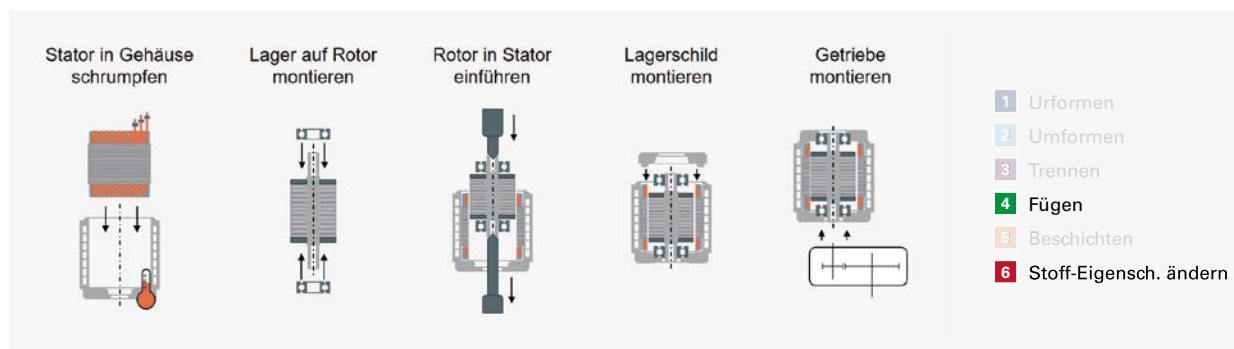
Rotorherstellung

Endmontage

Recycling

3.4.1 Endmontage

Um den Leistungsfluss von Stator über Rotor und Getriebeuntersetzungen bis hin zur Ausgangswelle des Getriebes dauerhaft zu ermöglichen, erfolgt abschließend die Endmontage aller Baugruppen des Elektromotors. In diesem Zusammenhang muss sowohl der Stator in das noch einseitig offene Gehäuse des Motors eingebracht als auch der Rotor in den Stator sowie das Getriebe in das Motorgehäuse gefügt werden. Der Fügeprozess von Motorgehäuse und Stator basiert zumeist auf dem thermischen Aufschumpfen des Gehäuses auf das Statorblechpaket, wobei zur Erhöhung der Betriebssicherheit stoffschlüssige Verbindungselemente wie Klebungen und Schweißungen Verwendung finden können. Die Montage des Rotors erfolgt durch dessen axiale Einführung in den Stator. Dabei ist eine koaxiale Führung zu gewährleisten, um bei geringem Luftspalt einen Kontakt zwischen Rotor und Stator zu verhindern. Besonders bei PMSM ist eine steife Führung des Rotors erforderlich, um Anziehungskräfte zwischen magnetischem Rotor und Statorblechpaket aufnehmen zu können. Im Falle einer PMSM wird der Rotor in der Regel zwischen Auswuchtschritt und Endmontage magnetisiert. Je nach Aufbau des Motors erfolgt vor und/oder nach dem Einführen des Rotors die Montage eines oder zweier Lagerschilder. Die Montage eines Encoders kann ebenfalls nach dem Einführen des Rotors erfolgen. Vor der Montage des Getriebegehäuses erfolgen der Auftrag von Dichtmaterial auf mindestens einem der Fügepartner sowie die Integration von Sensorik. Nach dem Verschrauben des vormontierten Getriebes mit dem Gehäuse erfolgt meist das Verlegen elektrischer sowie hydraulischer Leitungen, um Betrieb und Kühlung des Motors sowie Schmierung des Getriebes zu ermöglichen.



Qualitäts- und Leistungsmerkmale

- Flächenkontakt zwischen Stator und Gehäuse
- Geringer und gleichmäßiger Luftspalt zwischen Rotor und Stator
- Koaxialität von Gehäuse, Stator, Rotorwelle und Getriebe-Eingangswelle
- Abdichtung der Fügepartner zum Kühlsystem und zum Getriebe
- Steifigkeit der Montagevorrichtung
- Robustheit gegenüber Toleranzen/Störgrößen

Einflussgrößen

- Geometrische Toleranzen der Fügepartner
- Oberflächentopographie der Fügepartner
- Steifigkeit der Montagevorrichtung in radialer Richtung (beim Einführen des Rotors in den Stator)
- Typ bzw. magnetisches Feld des Rotors
- Betriebsverhalten und -temperatur des Elektromotors
- Kühlsystem des Elektromotors

Alternativen und Entwicklungstrends

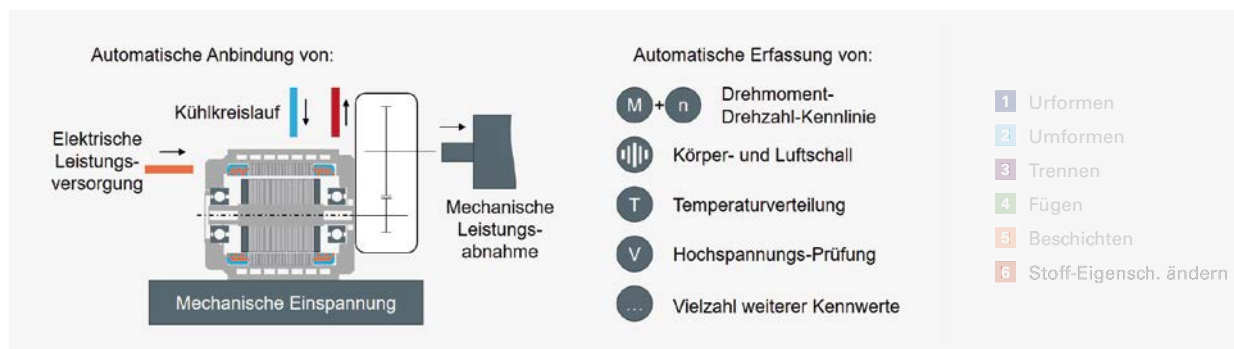
- Weiterentwicklung der Anlagentechnik zum Einführen des Rotors, um durch besonders präzise und steife Führungen auch bei besonders kleinen Luftspalten die Endmontage des Rotors zu ermöglichen
- Kaltes Fügen der Baugruppen: Um sowohl den zur Temperierung der Fügepartner erforderlichen Energieaufwand als auch den Zeitbedarf zu verringern, wird in vielen Anwendungsfällen eine Substitution des thermischen Fügeprozesses durch ein Fügen bei Raumtemperatur angestrebt. Da hiermit prinzipbedingt eine Verringerung der maximalen Presspassung einhergeht, sind in der Regel zusätzliche Maßnahmen zur Erreichung der geforderten Betriebssicherheit notwendig

Ausgangskomponenten Statorherstellung Rotorherstellung Endmontage Recycling

3.4.2 End-of-Line-Prüfung

Im Rahmen der Qualitätssicherung wird jede produzierte Antriebseinheit (Elektromotor, Leistungselektronik und Getriebe) einer End-of-Line-Prüfung unterzogen. Hierbei sollen insbesondere aus dem Verlauf von Drehzahl zu Drehmoment die charakteristische Kennlinie und somit die erreichbaren Wirkungsgrade jedes Antriebs bestimmt werden. Zur Nachbildung des später im Betrieb entstehenden Lastmoments werden im Prüfstand leistungsstarke Antriebe benötigt, die insbesondere bei einer Serienproduktion automatisiert an die zu prüfenden Antriebseinheiten gekoppelt werden können. Eine Temperierung des Prüflings auf im Betrieb zu erwartende Temperaturen kann – je nach Anforderung des Endkunden – ebenfalls erforderlich sein. Hierdurch kann die Leistungsfähigkeit des Kühlsystems aktiv geprüft werden.

Während eines Prüfzyklus können, je nach Auslegung des Prüfstands, eine Vielzahl weiterer Parameter messtechnisch erfasst werden. Diese beziehen sich bspw. auf Drehzahl- und Drehmomentschwankungen, Reibungsverluste, Körper- und Luftschall (NVH-Verhalten), Dichtigkeit des Kühlkreislaufs, elektrische Eigenschaften der Statorwicklung sowie Hochvolt- und Isolationsprüfungen. Durch eine automatisierte Datenerfassung und -auswertung kann eine umfangreiche Analyse des produzierten Antriebs ermöglicht werden. Werden diese Messwerte weiteren Daten, die während der Produktion des Antriebs erfasst werden, gegenübergestellt, können Produktionsprozesse identifiziert werden, die einen kritischen Einfluss auf die Qualität der gesamten Antriebseinheit aufweisen.



Quelle: © eigene Darstellung in Anlehnung an KIT/wbk

Qualitäts- und Leistungsmerkmale

- Hohes Leistungsspektrum der im Prüfstand verwendeten Antriebseinheiten
- Flexibilität der Prüfanlage gegenüber veränderlichen Baugrößen von Antrieben
- Breites Temperaturspektrum, mit dem der Antrieb belastet werden kann
- Hohe Anzahl messbarer Größen
- Automatisierte Datenerfassung und -verarbeitung

Einflussgrößen

- Prüfvorgaben des Endkunden
- Reproduzierbarkeit der Belastungszyklen
- Umgebungseinflüsse in unmittelbarer Nähe des Prüfstands (bspw. bei Messung von Körper- und Luftschall)
- Systematische und zufällige Abweichungen entlang der Produktion der Antriebseinheit (Elektromotor, Leistungselektronik und Getriebe)

Alternativen und Entwicklungstrends

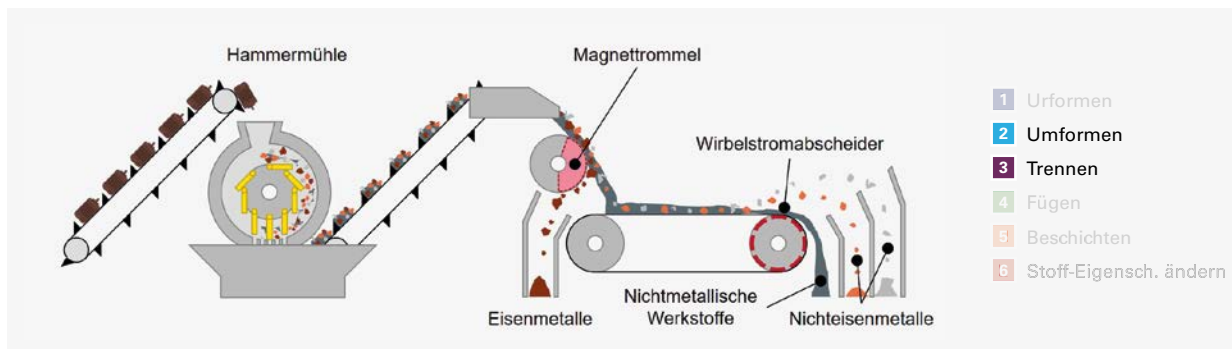
- Korrelationsanalyse zwischen Messdaten aus End-of-Line-Prüfung und entlang der Produktion erfassten Prozessdaten zur Identifikation der Prozessparameter mit dem stärksten Einfluss auf die Qualität der Antriebseinheit
- Transparenz und Traceability der Komponenten entlang der gesamten Wertschöpfungskette



3.5.1 Kupferrückgewinnung



Am Ende des Produktlebenszyklus elektrischer Antriebe werden derzeit vor allem deren Kupfer- und Aluminiumteile zurückgewonnen. Durch manuelles Recycling wird eine besonders hohe Reinheit der Ausgangsstoffe erzielt. Dazu wird zunächst das Motorgehäuse mithilfe einer hydraulischen Presse geknackt und Rotor und Stator werden ausgebaut. Danach wird der Stator hydraulisch gespalten und die Kupferwicklungen werden mithilfe einer hydraulischen Ziehvorrichtung vom Eisen getrennt. Im Falle einer Asynchronmaschine wird beim Rotor ähnlich verfahren. Rotoren mit Permanentmagneten werden idealerweise gesondert behandelt. Für die automatisierte Werkstoffrückgewinnung werden hochproduktive vollverkettete Anlagen eingesetzt. Zu Beginn werden die Motoren in einer Hammermühle zerkleinert und anschließend zur Trennung der Eisen- und Nichteisenmetalle sowie nichtmetallischen Werkstoffe über einen Wirbelstromabscheider geführt. Ein Förderband leitet den Teilestrom zu einem mit hoher Geschwindigkeit rotierenden Rotor, der ein hochfrequentes magnetisches Wechselfeld erzeugt. Die in den metallischen Partikeln induzierte elektrische Spannung und das entgegengerichtete magnetische Feld bewirken eine abstoßende Kraft, wodurch die Partikel aus dem Produktstrom ausgestoßen werden. Aufgrund des Dichteunterschieds von Kupfer und Aluminium können diese entweder direkt oder nach einem weiteren Schredder mithilfe eines Dichtensortierers getrennt werden. Abschließend werden die gewonnenen Materialien zu Granulat zermahlen und häufig zur Weiterverarbeitung mithilfe einer Spänpresse zu Briketts verpresst.



Quelle: © eigene Darstellung in Anlehnung an KIT/wbk

Qualitäts- und Leistungsmerkmale

- Hohe Sortenreinheit
- Saubere Trennung der metallischen Werkstoffe Kupfer, Aluminium und Eisen
- Umweltfreundliche Prozesstechnik

Einflussgrößen

- Sichere Identifikation der Motorbauweise
- Klassierung nach Typ, Leistungsbereich, Abmessungen
- Fertigungsverfahren des Motors

Alternativen und Entwicklungstrends

- Entwicklung standardisierter Kennzeichnungen zur vereinfachten Klassierung
- Entwicklung modularer Motorbauweisen für eine einfache, recyclinggerechte Demontage

Ausgangskomponenten

Statorherstellung

Rotorherstellung

Endmontage

Recycling

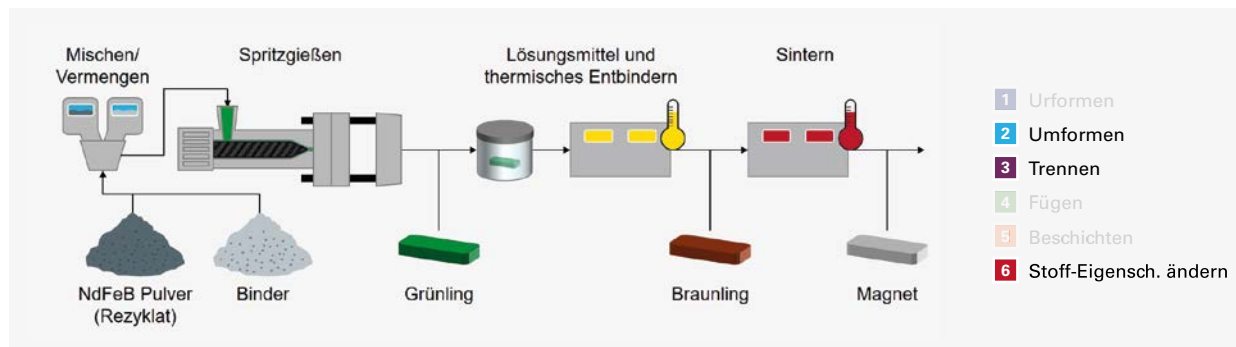
3.5.2 Magnetwerkstoffrückgewinnung

Die wirtschaftsstrategischen Seltenerdmetalle Neodym, Samarium und Dysprosium sind wesentliche Bestandteile für Hochleistungspermanentmagnete, wie sie in modernen Antrieben fast ausschließlich zum Einsatz kommen. Die Rückgewinnung der Magnetwerkstoffe stellt nach heutigem Stand eine enorme Herausforderung dar und war in der Vergangenheit aufgrund des niedrigeren Preisniveaus neuer Magnete kaum wirtschaftlich umzusetzen. Die zudem fehlenden Materialmengen, die fehlende Recyclinglogistik sowie Recyclingtechnologien haben bislang wenig Anreiz zu größeren Investitionen auf diesem Gebiet dargestellt. Der aktuelle Wandel hin zur Elektromobilität führt mittlerweile jedoch zu einer stetigen Erhöhung des Preisniveaus und es ist davon auszugehen, dass die steigende Stückzahl verkaufter Elektrofahrzeuge langfristig die kritischen Materialmengen für das wirtschaftliche Recycling bereitstellen wird. Derzeit lässt sich selbst im manuellen Recyclingprozess ein Rotor mit Permanentmagneten nur schwer wieder in seine Bestandteile zerlegen. Dies hat mehrere Gründe: Zum einen sind Magnetwerkstoffe extrem spröde und anfällig für Korrosion, weshalb entweder eine Phosphatierung oder eine Beschichtung mit Nickel, Aluminium, Zink, Zinn oder Epoxidharzen vorgenommen wird. Zum anderen werden die Magnete im Blechpaket verklebt oder umspritzt. Darüber hinaus lassen sich die Magnete aufgrund ihrer magnetischen Eigenschaften kaum durch mechanische Techniken sauber trennen und müssen daher zunächst entmagnetisiert werden. Viele Prototypenanlagen basieren daher auf einer Kombination pyrometallurgischer und nasschemischer Verfahrensschritte.



Kupferrückgewinnung

Magnetwerkstoffrückgewinnung



Qualitäts- und Leistungsmerkmale

- Hohe Sortenreinheit und geringer Anteil an Fremdbestandteilen
- Energetisch effiziente Prozesstechnik zur Wiederaufbereitung
- Gewinnung eines wiederaufbereiteten Rezyklats zur Herstellung neuer Magnete

Einflussgrößen

- Variantenvielfalt der eingesetzten Magnetwerkstoffe und der Legierungszusammensetzung
- Variantenvielfalt der eingesetzten Beschichtungen und Klebstoffe
- Optimierung des geometrischen Designs der Magnete

Alternativen und Entwicklungstrends

- Entwicklung neuer Recyclingverfahren (z. B. Wasserstoff- und Wärmebehandlungsverfahren)
- Standardisierung der Magnete für eine direkte Wiederverwendung – „Design for Reuse“
- Standardisierung der Magnetbeschichtungen und der eingesetzten Klebstoffe
- Reduktion der Menge eingesetzter Seltenerdmetalle oder Entwicklung alternativer Legierungen
- Verwendung qualitativ schlechter Magnetwerkstoffe
- Einsatz von grundsätzlich magnetfreien Antrieben, beispielsweise Asynchronmaschinen, fremderregten Synchronmaschinen oder synchrone Reluktanzmaschinen

Autor:innen

wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT): Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer, Ludwig Hausmann, Maximilian Halwas, Janna Hofmann, Felix Wirth, Wilken Wößner

Das wbk Institut für Produktionstechnik widmet sich mit seinen drei Bereichen Fertigungs- und Werkstofftechnik, Maschinen, Anlagen und Prozessautomatisierung und Produktionssysteme der anwendungsnahen Forschung, der Lehre und Innovation im Bereich Produktionstechnik am KIT. Im Forschungsschwerpunkt Elektromobilität setzt das wbk über alle Bereiche hinweg auf die Entwicklung der Produktionstechnik für die entscheidenden Komponenten der Elektromobilität: Batteriezelle, Batteriemodul, Brennstoffzelle und Elektromotor.

Hintergrund: Landeslotsenstelle Transformationswissen BW

Im aktuellen Umbruch der Automobilwirtschaft stehen insbesondere mittelständische Unternehmen vor großen Herausforderungen, sei es im Bereich der zukünftigen Entwicklung des Geschäftsmodells, der Mitarbeiterqualifizierung oder der generellen Ausrichtung der Unternehmensstrategie. Die neue Landeslotsenstelle für den Mittelstand setzt hier an und bietet den Vertretern der Automobilwirtschaft, insbesondere Mittelständlern der Zuliefererindustrie und des Kfz-Gewerbes, Orientierung und Unterstützung in folgenden Themengebieten: zielgruppenspezifisch aufbereitetes Wissen zu Technologien, Prozessen und Trends; Übersicht über Weiterbildungs- und Qualifizierungsangebote; strukturierter Überblick zu Beratungsangeboten und Förderprogrammen des Landes; Informationen zu thematisch passenden Veranstaltungen.

Weitere Informationen unter www.transformationswissen-bw.de

Lesetipp Themenpapier: „Wertschöpfungspotentiale von Elektromotoren für den Automobilbereich in Baden-Württemberg“

Der Elektromotor ist eine der zentralen Komponenten im elektrifizierten Antriebsstrang und wird sowohl bei batterieelektrischen-, Brennstoffzellen- als auch bei Hybrid-Fahrzeugen benötigt. Damit nimmt er eine bedeutende Rolle in der Transformation der Automobilwirtschaft ein. Welche Wertschöpfungspotentiale Elektromotoren in der automobilen Anwendung für Baden-Württemberg bieten und wie ein wirtschaftlich funktionierendes Ökosystem zur Produktion von Elektromotoren aufgebaut werden kann, erläutert das Themenpapier. Das Themenpapier ist kostenfrei unter www.transformationswissen-bw.de/wissensspeicher/publikationsdatenbank abrufbar!

Herausgeber



Gefördert von



Layout/Satz/Illustration

markentrieb – Die Kraft für Marketing und Vertrieb

Stand

Juni 2020