

Fleischer, J.; Haag, S.; Hofmann, J.

Quo Vadis Wickeltechnik?

Eine Studie zum aktuellen Stand der Technik und zur
Recherche zukünftiger Trends im Automobilbau

Institut für Produktionstechnik (wbk)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1. Einleitung und Hintergründe	3
2. Elektrische Fahrzeugkonzepte und deren Antriebe	4
2.1. Übersicht alternativer Antriebe	4
2.2. Elektromotoren für Traktionsantriebe	7
2.3. Qualitätskriterien für Wicklungen	10
2.4. Produktrecherche ausgewählter OEM'S	11
3. Produktionstechnologien für Elektromotoren	13
3.1. Überblick der am Markt existierenden Wickelverfahren	13
4. Übersicht der klassischen Wickelverfahren für Traktionsantriebe	20
4.1. Vor- und Nachteile der verschiedenen Wickelverfahren	21
4.2. Key Know-How für Unterschiedliche Wickelverfahren	25
4.3. Anlagenkomponenten für die bestehenden Wickeltechniken	25
5. Neue Ansätze in der Wickeltechnik	27
6. Zusammenfassung und Ausblick	30
Abbildungsverzeichnis	31
Tabellenverzeichnis	32
Literaturverzeichnis	33
Impressum	40

1. Einleitung und Hintergründe

Die Elektromobilität hat nicht zuletzt durch die hohen Klimaziele der Bundesregierung und die jüngsten Abgasskandale deutscher OEMs sowie den damit verbundenen strategischen Neuausrichtungen hin zu vollelektrischen Fahrzeugen in hohen Stückzahlen eine intensive und dynamische Entwicklung angenommen. Dabei wird sich mit steigender Zahl der zu produzierenden Elektrofahrzeuge sowohl der Zulieferermarkt als auch der Herstellermarkt in den nächsten zehn Jahren stark wandeln.

Die Kernkomponente des konventionellen Antriebsstranges – der Verbrennungsmotor – wird dabei durch einen oder mehrere Elektromotoren ersetzt bzw. ergänzt. Elektromotoren werden seit über 100 Jahren für die unterschiedlichsten Anwendungsfelder in Industrie und Konsumprodukten gefertigt. Allerdings stehen die Hersteller der Komponenten eines E-Motors als Traktionsantrieb für PKWs völlig neuen Herausforderungen gegenüber, wie beispielsweise den hohen Anforderungen an die Qualität der Wicklung und der Isolation sowie kurze Taktzeiten, wie sie für konventionelle Antriebsaggregate heutzutage üblich sind.

Im Rahmen dieser Studie soll zuerst ein qualitativer Überblick und Vergleich der PKW-Antriebs Antriebskonzepte und den dort eingesetzten Motoren gegeben werden. Daraus abgeleitet werden die unterschiedlichen Rotor- und Stator designs im Zusammenhang mit verschiedenen Antriebskonzepten vorgestellt. Hierbei soll beispielhaft aufgezeigt werden, welche Fahrzeugkonzepte und damit einhergehend welche Vielfalt an Elektromotoren in den aktuellen elektrischen Antriebssträngen vorherrscht.

Im zweiten Teil der Studie soll darauf aufbauend die Produktion der Wicklung - als Kernkomponente des felderzeugenden Stators – näher betrachtet werden. So werden die Kernkompetenzen zur Herstellung von Wicklungen sowie die produktspezifischen Anforderungen an die Wicklungen aufgezeigt, um die Herausforderungen und Ansätze zur Fertigung dieser abzuleiten.

2. Elektrische Fahrzeugkonzepte und deren Antriebe

Grundsätzlich werden nach (Bauer et al. 2015) unter elektromobilen Antriebskonzepten von Fahrrädern über Roller bis zu klassischen Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen alle elektrifizierten Antriebe verstanden.

2.1. Übersicht alternativer Antriebe

Im Rahmen dieser Studie liegt der Fokus auf dem elektrischen Antrieb eines PKW, wobei dieser je nach Aufbau des Elektrofahrzeuges (Hybrid oder rein elektrisch) anderen Herausforderungen gegenübersteht. Der Aufbau der unterschiedlichen Fahrzeugkonzepte kann in Abbildung 1 nachvollzogen werden.

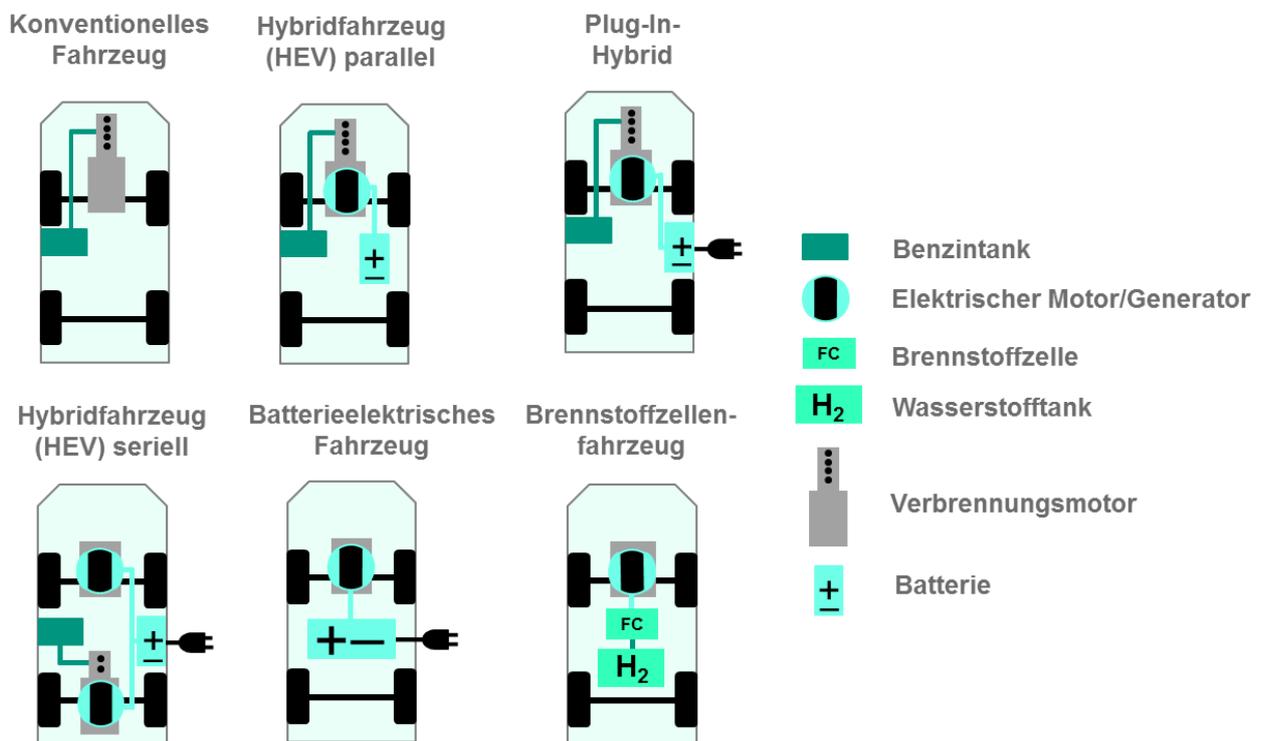


Abbildung 1 Übersicht über bestehende elektrische Fahrzeugkonzepte (eigene Abbildung nach (Bauer et al. 2015))

Im Weiteren werden die folgenden Fahrzeugkonzepte und die Anforderungen an ihren Elektromotor aufgezeigt:

- Hybridfahrzeuge (Hybrid Electric Vehicle - HEV)
 - Mild-HEV
 - Full-HEV
 - Plug-In-HEV

- Batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicles - BEV)

Die Einordnung dieser Fahrzeugkonzepte erfolgt dabei nach (Kampker 2014) anhand der Leistung des Antriebes in kW bzw. der Leistung pro kg Fahrzeugmasse in W/kg sowie der Bordnetzspannung in V. Die Übergänge zwischen den unterschiedlichen hybriden Fahrzeugkonzepten sind dabei fließend (s. Abbildung 2).

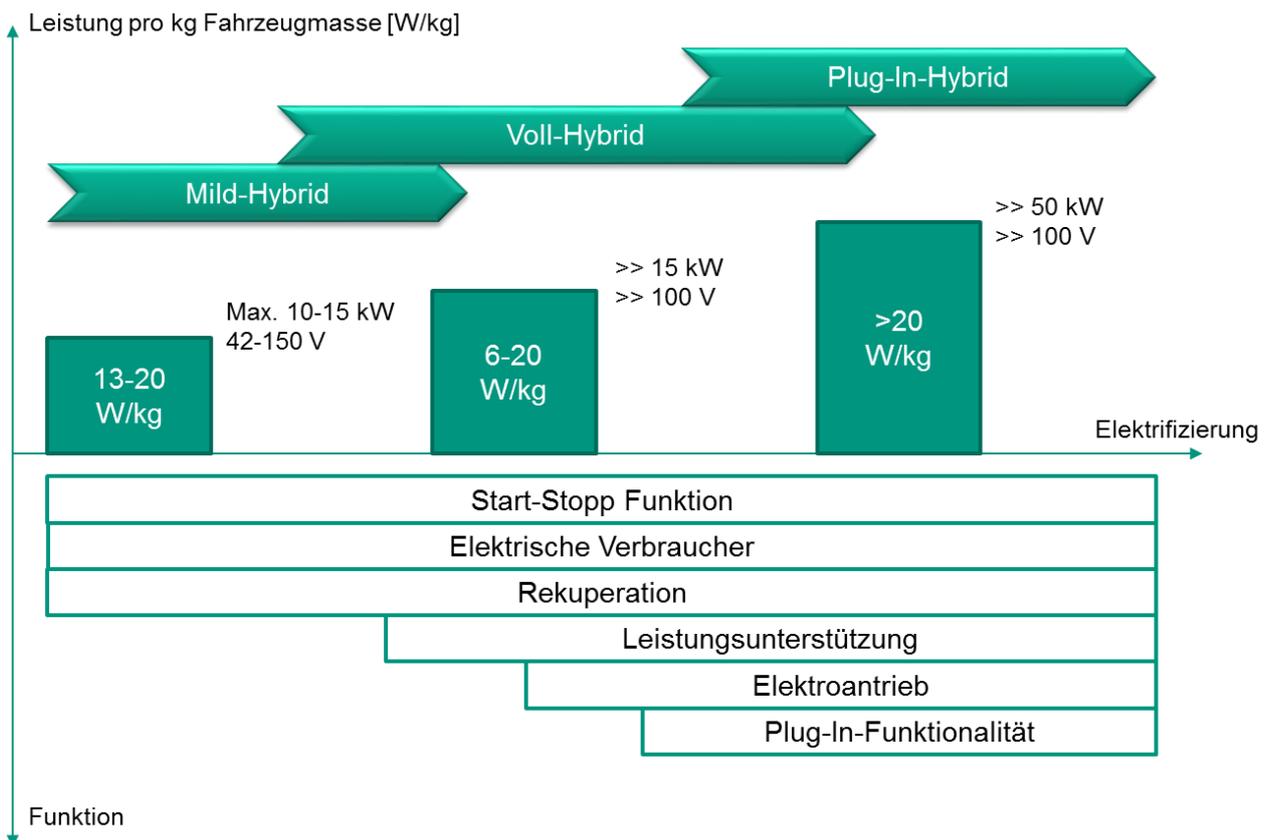


Abbildung 2: Vergleich unterschiedlicher Hybridkonzepte (eigene Abbildung nach (Kampker 2014, S.119))

2.1.1. Mild-Hybrid Electric Vehicle

Nach dem sog. Micro-Hybrid, in welchem nach (Bauer et al. 2015) zwar eine Start/Stop Technologie sowie eine Bremskraftrückgewinnung verbaut ist, der Verbrennungsmotor aber nicht elektrisch unterstützt wird, ist der Mild-Hybrid die erste Hybridisierungskategorie. Dabei ist es nach (Lienkamp 2016) nicht möglich, mit einem Mild-Hybrid rein elektrisch zu fahren. Die Elektromaschine gewinnt lediglich kinetische Energie beim Bremsen zurück (Rekuperation) und unterstützt den Verbrennungsmotor beim Beschleunigen (Boostvorgang). So wird beim Mild-Hybrid nach (Lienkamp 2012) eine Elektromaschine von etwa 10 kW (entspricht ca. 14 PS) installiert. Ein Fahrzeugbeispiel für einen Mild-Hybrid ist

die Mercedes S-Klasse. Allerdings wird nach (Lienkamp 2012) der Mild-Hybrid bei mittelgroßen Fahrzeugklassen eingesetzt um rentabel zu sein, da bei Kleinfahrzeugen sowohl die Kosten als auch das Mehrgewicht anteilig zu hoch wären.

2.1.2. Full-Hybrid Electric Vehicle

Die Hybridisierung eines Fahrzeuges ermöglicht nach (Lienkamp 2014) eine Reduzierung der Emissionen im Vergleich zum klassischen Verbrennungsmotor auf bis zu 50 g CO₂/km. Dabei unterstützt ein Elektromotor nach (e-mobil BW GmbH 2015) den des klassischen Fahrtriebs. Dabei ist nach (e-mobil BW GmbH 2015) ein rein elektrischer Antrieb über geringe Reichweiten teilweise möglich. Allerdings rentiert sich der Hybrid nach (Lienkamp 2014) nur bei Fahrzyklen mit hohen Beschleunigungsanteilen, da bei höheren Geschwindigkeiten oder Autobahnfahrten aufgrund des höheren Gewichtes und des teilweise nur für den Stadtverkehr optimierten Antriebsstrangs teilweise sogar höhere Energieverbräuche auftreten. Bei Vollhybridfahrzeugen, wie dem Vorreiter Toyota Prius, wird nach (Lienkamp 2012) eine deutlich höhere elektrische Leistung in der Größenordnung von 50 kW (entspricht ca. 68 PS) installiert.

2.1.3. Plug-In Hybrid Electric Vehicle

Plug-In-Hybridfahrzeugen erreichen nach (Lienkamp 2014) eine elektrische Reichweite von 25-50 km. Die derzeit am Markt verfügbaren Plug-In Hybride haben im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen nach (Lienkamp 2014) einen sehr hohen Verkaufspreis, da zwei Antriebsstränge in dem Fahrzeug verbaut sind. Das Zusatzgewicht sorgt für schlechtere Fahrdynamik im Vergleich zu den konventionellen bzw. vollelektrischen Fahrzeugen. Im Gegensatz zum Full-Hybrid ist nach (Bauer et al. 2015) die Batterie des Plug-In Hybrids über das Stromnetz aufladbar. Aktuell verkaufte und geplante Plug-In Hybrid-Modelle sind nach (Bauer et al. 2015) beispielsweise der Toyota Prius Plug-In, der Porsche Panamera S E-Hybrid, der Mercedes-Benz S 500 PLUG-IN HYBRID und der BMW i8. Als serielle Plug-In Hybride mit Range Extender sind derzeit nach (Bauer et al. 2015) der Chevrolet Volt, der Opel Ampera, der Cadillac ELR und BMW i3 als Modell in Planung oder werden bereits verkauft.

2.1.4. Battery Electric Vehicle

Ein Battery Electric Vehicle zeichnet sich nach (e-mobil BW GmbH 2015) durch einen starken Elektromotor mit am Stromnetz aufladbarer Batterie aus. Diese rein elektrischen Fahrzeuge besitzen im Gegensatz zu den hybriden Fahrzeugen keinen Verbrennungsmotor und somit

auch keinen Treibstofftank und keine Abgasanlage. Für die Batterieladung werden nach (e-mobil BW GmbH 2015) lediglich das Stromnetz und Rekuperation genutzt. Die rein elektrischen Fahrzeuge bieten nach (Lienkamp 2014) ein beeindruckendes Fahrgefühl, eine gleichmäßige, aus dem Stand heraus, hohe Beschleunigung sowie den Entfall von Schaltrucken. Zusätzlich bringt der elektrische Antrieb des Fahrzeuges geräuscharmes Fahren, quasi Lautlosigkeit im Stillstand und emissionsfreies Fahren mit sich. Nachteilig ist nach (Lienkamp 2014) neben den hohen Anschaffungspreisen, die derzeit beschränkte Reichweite und damit die Angst der Konsumenten, liegen zu bleiben. Die nach (e-mobil BW GmbH 2015) aktuell verkauften und geplanten Modelle sind beispielsweise der Mitsubishi i-MiEV, der Nissan Leaf, der Smart ForTwo Electric Drive, der Tesla Model S oder die Mercedes-Benz B-Klasse Electric Drive, der Mercedes EQ, der VW ID, der BMW iNext, der Tesla Model 3, der VW e-UP und schließlich der Opel e-Ampera.

2.2. Elektromotoren für Traktionsantriebe

Der Elektromotor als Antriebskomponente im elektrischen Antriebsstrang gilt als besondere Herausforderung für die Produktionstechnik. So ist nach (acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften 2009) „als Herausforderung in diesem Zusammenhang insbesondere die Produktion hoher Stückzahlen in geforderte hoher Qualität zu nennen, wobei das Gewicht und der Bauraum des Elektromotors letztendlich die entscheidenden Kriterien darstellen.“ Derzeit werden für elektrische Fahrzeuge hauptsächlich Asynchronmotoren (ASM), permanent erregte Synchronmotoren (PSM) und fremderregte Synchronmotoren eingesetzt (Bauer et al. 2015). Die Technologie hinter diesen Motoren ist aus den industriell genutzten Motoren bekannt, muss aber nun an die Herausforderungen der Kundenanforderungen (wie z.B. Fahrkomfort, Beschleunigungsverhalten, kein Verschleiß, Anforderungen an die Effizienz der Batterie), die begrenzten Platzbedarfe innerhalb eines Fahrzeugantriebsstranges und die Anforderungen im Umfeld der Automobilbranche (wie z.B. Kostendruck, Resistenz gegen wechselnde Umgebung, Just-In-Time Lieferung, kein Ausschuss, keine Fehler nach Auslieferung) angepasst werden. Daher werden die Merkmale und Eigenschaften dieser Motoren sowie die Fahrzeuge, in denen diese eingesetzt werden im Folgenden genauer beschrieben. Außerdem werden weitere vielversprechende Antriebskonzepte für den Traktionsbereich vorgestellt.

2.2.1. Asynchronmaschine (ASM)

Nach (Hofmann 2010) zeichnet sich die Asynchronmaschine vor allem durch ihre geringen Kosten und durch ihre Robustheit aus. Nach (Kampker 2014) bestehen sowohl Rotor als auch Stator aus geschichteten, gegeneinander isolierten Eisenblechen um der Entstehung

von Wirbelströmen entgegenzuwirken. Für den Rotor gibt es allerdings zwei unterschiedliche Ausführungsformen, bei welchen der Läufer nach (Kampker 2014) entweder mit Aluminium- oder Kupferstäben (Käfigläufer) oder mit einer Wicklung (Schleifringläufer) in den Läuferfalten ausgestattet ist. Die geringen Kosten der ASM rühren vor allem daher, dass diese Art der Maschinenausführung komplett auf teure Magnetmaterialien verzichten kann. Durch den Entfall der Magnete ist die Maschine nach (Lienkamp 2014) zwar sehr kostengünstig, aber dafür bei gleicher Nenndauerleistung schwerer als die PSM. Ein großer Nachteil der ASM ist der Verschleiß des Rotors durch die Schleifringkontakte, was dazu führt, dass ein Austausch dieser Komponente nach einer bestimmten Anzahl gefahrener Kilometer durchgeführt werden muss. Tesla setzt eine ASM in seinem elektrischen Antriebsstrang ein (Lienkamp 2016).

2.2.2. Permanentmagneterregte Synchronmaschine (PSM)

Die häufigste Bauform der Synchronmaschine ist die permanentenerregte Synchronmaschine (PSM). In modernen Elektrofahrzeugen (sowohl Hybrid als auch vollelektrisch) wird nach (Hofmann 2010) sehr häufig dieser Maschinentyp eingesetzt. Hier werden Permanentmagnete, die meist aus einem Neodym-Eisen-Bor Werkstoff (NdFeB) gefertigt sind, für den Aufbau des Erregerfeldes eingesetzt. Die Magnete werden in der Regel in ausgestanzten Taschen (sog. vergrabene Magnete) des Rotorblechpakets eingeschoben. Vorteile der permanentenerregten Synchronmaschine sind nach (Lienkamp 2014) ihr sehr hoher Wirkungsgrad von bis zu 94 %, der einfache und wartungsarme Aufbau ohne Schleifkontakte oder Bürsten sowie ihre sehr hohe Leistungsdichte von 1,5 W/kg. Nachteilig sind der abnehmende Wirkungsgrad bei hohen Drehzahlen und im Teillastbereich sowie die Abhängigkeit von Seltenen Erden wie Neodym. Die PSM wird nach (Lienkamp 2014) und (Lienkamp 2016) von BMW und VW eingesetzt.

2.2.3. Fremderregte Synchronmaschine (FSM)

Der Aufbau des Stators der fremderregte Synchronmaschine (FSM) ist gleich dem der PSM bzw. der ASM. Die Magnetisierung der FSM erfolgt nach (Hofmann 2010) über gleichstromerregte Polräder, wobei der Rotor mit Wicklungen versehene Schenkelpole aufweist. Die FSM verwendet keine Magnete und ist damit nach (Lienkamp 2014) bei Spannungsabfall lastfrei. Allerdings muss ähnlich der ASM ein Schleifringüberträger eingesetzt werden um das Feld im Rotor aufzubauen, welcher nach ca. 100.000 km ausgetauscht werden muss. Damit stellt die FSM nach (Lienkamp 2016) einen Kompromiss zwischen der ASM und der PSM dar. Die FSM wird nach (Lienkamp 2014) von Renault eingesetzt.

2.2.4. Weitere Motorenarten

Weitere Motorkonzepte, die sich derzeit allerdings noch im Entwicklungsstadium befinden und noch nicht serienreif für den Einsatz im elektrischen Antriebsstrang von Personenfahrzeugen sind, stellen nach (Spath et al. 2010) der Reluktanzmotor (RM) sowie die Transversalflussmaschine (TFM) dar. Allerdings werden diese Motoren nach dem aktuellen Stand der Technik noch nicht in Serienfahrzeugen eingesetzt bzw. deren Einsatz ist derzeit noch nicht absehbar.

Ein anderes Beispiel ist der Gleichstrommotor (GSM), welcher nach (Spath und Bauer 2012) zwar schon sehr weit entwickelt ist und nach (Spath et al. 2010) bereits im Honda Insight eingesetzt wurde, allerdings einen sehr hohen Kühlaufwand, einen schlechten Wirkungsgrad und einen sehr hohen Geräuschpegel bei einem hohen Fertigungsaufwand mit sich bringt.

Ein Vergleich aller Motorenarten kann Tabelle 1 entnommen werden. Da Reluktanzmotor, Transversalflussmaschine und Gleichstrommotor aufgrund der genannten Eigenschaften nicht mehr oder noch nicht in Fahrzeugen eingesetzt werden, werden sie im Rahmen dieser Studie nicht weiter betrachtet.

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Arten elektrischer Maschinen - eigene Darstellung nach (Spath und Bauer 2012; Spath et al. 2010; Kampker 2014); Legende: ○ sehr schlecht, ● sehr gut

	ASM	PSM	FSM	RM	TFM	GSM
Leistungsdichte	●	●	◐	●	●	●
Max. Drehzahl	●	●	◐	●	○	○
Wirkungsgrad	●	●	◐	◐	●	○
Kosten	●	◐	◐	●	◐	◐
Entwicklungsstand	◐	◐	○	◐	◐	●
Zuverlässigkeit	●	◐	◐	●	◐	◐
Regel-/Steuerbarkeit	◐	◐	◐	●	●	●
Geräuschpegel	◐	◐	◐	◐	◐	◐
Fertigungsaufwand	●	◐	◐	●	◐	◐
Volumen	◐	●	●	◐	◐	◐
Gewicht	◐	●	◐	◐	◐	◐

Da in den nächsten Jahren und damit in den ersten Generationen der BEV die Batteriezellen als Energielieferant ein Zukaufteil aus dem asiatischen Markt sein wird, streben die westlichen OEM derzeit eine In-House-Fertigung des Elektromotors an und stehen damit insbesondere vor den produktionstechnischen Herausforderungen. Zum Erhalt von Wertschöpfung und der Möglichkeit der Differenzierung gegenüber Mitbewerbern und den Arbeitsplätzen am Standort Deutschland (acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften 2009) scheint es für die OEM geboten, das benötigte Know-How sowie die Kernkompetenzen der Fertigung zu erkennen und zu beherrschen. Daher streben insbesondere alle Zulieferer, die derzeit in der klassischen Antriebstechnik beheimatet sind, und deren Kerngeschäft durch den Rücklauf von Dieselmotoren gefährdet ist (bspw. Bosch, Continental, ZF) in diese Richtung. Daher sollen diese Herausforderungen im Rahmen dieser Studie aufgezeigt werden. Dafür werden zuerst anhand einer „Stand der Technik“ Recherche die Antriebskonzepte von ausgewählten OEM aufgezeigt.

2.3. Qualitätskriterien für Wicklungen

Um die Wicklung eines Motors bewerten zu können, müssen vergleichbare Kriterien gefunden werden, anhand derer die verschiedenen Wickelverfahren miteinander verglichen werden können. So wurden durch die Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) Anforderungen an das elektrische Antriebssystem definiert (Nationale Plattform Elektromobilität 2010, S. 4), welche sich direkt auf die Wicklung eines Elektromotors übertragen lassen.

So fordert die NPE, dass die Kosten für das Gesamtsystem des elektrischen Antriebsstranges um 2 / 3 gesenkt werden müssen. Auf produktionstechnischer Ebene bedeutet dies den Aufbau von hochflexiblen und hochautomatisierten Serienanlagen für die Fertigung von Elektromotoren. Eine weitere Forderung ist die Verdoppelung der Leistungsdichte und des Leistungsgewichts eines Fahrzeuges. Die Wicklung eines Motors kann zu diesen Forderungen beitragen, in dem die Wickelköpfe möglichst gering gehalten werden und dadurch der Kupfereinsatz minimiert wird. Für die Steigerung des Wirkungsgrades muss der Kupferfüllfaktor des Motors maximiert werden. In einer letzten Forderung erwartet die NPE die Verbesserung von Zuverlässigkeit und Qualität des Elektromotors, was wiederum durch die Vermeidung von Fertigungsfehlern produktionstechnisch erfüllt werden kann. Daraus resultiert in erster Linie das Vermeiden von Ausschussprodukten durch das Vermeiden von Fehlern bei der Fertigung von Motoren (beispielsweise beim Verschalten) und insbesondere das Vermeiden von zu großen Drahtbelastungen während des Prozesses. Die Drähte an sich werden zwar nach (Beckmöller 2013; Jovanoski 2015) immer leistungsstärker müssen allerdings in der

Produktion von Wicklungen erheblichen Stressfaktoren standhalten und sind damit auch ein Produkt, welches ständigem Wandel unterliegt.

2.4. Produktrecherche ausgewählter OEM'S

2.4.1. BMW

BMW hat mit der i-Serie als erster deutscher OEM elektrifizierte Fahrzeuge auf den Markt gebracht, welche serienmäßig produziert und verkauft werden. Die Reichweite des i3 wurde nach (Lienkamp 2016) durch eine neue Zellgeneration auf 300 km im NEFZ gesteigert. Der i8 ist zwar nach (Lienkamp 2016) ein technologisch hervorragender PHEV, allerdings aufgrund der Marktzuordnung als Sportwagen und den derzeit geforderten Verkaufspreis nur für kleine Stückzahlen geeignet. Im BMW Mediaportal (BMW 2014) ist erkennbar, dass BMW Motoren mit verteilten Wicklungen mit dem Einziehverfahren produziert, wobei die Produktion aufgrund der geringen Stückzahlen einen Manufakturcharakter hat.

2.4.2. VW

VW und seine Tochterunternehmen stehen unter anderem durch den aktuellen Dieselskandal vor der Herausforderung der Neuausrichtung der Konzernstrategie, wobei die Elektromobilität eine der Kernkomponenten darstellen soll. Dabei wird das Unternehmen nach (Lienkamp 2016) aus Kostengründen Mild-HEV auf 48 V Basis für Benzin- und Dieselmotoren anbieten. Als rein elektrische Fahrzeuge hat VW mit dem dem e-up! und dem e-Golf für zwei Plattformen einen „Modularen Elektrobaukasten (MEB)“ für BEV entwickelt (Lienkamp 2014). Mit der aktuellen Batterietechnologie erreicht VW mit diesen Fahrzeugen im Realbetrieb nach (Lienkamp 2014) bis zu 100km Reichweite. Im VW Mediaportal (VW Group 2015) wird erkennbar, dass VW im eUp einen Motor mit verteilten Wicklungen im Einziehverfahren herstellt, wobei auch hier die Produktion aufgrund der geringen Stückzahlen einen Manufakturcharakter hat.

2.4.3. Tesla

Tesla im Bereich der BEV nach (Lienkamp 2014) der Marktführer. So ist nach (Lienkamp 2016) das Model S das einzige Fahrzeug, das Reichweiten in der Größenordnung von bis zu 500 km im Kundenbetrieb anbieten und somit in den meisten Fällen das Reichweitenangebot der Hybridfahrzeuge abdecken kann. Tesla verwendet nur konventionelle Komponenten für Karosserie (Aluminiumstrukturen im Vergleich zu CFK-Strukturen) und Antriebsstrang (Asynchronmaschine). Dabei wird auch im Tesla Media Portal (Tesla 2015) deutlich, dass

der Motor des Modell S klassisch mit dem Einziehverfahren hergestellt wird. Im Jahr 2017 wird Tesla mit dem Model 3 ein neuartiges elektrisches Fahrzeug auf den Markt bringen.

2.4.4. Daimler

Daimler sicherte sich bereits 2009 Unternehmensanteile an Tesla Motors und hatte damit frühzeitig Zugriff auf das Antriebs- und Batterie-Know-How des Elektromobil-Unternehmens. Selbst nach dem Verkauf der Anteile 2014 soll die Zusammenarbeit weiter bestehen. So besteht das Antriebskonzept des BEV B-Klasse aus Tesla-Komponenten (Lienkamp 2016). Für das Jahr 2017 hat Daimler den e-smart angekündigt.

2.4.5. Toyota

Toyota hat nach (Lienkamp 2016) seine große Stärke mit dem Prius Hybrid bei den HEV und definitiv den größten Vorsprung im Bereich der Großserienproduktion von Hybridfahrzeugen. Ein rein elektrisches Fahrzeug ist derzeit von Toyota noch nicht im Verkauf. Im Media Portal von Toyota (Toyota USA 2016) ist erkennbar, dass im neuen Toyota Prius Prime erstmalig Steckspulen (sog. Hairpins) als Statorspulen verwendet werden. Dies ist eine Neuerung im Vergleich der letzten Generation Motoren mit eingezogenen Wicklungen und den im aktuellen Modell des Toyota Prius mit konzentrierten Einzelzahnwicklungen ausgestatteten Motor.

3. Produktionstechnologien für Elektromotoren

Die Produktionsprozesskette für Elektromotoren ist seit langem durch die Erfahrung bei der Herstellung von E-Motoren für Industrieanwendungen bekannt und wird sich voraussichtlich nicht wesentlich ändern. Allerdings wird es nach (Roland Berger Strategy Consultants 2011) „Änderungen und Weiterentwicklungen der verwendeten Produktionstechnologien innerhalb der einzelnen Produktionsschritte“ geben müssen um die geforderten Produktionskosten zu erreichen.

Die klassische Prozesskette zur Fertigung von Rotor und Stator ist in Abbildung 3 dargestellt.

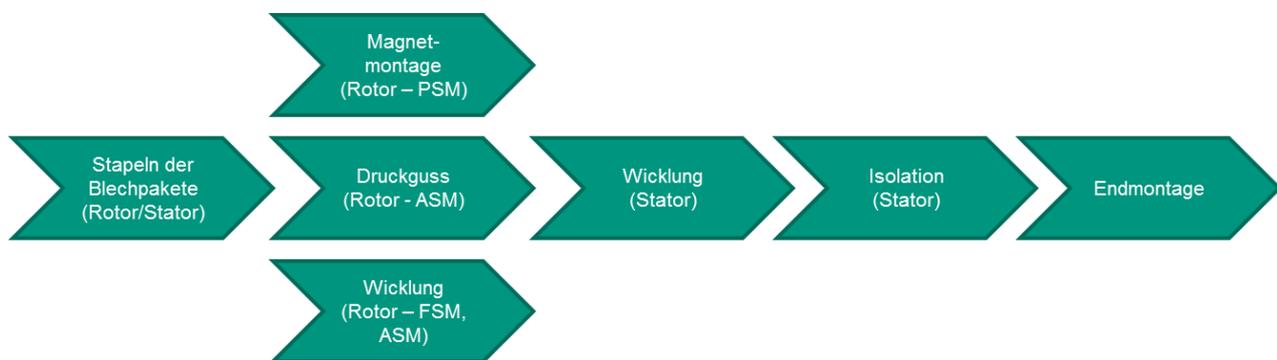


Abbildung 3: Vereinfachte Fertigungsprozesskette von Elektromotoren (ASM, PSM) (eigene Abbildung nach (Roland Berger Strategy Consultants 2011))

Der nach (Roland Berger Strategy Consultants 2011) wichtigste Prozessschritt ist dabei das Herstellen der Statorwicklung, weshalb dieser im Rahmen dieser Studie in den nachfolgenden Kapiteln näher betrachtet wird.

3.1. Überblick der am Markt existierenden Wickelverfahren

Zunächst soll ein allgemeiner Überblick über die am Markt existierenden Wickelverfahren gegeben werden. Dabei werden neben den klassischen Wickelverfahren mit Kupferlackdraht auch die umformtechnisch hergestellten Formspulen bzw. kontinuierliche Hairpinwicklung betrachtet. Auf das manuelle Träufelwickeln wird hier nicht weiter eingegangen, da es sich hierbei nicht um ein automatisiertes Verfahren handelt, welches für die hohen Stückzahl, die in der Automobilbranche gefordert sind geeignet wäre und welches derzeit nur Anwendung in der Einzelfertigung von Hochleistungsmotoren (wie bspw. Formel-E) findet.

3.1.1. Linearwickelverfahren

Nach (Hagedorn et al. 2016) stellt die Linearwickeltechnik einen großen Anwendungsbereich in der Fertigung elektrotechnischer Wickelgüter mit komplexen Wicklungsaufgaben dar. Dabei leitet sich der Name Linearwickeltechnik aus der Art der Drahtverlegung ab. Dabei erfolgt nach (Feldmann et al. 2013) die Verfahrensbewegung des Drahtführers synchron zur Rotationsbewegung der Wickelspindel mit einer konstanten Geschwindigkeit (vgl. Abbildung 4). Das Linearwickelverfahren wird hauptsächlich in der Elektrotechnik für das Bewickeln rotationssymmetrischer Bauteile verwendet.

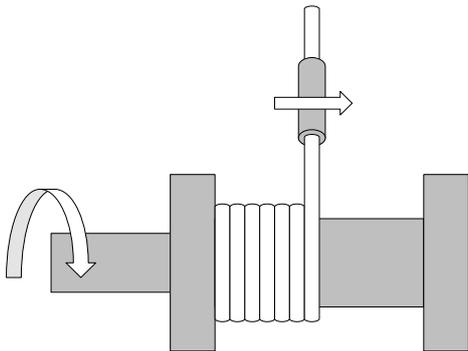


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Linearwickelverfahrens (Eigene Abbildung nach (Feldmann et al. 2013))

Im Bereich der Traktionsantriebe wird das Linearwickeln für die Fertigung von konzentrierten Einzelzahnspulen verwendet. Dabei können auf einem Mehrspindelautomaten nach (Hagedorn et al. 2016) mit höchster Produktivität Spulen in Serienfertigung hergestellt werden. Allerdings bringt das rechteckige Spulenkörperdesign auch fertigungstechnische Nachteile mit sich, weshalb die Wickelgeschwindigkeiten nicht mit den Prozesszeiten für runde Spulen verglichen werden können.

3.1.2. Flyerwickelverfahren

Nach (Hagedorn et al. 2016) ergibt sich die Namensgebung der Flyerwickeltechnik aus ihrem Bewegungsablauf, bei dem die Wickelmaschine eine schnelle rotierende Bewegung für die Bewicklung eines Bauteils übernimmt. Der Spulenkörper ist fixiert aufgenommen und der Draht führt die Rotationsbewegung durch einen Flyerarm um diesen herum aus (vgl. Abbildung 5). Dieses Hauptmerkmal unterscheidet dieses Verfahren wesentlich von der Linearwickeltechnik. Eingesetzt wird das Flyerwickelverfahren nach (Feldmann et al. 2013) bei der Bewicklung von Wickelkörpern, wie Motorläufern, bzw. bei Spulenkörpern mit hohem Gewicht, beispielsweise Transformatoren.

Das Flyerwickelverfahren ist nach (Hagedorn 2015) ein bewährtes Verfahren für konzentrierte und verteilte Wicklungen bei außen genuteten Statorn und Rotoren sowie bei Einzelzähnen. Dabei ist sowohl eine Direktbewicklung, für die Herstellung von konzentrierten Wicklungen, als auch ein Wickeln über Leitbacken möglich. Es zeichnet sich, im Falle der Direktbewicklung durch kleine Wickelköpfe aus und es ist eine automatische Verschaltung des Stators mit einem Düsenflyer möglich. Die ideale Anwendung ist laut (Hagedorn 2015) bei kleinen Drahtdurchmessern. Dabei ist das Flyerwickelverfahren ein kostengünstiges Verfahren für hohe Windungszahlen, bei dem auch eine Multispindelanordnung umgesetzt werden kann und durch orthozyklisches Wickeln auch hohe Füllfaktoren ermöglicht werden. Außerdem wird das Flyerwickelverfahren zumeist als automatisierte Lösung für die Fertigung von Luftspulen auf sog. Schablonenflyern für das spätere Einziehverfahren angewendet.

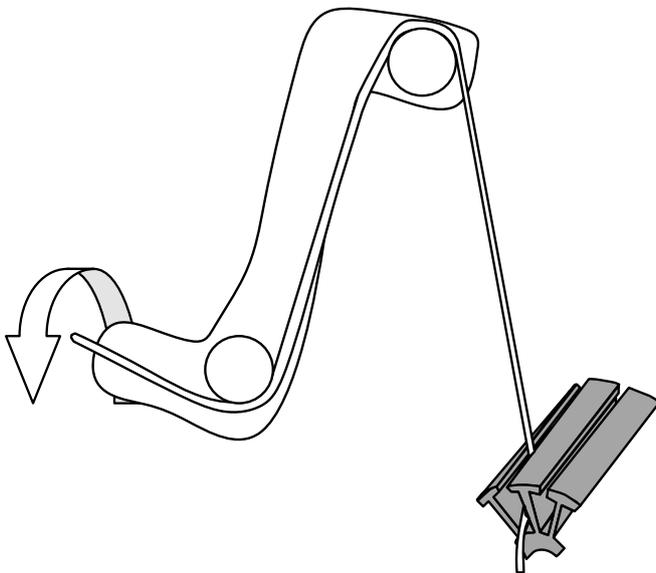


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Flyerwickelverfahrens (Eigene Abbildung nach (Feldmann et al. 2013))

3.1.3. Nadelwickelverfahren

Der Begriff Nadelwickeltechnik leitet sich im Gegensatz zum Linear- und Flyerwickeln nach (Hagedorn et al. 2016) aus dem Geometrieaufbau des Drahtführers bzw. dem der Düse. Der Drahtführer, der wie eine Nadel wirkt, fährt den kompletten Verlegeweg direkt am Spulenkörper ab und weist damit den hauptsächlichen Unterschied zu den vorangegangenen Wickelverfahren auf. Die dabei ausgeführten Bewegungen sind ein Heben bzw. Senken des Nadelträgers und der Nadel sowie ein Schwenken des Stators, woher sich auch nach

(Tzscheutschler et al. 1990) der etwas veraltete Name des Hub-Schwenk-Verfahrens ableitet.

Das Nadelwickelverfahren ist nach (Hagedorn 2015) ein bewährtes Verfahren für konzentrierte Wicklungen mit kleinen Wickelköpfen. Dabei findet eine Komplettbearbeitung des Stators statt, bei der auch ein automatisches Verschalten des Stators stattfindet. Außerdem zeichnet sich das Nadelwickelverfahren laut (Hagedorn 2015) durch seine geringe Werkzeugkosten und den geringen Rüstaufwand auf, welcher aufgrund der Eignung für einen Mehrspindelaufbau für auch für große Stückzahlen geeignet ist. Für innengenutete Statoren von kleineren Motoren ermöglicht die Nadelwickeltechnik die besten Füllfaktoren ohne eine Segmentierung des Blechpaketes vornehmen zu müssen. Durch neuartige Nadelwickelmaschinen mit mehr als zwei Achsen ist es inzwischen möglich mit dem Nadelwickelverfahren auch verteilte Wicklungen herzustellen (Stenzel et al. 2014a; Sell-Le Blanc und Hagedorn 2016).

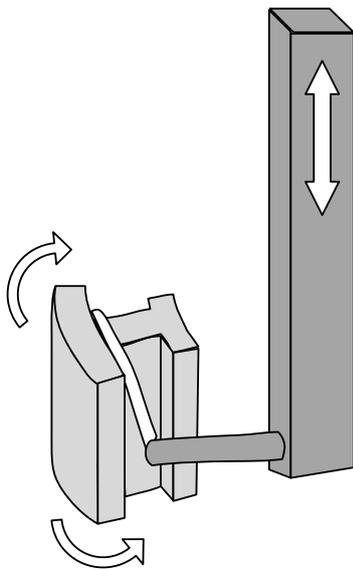


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Nadelwickelverfahrens (Eigene Abbildung nach (Feldmann et al. 2013))

3.1.4. Einziehverfahren

Nach (Hagedorn et al. 2016) muss für das Einziehverfahren die zu montierende Wicklung zunächst in Form einer Luftspule über eine vorgelagerte Flyerwickelstation direkt auf das Einziehwerkzeug oder über eine Linearwickelmaschine auf eine Schablone gefertigt werden (vgl. Abbildung 7 links).

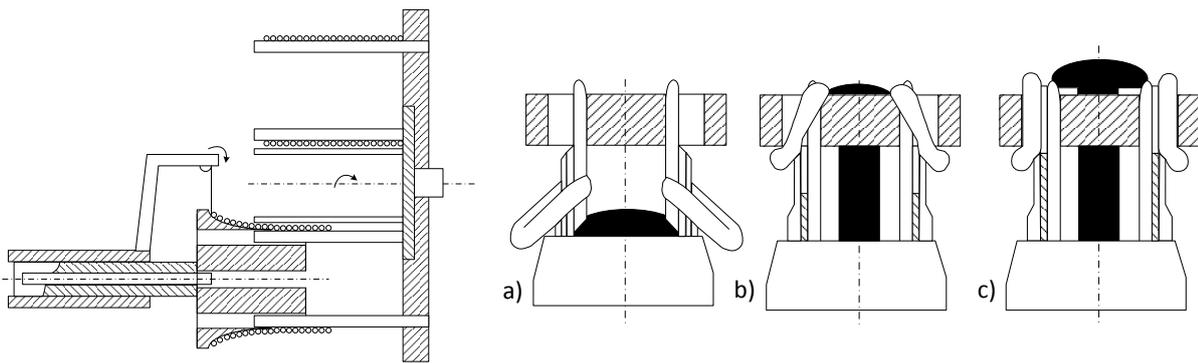


Abbildung 7: Schematische Darstellung des vorgelagerten Flyer- (links) bzw. Einziehverfahrens (rechts) (Eigene Abbildung nach (Tzscheutschler et al. 1990))

Der Einziehprozess selber erfolgt nach (Tzscheutschler et al. 1990) in drei Phasen (vgl. Abbildung 7 rechts). In der ersten Phase (vgl. Abbildung 7 rechts, a)) dringt das Werkzeug in den Stator ein. In der zweiten Phase (vgl. Abbildung 7 rechts, b)) erfolgt das Ausfahren des Einziehpilzes. Damit beginnt die Einbringung der Spule in die Nut. Nach erfolgtem Eintritt der Drähte in die Nut wird nach (Hagedorn et al. 2016) ein Deckschieber nachgeschoben, der ein Herausdrängen der Drähte aus der Nut nach Herausfahren des Einziehwerkzeuges verhindern soll. In Phase drei (vgl. Abbildung 7 rechts, c)) ist schließlich die Spule fertig eingezogen.

Das Einziehverfahren ist nach (Hagedorn et al. 2016) das am häufigsten genutzte Verfahren zur Herstellung von verteilten Wicklungen in geschlossenen Statoren. Grund dafür sind die kurzen Taktzeiten und die Anwendungsbreite in Bezug auf Stator und Wicklungsgeometrie. Bedingt durch die sekundäre Montage ist eine zielgerichtete Ablage der Drähte in der Nut allerdings nicht möglich, weswegen es auch als indirektes Wickelverfahren bezeichnet wird.

3.1.5. Herstellung von Formspulen

Prinzipiell werden viele Spulengruppen unter dem Begriff der Formspule zusammengefasst. So stößt man in der Fachliteratur auf weitere Bezeichnungen, die Formspulen unterschiedlichster Form und Ausführung beschreiben. So beschreiben (Braymer 1920) und (Richter 1952) unter anderem einteilige und zweiteilige Diamantspulen, gebogene bzw. gerade konzentrische Spulen und sogenannte Steckspulen. Außerdem beschreibt er Spulen, welche nicht aus massivem Leitermaterial, sondern aus Kunststoffstäben gefertigt werden. Für den Einsatz in Traktionsantrieben ist die Verwendung von Steckspulen bzw. Hairpin-Spulen häufig anzutreffen. Die Spulen sind leicht zu handhaben und einfach herzustellen, allerdings ist der Verschaltungsaufwand enorm und sehr komplex, weshalb dieser Schritt nach (Mechler 2010) hohe Ausschussraten mit sich bringt.

Das mechanische Formen der Wicklungselemente erfolgt nach (Sequenz 1973) auf speziellen Vorrichtungen wie Wickelformen oder Spreizvorrichtungen. Maßgeblich für die Wahl der entsprechenden Technologien ist nach (Bălă et al. 1969) die zu fertigende Stückzahl. Zunächst muss das Ausgangsmaterial, sofern es sich um einen massiven Leiter oder einen bereits fertigen Kunststab handelt, nach dem Richten auf die entsprechende Länge gebracht werden. Abgeschnitten wird das Material mit einer automatischen Reck- und Abschneidevorrichtung nachdem es von einer Haspel abgezogen wurde.

Daraufhin werden nach (Sequenz 1973) die Spulen auf Wickelschablonen in die entsprechend gewünschte Grundform gebracht. Dies geschieht nach (Heiles 1936; Much 1983) mit einer besonderen, das Ausweichen des Stabes aus der Ebene verhindernden, Einrichtung, die das Material zu einer Hufeisen- oder Haarnadelform mit parallelen Schenkeln biegt. Abbildung 8 zeigt die jeweiligen Formen der Steckspule zwischen den einzelnen Arbeitsschritten. Zentrale Herausforderung bei der Herstellung von Formspulenwicklungen ist die Montage und Kontaktierung der Vielzahl von Einzelelementen. Bei einem Wegfall dieser komplexen Kontaktierung wäre dieses Verfahren für die Anwendung in der Motorenfertigung nach (Mechler 2010) ideal.

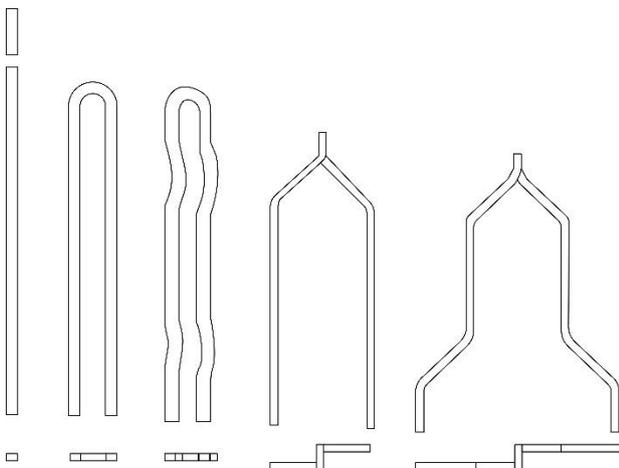


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Biegevorgangs für Steckspulen (Eigene Abbildung nach (Bălă et al. 1969))

3.1.6. Kontinuierliche Hairpinwicklung

Bei dieser Fertigungstechnologie handelt es sich nach (Sadiku und Witt 2009) um eine Wicklungsvariante bestehend aus rechteckigem oder quadratischem Profildraht.

Die Schwierigkeit bei der Herstellung eines solchen Stators besteht nach (Sadiku und Witt 2009) darin, dass der starke Rechteckdraht sich bei einem herkömmlichen Wickel- und Einziehverfahren nur schwer verformen lässt. So werden zunächst zwei einzelne Rechteckstränge wie in Abbildung 9a) auf einem speziellen Biegeautomaten hergestellt und anschließend werden diese wie in Abbildung 9b) zu einer Gesamtwicklung zusammengesetzt.

Diese wird dann nach (Plikat und Mertens 2011) von einem Magazin über den Zwischenschritt eines Werkzeuges in das isolierte Statorpaket eingebracht.

Im Unterschied zum Formspulungsverfahren wird eine kontinuierliche Wicklung erzeugt, die nachträglich montiert werden muss. Analog zur Formspulentechnik ist die beschädigungsfreie Montage der Wicklung die größte Herausforderung dieser Technik.

Diese Technik verbindet die Vorteile der klassischen Runddrahtwickeltechnik und der Hairpinspulen.

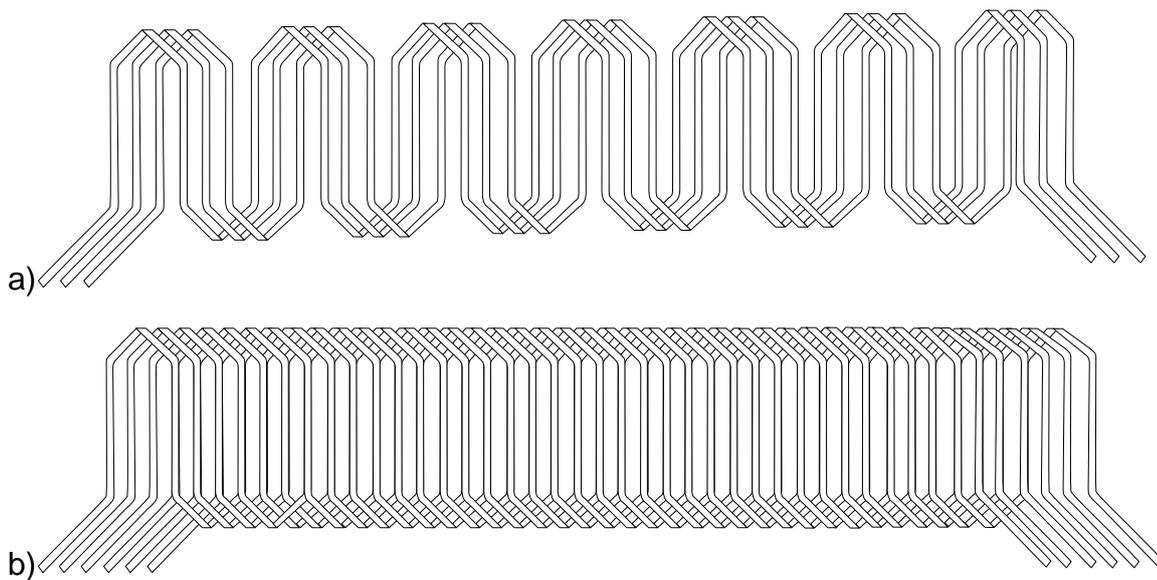


Abbildung 9: Schematische Darstellung einer kontinuierlichen Hairpinwicklung (Eigene Abbildung nach (Sadiku und Witt 2009))

4. Übersicht der klassischen Wickelverfahren für Traktionsantriebe

In Traktionsantrieben werden wie bereits beschrieben vorrangig Asynchronmaschinen, Permanentmagnet erregte Synchronmaschinen oder fremderregte Synchronmaschinen eingesetzt. Die Statorwicklungen der Maschinen können, wie in Abbildung 10 zu erkennen ist, sowohl verteilt als auch konzentriert ausgeführt werden. Allerdings ist vor allem für die Asynchronmaschine ein erheblicher Mehraufwand bei der Leistungselektronik bei der Verwendung von konzentrierten Wicklungen gegenüber verteilten Wicklungen festzustellen, wenn eine vergleichbare Leistungsfähigkeit der Maschine gewährleistet sein soll. (Gerling et al. 2012)

Verteilte Wicklungen werden nach aktuellem Stand der Technik klassischerweise mit dem Einziehverfahren hergestellt. Auch Hairpin bzw. Formspulen werden klassischerweise verteilt hergestellt. Allerdings sind diese Verfahren keine klassischen Wickelverfahren sondern sekundäre umformbasierte Montageverfahren, weshalb sie nach (DIN 8580) bzw. (DIN 8593-5) nicht der Kategorie Wickeln mit Draht zugeordnet werden.

Als neuartiger Trend können auch mit dem Nadelwickelverfahren verteilte Wicklungen gefertigt werden, allerdings sind dafür Hilfswerkzeuge zur Drahtführung im Wickelkopf notwendig, wie beispielsweise in (Stenzel et al. 2014a; Grosse, T., Hameyer, K., Hagedorn, J. 2014) vorgestellt. Auch die kontinuierliche Hairpinwicklung eignet sich für die Herstellung von verteilten Wicklungen für Statoren.

Verteilte Rotorwicklungen werden klassischerweise mit dem Flyerwickelverfahren hergestellt.

Konzentrierte Wicklungen werden auf innengenuteten Vollblechschnittstatoren mit dem Nadelwickelverfahren hergestellt. Bei innengenuteten Statoren welche aus Polketten bestehen, die dann zu einem Stator zusammengeslossen werden, kann sowohl das Nadel- als auch das Flyerwickelverfahren eingesetzt werden. Für die Bewicklung von Einzelzähnen wird üblicherweise das Linear- oder aber auch das Flyerwickelverfahren angewendet.

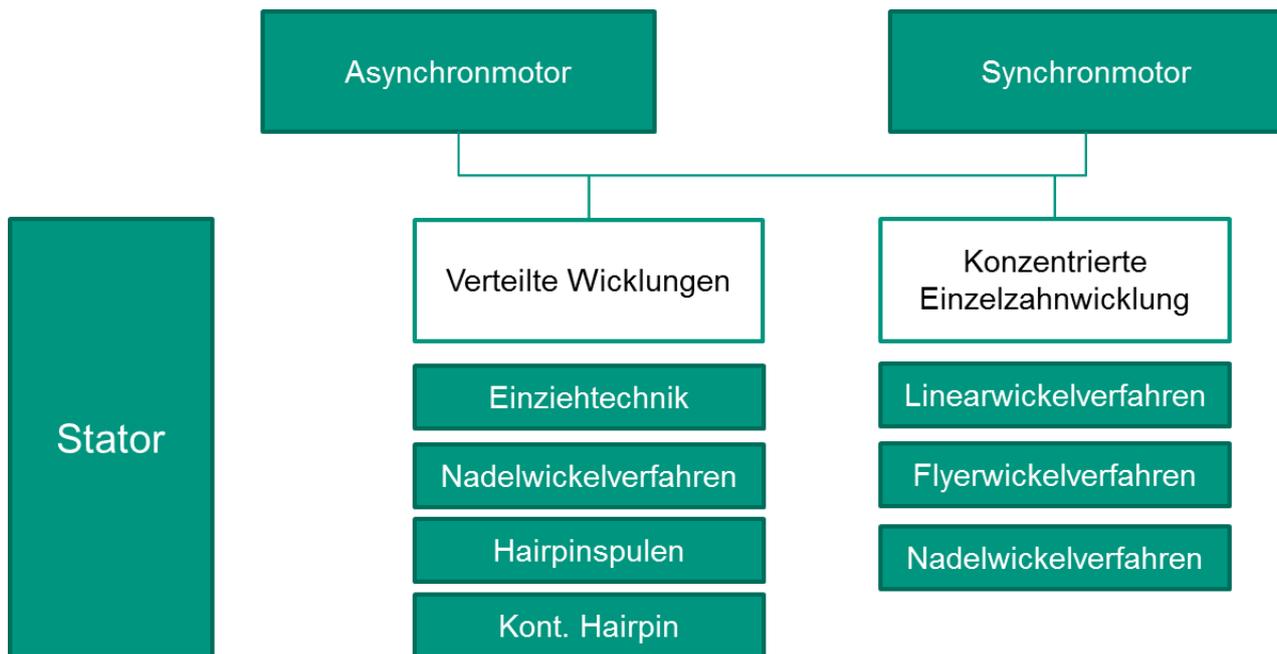


Abbildung 10: Übersicht über die für die Elektromobilität wichtigen Wickelverfahren eigene Abbildung nach (Bauer et al. 2015)

4.1. Vor- und Nachteile der verschiedenen Wickelverfahren

Um die Wickelverfahren miteinander vergleichen zu können muss zwischen den Runddrahtwickelverfahren und den auf umformenden Verfahren basierenden Formspulen und der kontinuierliche Hairpinwicklung unterschieden werden. Da die Herstellung dieser unterschiedlichen Arten von Spulen doch sehr verschiedenartig ist, wird in diesem Kapitel nur auf die klassischen Runddrahtwickelverfahren eingegangen. Eine genauere Betrachtung der umformenden Verfahren wird später im Rahmen der neuartigen Ansätze in der Wickeltechnik durchgeführt.

Bei den Runddrahtwickelverfahren werden prinzipiell zwei unterschiedliche Arten der Bewicklung unterschieden. Dabei gehören nach (Hagedorn et al. 2016) die Verfahren Linearwickeln, Flyerwickeln und Nadelwickeln zu den direkten Wickelverfahren und das Einziehverfahren zu den indirekten Wickelverfahren. Der Unterschied liegt in der Aufbringung des Drahtes auf den Spulenkörper bzw. den Statorzahn. Bei den direkten Verfahren wird der Draht wie das Wort es bereits impliziert direkt auf den Spulenkörper bzw. Statorzahn gewickelt wobei beim Einziehverfahren die bereits (direkt) vorgewickelten Spulen in einem zweiten Schritt in den Stator und damit auf die jeweiligen Statorzähne eingebracht wird.

Um die unterschiedlichen Wickelverfahren gegeneinander bewerten zu können werden zuerst die nach (Hagedorn et al. 2016) typischen Prozesseigenschaften der genannten Verfahren in Tabelle 2 miteinander verglichen.

Übersicht der klassischen Wickelverfahren für Traktionsantriebe

Tabelle 2: Vergleich der Runddrahtwickelverfahren nach (Hagedorn et al. 2016)

	Linearwickeln	Nadelwickeln	Flyerwickeln	Einziehtechnik
Max. Geschwindigkeit in [Windungen/min]	30.000	2.500	12.000	12.000 (Flyer)
Erzeugbares Wickelschema	Orthozyklisch	Orthozyklisch	Orthozyklisch	Wilde Wicklung
Theoretisch erzeugbarer mech. Füllfaktor	90,1%	90,1%	90,1%	60%
Real erzeugbarer mech. Füllfaktor	85%	85%	85%	55%
Wicklungstypen	Konzentrierte Wicklung	Konzentrierte & Verteilte Wicklung	Konzentrierte & Verteilte Wicklung	Verteilte Wicklung
Drahtbeanspruchung	Gering	Hoch	Mittel	Hoch
Investitionskosten	Gering	Mittel	Mittel	Hoch
Automatisierungsgrad	Hoch	Hoch	Hoch	Mittel

Wie bereits die Produktrecherche einiger OEM in Kapitel 2.4 gezeigt hat wird in aktuellen Serienanlagen die Einziehtechnik mit vorgelagertem Flyerwickelzentrum von den meisten OEM bevorzugt, da solche Anlagen bei den aktuell geforderten Ausbringungsraten bereits dieselben Taktzeiten erreichen, wie von der Fertigung & Montage von konventionellen Motoren gewohnt. So ist nach (Halder 2013) die Einziehtechnik universell einsetzbar und hat ein hohes Markt- und Technologiepotential.

Allerdings bringt das Einziehverfahren auch Nachteile gegenüber den direkten Wickelverfahren mit sich. Ein erster Nachteil des Einziehverfahrens besteht darin, dass es nicht vollständig automatisierbar ist. So kann nach (Kühl 2014) das Kontaktieren nur manuell erfolgen, was nach (Kampker 2014) mit der Biegeschlaffheit der Wicklungsenden begründbar ist, da diese unfixiert in den Stator gezogen werden. Dies macht diesen Prozessschritt nach (Tzscheutschler et al. 1990) nicht nur zeitaufwendig, sondern nach (Kampker 2014) auch teuer und fehleranfällig.

Außerdem wird verfahrensbedingt bei indirektem Bewickeln durch das Einziehen in den Stator nach (Kampker 2014) der Draht sehr stark belastet. Diese hohen Kräfte können nach (Stenzel et al. 2015b) zu Drahtlängungen durch die Querkontraktionen führen, was wiederum zu schlechteren Widerstands- und Induktivitätswerten führt. Zusätzlich entstehen beim Einziehen der Wicklung Drahtkreuzungen, welche nach (König 2001) dazu führen, dass es

zu Hohlräumen zwischen den Windungen und Lagen und damit zu einer reduzierten Leistungsdichte oder geringeren Drahtdurchmessern kommt. Dabei kann die Drahtkreuzung nach (Würfel und Raggan 2014) je nach Motor kann bis zu 20% des Wicklungsraumes blockieren. Die mechanische Belastung der Wicklung im Betrieb führt bei Drahtkreuzungen aus Erfahrung der Hersteller ebenfalls zu einer reduzierten Lebensdauer des Elektromotors (Gröning 2016). Die hohen Drahtbelastungen während des Prozesses führen somit beim Bewickeln von Hochleistungsmotoren mit hohen Anforderungen an die Wicklung und höchsten Prozesszeiten häufiger zu Ausschuss, da Drahttrisse aufgrund der hohen herrschenden Kräfte nicht zu vermeiden sind.

Des Weiteren muss das Einziehwerkzeug an den zu bewickelnden Stator angepasst werden. Da es sich bei den Werkzeugen um sehr komplexe in höchster Qualität gefertigte Einzelstücke handelt, ist mit sehr hohen Kosten zu rechnen und die Flexibilität eines solchen Werkzeuges sehr gering, da es quasi unmöglich ist, diese Werkzeuge für andere Statordurchmesser wiederzuverwenden.

Schlussendlich weisen eingezogene Motoren nach (Kampker 2014) sehr hohe Wickelköpfe auf, wodurch unnötig Kupfer in den Motor eingebracht wird.

Für einen direkten Vergleich von direkten und indirekten Wickelverfahren können beispielsweise die Untersuchungen von (Gerling 2011) und (Inoue et al. 2011) herangezogen werden. So waren nach (Gerling 2011) die Verluste eines direkt bewickelten Motors mit konzentrierter Wicklung gleichen Gewichts im Vergleich zu einer eingezogenen konzentrierten Wicklung im FTP72-Zyklus um 20% geringer. Damit einhergehend sind außerdem geringere Motorkosten (bedingt durch die geringere Nutzahl) von 10% und eine günstigere Leistungselektronik (10%). Daraus folgt nach (Gerling 2012) durch die höhere Effizienz eines direkt bewickelten Antriebsmotors gleichen Gewichts eine höhere Reichweite des betriebenen Fahrzeuges bzw. eine Kostenersparnis bei der Herstellung.

Des Weiteren sind nach (Hagedorn 2011) für einen direkt bewickelten Kleinmotor von 50W bis zu 50% weniger Kupfer und bis zu 30% weniger Statorblech einzusetzen, um die gleiche Leistung zu erbringen. Dieser Effekt nimmt zwar mit zunehmender Größe des Motors ab, ist jedoch bei einem Traktionsantrieb noch immer in relevanter Größe vorhanden.

Durch eine direkte Bewicklung entstehen nach (Kampker 2014) deutlich kleinere Wickelköpfe, was dazu führt, dass nach (Hagedorn 2013) bis zu 20% weniger Bauraum notwendig ist um die gleiche Leistung zu erzeugen. Außerdem erzeugt ein direkt bewickelter Motor nach (Stenzel et al. 2014b) durch den kleineren Wickelkopf und die fehlenden Drahtkreuzungen in den Nuten bei gleicher Leistung und Größe weniger Wärme.

Ein letzter wesentlicher Vorteil der Direktbewicklung liegt nach (Kühl 2014) darin, dass Motoren oder Spulen für Motoren mit diesen Technologien vollständig automatisierbar

bewickelt werden können. Somit ist keine nachträgliche Handarbeit mehr notwendig und durch Menschen verursachte Fehler bei der Verschaltung können vermieden werden.

4.2. Key Know-How für Unterschiedliche Wickelverfahren

Aus produkttechnischer Sicht wurde bereits ein Vergleich zwischen den direkten und den indirekten Wickelverfahren durchgeführt und die Vor- und Nachteile der jeweiligen Verfahren und deren Auswirkungen auf das Produkt wurden näher beleuchtet. Auch eine Einführung in die unterschiedlichen Wickelverfahren wurde bereits gegeben.

Die wesentlichen produktionstechnischen Herausforderungen sind neben der komplexen Anlagenkinematik vor allem die Beherrschung des Halbzeuges Draht. Dabei muss das Umformverhalten des Drahtes beim Wickeln auf den Spulenkörper in der Tiefe verstanden sein und die Wechselwirkungen zwischen Draht und den Maschinenkomponenten bekannt sein. Dieses Wissen ist derzeit fast ausschließlich im Wissen einzelner Mitarbeiter gebündelt, welche tagtäglich mit Drähten und Wickelmaschinen arbeiten. Für ein tiefgreifendes Verständnis der Drahteigenschaften ist es daher aus wissenschaftlicher Sicht notwendig den Draht als entscheidendes Halbzeug und dessen Umformeigenschaften zu verstehen (Bönig et al. 2015; Bönig et al. 2014; Sell-Le Blanc et al. 2014; Sell-Le Blanc et al. 2013). Um den Draht auf diesem Wissen aufbauend optimal verarbeiten zu können, muss insbesondere das Problem der Drahtzugregelung auch für Hochgeschwindigkeitsanwendungen durch neuartige Aktoren und Sensoren gelöst werden (Sell-Le Blanc et al.; Dobroschke 2011; Wenger 2004).

Um allerdings die produktionstechnischen Herausforderungen beim Bewickeln von Statoren und Spulen aus Anlagenherstellersicht meistern zu können ist es notwendig die wesentlichen Anlagenkomponenten für die unterschiedlichen Verfahren zu kennen und deren Bedienung und Einsatz zu beherrschen. Daher werden im Folgenden die Anlagenkomponenten für bestehende Wickeltechniken am Beispiel einer Nadelwickelmaschine und eines Einziehentrums mit vorgelagerter Flyerwickelstation erläutert.

4.3. Anlagenkomponenten für die bestehenden Wickeltechniken

In einer klassischen Zwei-Achs-Nadelwickelmaschine zur Bewicklung innengenuteter Statoren sind nach (Hagedorn et al. 2016, S. 175–196) neben den immer gleichen bzw. ähnlichen Maschinenelementen wie Maschinengestell, Schutzumhausung, Steuerung und Drahtzuführung auch spezifisch auf die Wickelaufgabe angepasste Anlagenkomponenten in jeder Maschine verbaut. So können für das Drahtzugregelsystem verschiedene Typen und Kombinationen von Drahtbremse und Ausgleichssystem gewählt werden. Dabei werden mechanische und elektrische Drahtbremsen voneinander unterschieden und je nach Notwendigkeit mit einem primären oder sekundären Ausgleichssystem kombiniert (Hagedorn et al. 2016). Der Draht selber wird nach (Feldmann et al. 2013) von der Vorratsspule über Führungen und Umlenkrollen auf die Drahtbremse und von dort über ein evtl. vorhandenes

Übersicht der klassischen Wickelverfahren für Traktionsantriebe

Ausgleichssystem durch den Drahtführer (beim Nadelwickeln die Nadel) auf den zu bewickelnden Stator geführt.

Das Einziehzentrum mit vorgelagerter Flyerwickelstation unterscheidet sich jedoch in vielen Punkten von einer Nadelwickelanlage. Die Anlagenkomponenten der Flyerwickelstation sind in den Grundkomponenten der Nadelwickelmaschine gleich. Der Flyer ist nach (Hagedorn et al. 2016) ein sogenannter Schablonenflyer, welcher in der Rotationsmitte des Flyers Führungsleitbacken in Form einer Schablone besitzt. Ein inneres Segment des Werkzeuges, das an den Stator gefahren wird, komplettiert diese wichtigen Werkzeugsätze. Die Leitbacken werden als produktspezifische Werkzeuge an den jeweiligen Stator angepasst. Die Übertragung der einzelnen Spulen erfolgt nach (Hagedorn et al. 2016) vorschublos. Die letzten Windungen jeder Spule müssen über einen eine Vorrichtung in das Wickelwerkzeug ausgestoßen werden. Der Aufbau des Wickelwerkzeuges ist in Abbildung 11 schematisch dargestellt, wobei der Stator (1) oberhalb des Werkzeuges fixiert wird. Dann wird die Spule (2) durch den Einziehpilz (3) geführt über die Außen- und Innennadeln (4), (5) in den Stator eingezogen. Der Einziehpilz selber wird meist über eine hydraulische Vorschubachse gesteuert.

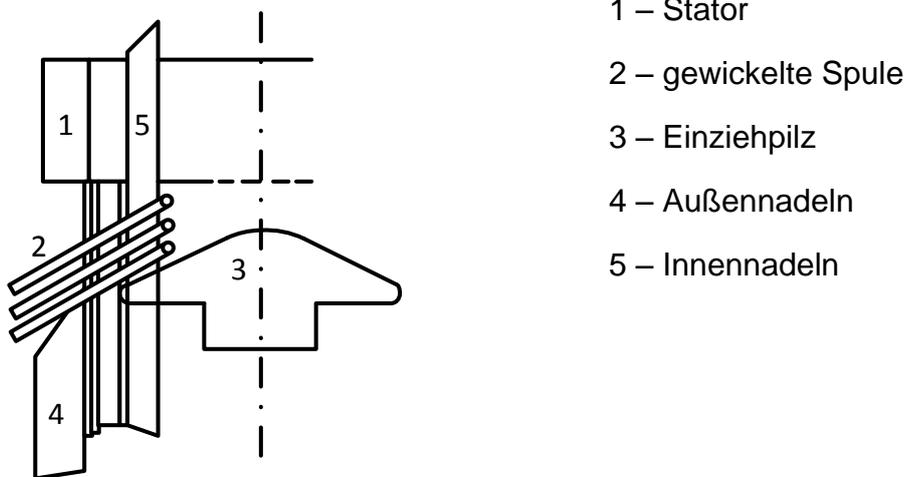


Abbildung 11: Darstellung des Wickelwerkzeuges - eigene Darstellung nach (Tzscheutschler et al. 1990)

5. Neue Ansätze in der Wickeltechnik

Für die Herstellung verteilter Wicklungen wird trotz vieler Nachteile das Einziehverfahren verwendet. Allerdings zeigt sich in den letzten Jahren vermehrt der Trend zur direkten Bewicklung von verteilten Wicklungen mit der Nadelwickeltechnik oder mit rechteckigen Flachdrähten für Hochleistungsmotoren.

So bietet nach (Hagedorn 2013) die Nadelwickeltechnik die Möglichkeit des automatischen Verschaltens der Phasenstränge und damit eine Komplettbearbeitung auf einer Maschine. Dadurch ergibt sich auch die Reduzierung von Kontaktstellen. Außerdem kann nach (Hagedorn 2013) die Phasenisolation durch Statorendscheiben geregelt werden. Ein Hauptvorteil, den die Nadelwickeltechnik bietet, ist die geringe Drahtbelastung beim Wickeln bzw. die aktiv regelbare Drahtbelastung durch geregelte Drahtbremsen. Zusätzlich ist durch den hohen Automatisierungsgrad auch ein nachträgliches Formen des Wickelkopfes nur in geringem Maße notwendig.

Dieser Trend zeichnet sich insbesondere durch wissenschaftliche Veröffentlichungen sowie gehäufte Patentanmeldungen zu diesem Verfahren innerhalb der letzten Jahre ab. Aus der Wickeltechnik für Kleinmotoren ist bekannt, dass die Führung der Drähte im Wickelkopf eine essentielle Herausforderung für das Nadelwickeln darstellt. Für kleinere Motoren wird dies mit Hilfe von Endkappen bzw. Endscheiben gelöst. Für größere Motoren kann dieses Prinzip übernommen werden, steht jedoch der Forderung nach erhöhter Leistungsdichte entgegen.

So wurde von (Stenzel et al. 2013; Stenzel und Richnow 2014) ein Verfahren vorgestellt, welches ohne die Verwendung von im Stator verbleibenden Endkappen auskommt und damit erheblich kleinere Wickelköpfe verursacht, als das Bewickeln von Statoren mit Endscheiben. Zusätzlich wurden durch (Stenzel et al. 2014b; Stenzel et al. 2015a) auch schon Ergebnisse an einem Prototypen vorgeführt, was zeigt, dass die patentierten Ideen auch in reale Produkte umgesetzt worden sind.

Auf industrieller Seite wurden 2005 durch (Lyschick et al. 2005) Endkappen beschrieben, welche für die direkte Bewicklung geeignet sind. Ob es zu einer produktionstechnischen Umsetzung dieses Patenten kam ist allerdings nicht bekannt. Auch durch die Patentanmeldung von (Battista 2015) wird die Möglichkeit geboten innengenutete Statoren mit einer Nadelwickelmaschine mit schwenkbarer Nadel zu bewickeln. Allerdings beruht auch dieses Verfahren auf der Verwendung von Endkappen und ist auf kleinere Statorbauweisen beschränkt. Weitere Patentanmeldungen aus der Wirtschaft zeigen bereits 2004 den Trend die Direktbewicklung für größere Statoren zu verwenden. So wurde beispielsweise in (Walter 2004) ein Verfahren angemeldet, welches mit den entsprechenden Endkappen verteilte Wicklungen für innengenutete Statoren herstellen kann, welches jedoch die Drahtablage selbst nur über ein Hilfswerkzeug durchführen kann. Dieses Patent wurde durch (Bolli et al.

2007) erweitert, allerdings kann mit dieser Technik der Draht nicht direkt in das Werkzeug abgelegt werden, da die lineare Bewegung die Freiheitsgrade beim Bewickeln beschränkt. Über die Anwendung in der industriellen Produktionspraxis wurden keine Informationen gefunden. Auch durch (Hagedorn und Lüttge 2012) wurde eine Möglichkeit präsentiert, mit einer 5-Achs-Nadelwickelmaschine und dem entsprechenden Wickelwerkzeug verteilte Wicklungen für innengenutete Statoren herzustellen, wobei bei dieser Technologie, die schwenkbare Nadel ein direktes Ablegen des Drahtes in den Endkappen ermöglicht und nach (Grosse, T., Hameyer, K., Hagedorn, J. 2014) auch schon industriell umgesetzt wurde. All diese Patente und daraus entstandenen Anlagen benötigen allerdings spezielle Endkappen um die einzelnen Phasen im Wickelkopf verlegen zu können, was nach (Stenzel et al. 2014a) zu erhöhten Wicklungsköpfen führt.

Neben den forschungsseitigen Aktivitäten von Stenzel wurde durch (Sell-Le Blanc und Hagedorn 2016; Sell-Le Blanc 2016) ein Wickelverfahren mit neuartigem, flexiblem und nach dem Wickeln demontierbarem Werkzeug vorgestellt, welches geringere Wickelköpfe erzeugt. Nach Quellenangabe (Sell-Le Blanc und Hagedorn 2016) resultierte auch diese Neuentwicklung in einer Patentanmeldung und ist bereits in industriellem Maßstab verfügbar. Diese Maschine ist zusätzlich in der Lage bis zu 15 parallele Drähte zu wickeln, was wiederum neue Maßstäbe in der Produktivität solcher Nadelwickelanlagen setzt.

All die hier beschriebenen Ansätze zeigen, dass die Einziehtechnik ihr Alleinstellungsmerkmal zur Herstellung von verteilten Runddrahtwicklungen verloren hat. Im Vergleich zu den indirekt bewickelten Einzugswicklungen bieten die neuen Ansätze enormes Potential, da sich die bereits von (Kampker 2014, S. 153) als kritisch betrachteten Drahtkreuzungen vermeiden lassen. Außerdem ist laut (Hagedorn et al. 2016, S. 212–213) aufgrund der Kontrollierbarkeit des Drahtverlaufes eine verteilte, direkte Bewicklung besser automatisierbar als eine indirekte. So lassen sich laut (Schneider et al. 2014) auch die Kontaktierprozesse komplett automatisieren.

So kann auf Basis der genannten Vorteile von direkten Wickelverfahren gesagt werden, dass das Nadelwickelverfahren für die Direktbewicklung von verteilten Wicklungen ein ernst zu nehmender Konkurrent für die Einziehtechnik ist. Nach (Sell-Le Blanc 2016) kann eine Teilspule mit mehreren Drähten bereits in bis zu 5 Sekunden gefertigt werden, was bei bis zu 15 parallelen Drähten auch in der Produktivität vergleichbare Werte wie die Einziehtechnik liefert. Zusätzlich wäre es mit einer solchen Technologie möglich die Prozesszeiten der Statorfertigung ohne Unterbrechung, aufgrund von manuellen Tätigkeiten, weiter zu beschleunigen und sich an die von der Automobilbranche geforderten Taktzeiten anzunähern.

Ein weiterer sich abzeichnender Trend ist die Herstellung von Spulen aus Halbleitermaterial. So werden sogenannte Hairpin Spulen aus rechteckigem Vollmaterial wie bereits erklärt

hergestellt. Eine andere Herangehensweise zur Herstellung von Formspulen wird in (Bickel et al.) präsentiert, wobei die Formspulen hierbei aus verpressten Runddrähten bestehen. Auch durch (Stöck 2015a, 2015b) wurden Patente zur Verwendung von Litzendraht für Formspulen angemeldet.

Die Herstellung von kontinuierlichen Hairpinwicklungen wiederum steht wickeltechnisch vor anderen Herausforderungen als die Runddrahtwickeltechnik, da sich insbesondere an den Spulenköpfen umformtechnische Aufgaben ergeben, welche in der klassischen Wickeltechnik so nicht betrachtet werden. Dies wird insbesondere deutlich durch den Buchbeitrag von (Sadiku und Witt 2009) und die Anmeldung vieler Patente zu dieser Technik unter anderem durch die (Shinichi et al. 2009), (Udea et al. 2004) und den Automobilhersteller Toyota (Kaneiwa und Takasaki 2011), welche in ihren Patenten neue Ansätze zur Herstellung dieser kontinuierliche Hairpinwicklungen vorgestellt haben, wobei allerdings keine produktionstechnischen Abbildungen dieser Anlagen bekannt sind. Laut (MBB 2016) gibt es bereits eine industrielle Lösung für die Herstellung von kontinuierlichen Hairpinwicklungen im Serienformat.

All diesen alternativen Wickelverfahren ist gemeinsam, dass sie sehr hohe Füllfaktoren besitzen, da durch die rechteckige Form des Drahtes der Nutinnenraum perfekt ausgenutzt werden kann und somit die Kupferverluste so gering wie möglich gehalten werden können.

Dabei weist das kontinuierliche Hairpinwicklungsverfahren nach (Ishigami et al. 2015) deutliche Vorteile gegenüber der konventionellen Hairpin Technik auf, da nur wenige Kontaktstellen entstehen. Dies begünstigt neben einem geringeren Wickelkopf vor allem die Tatsache, dass sich der Verschaltungsaufwand auf ein Minimum reduziert.

Die Vielzahl an Kontaktstellen bei Nutzung der konventionellen Hairpintechnik bzw. bei Formspulen führen dabei nach (Ishigami et al. 2014) zu einem hohen Ausschuss in der Fertigung. Außerdem müssen nach (Ishigami et al. 2014) mittlere und große Hairpinstatoren aktuell noch manuell gefertigt werden, da die Automatisierbarkeit mit den aktuell verfügbaren Anlagen noch eingeschränkt ist. Auch (Mechler 2010) stellt in seiner Ausarbeitung fest, dass das kontinuierliche Hairpin Verfahren gegenüber der konventionellen Hairpin Technik eine höhere Automatisierbarkeit bieten würde.

Diese Verfahren wurden in bisherigen Fachbüchern (Tzscheuschler et al. 1990; Hagedorn et al. 2016) zwar unter den Herstellungsverfahren für Spulen genannt, gehören allerdings nicht zu den klassischen Wickelverfahren da diese auf einem reinen Umformprozess basieren und somit klassisch nach (DIN 8593-5) nicht dem Fertigungsverfahren Fügen mit Draht zugeordnet werden können. Lediglich die Formspule aus Runddrähten wird in ihrem ersten Fertigungsschritt klassisch gewickelt wobei der zweite Schritt auch wieder einen Umformprozess zur Grundlage hat.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich also auf Basis dieser Studie sagen, dass die Wickeltechnik eine derzeit sehr stark wachsende Branche ist, welche durch immer neue Technologien den Herausforderungen aus dem Bereich der Traktionsantriebe standhält.

Im Rahmen dieser Studie wurden zunächst die unterschiedlichen elektrischen Antriebskonzepte und die dazugehörigen Motoren aufgezeigt und miteinander verglichen. Außerdem wurde eine Recherche der aktuellen Produkte einiger ausgewählter OEM durchgeführt.

Anschließend wurden die derzeit am Markt existierenden Wickelverfahren vorgestellt und anhand ausgewählter Kriterien miteinander verglichen. So wurden Vor- und Nachteile der Runddrahtwickelverfahren aufgezeigt und es wurde deutlich, dass die direkte Bewicklung von Elektromotoren konkurrenzfähig im Vergleich zur indirekten Bewicklung ist und in vielen Bereichen deutliche Vorteile bietet. Allerdings gilt es immer für den jeweiligen Anwendungsfall das entsprechende Wickelverfahren auszuwählen ist. Jede Wicklungsart hat Vor und Nachteile und ist anwendungsspezifisch auszuwählen.

So wurden schlussendlich neue Ansätze in der Runddrahtwickeltechnik betrachtet und das Nadelwickelverfahren mit zusätzlichen Achsen als zukunftsweisendes durchaus vergleichbares Verfahren zur klassischen Einziehtechnik aufgezeigt. Verfahren betrachtet, welche nach (DIN 8593-5) nicht in das klassische Runddrahtwickeln eingeordnet werden, aber aufgrund vieler Vorteile immer mehr in den Markt der Wickeltechnik eindringen. So kombiniert die neue Technologie der Flachdrahtwellenwicklung die Vorteile der Hairpin Technologie mit der der Runddrahtwickeltechniken und bietet somit ganz neue Potentiale.

Als Fazit lässt sich sagen, dass die Wickeltechnik eine Branche ist, welche aufgrund immer neuer Herausforderungen durch eine intensive Zusammenarbeit zwischen Industrie und Wissenschaft, in den nächsten Jahren einen stark wachsenden Markt bedienen muss und kann und durch immer neue Entwicklungen sich den stets geforderten Kundenwünschen auch entsprechend anpassen kann.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Übersicht über bestehende elektrische Fahrzeugkonzepte (eigene Abbildung nach (Bauer et al. 2015))	4
Abbildung 2: Vergleich unterschiedlicher Hybridkonzepte (eigene Abbildung nach (Kampker 2014, S.119))	5
Abbildung 3: Vereinfachte Fertigungsprozesskette von Elektromotoren (ASM, PSM) (eigene Abbildung nach (Roland Berger Strategy Consultants 2011))	13
Abbildung 4: Schematische Darstellung des Linearwickelverfahrens (Eigene Abbildung nach (Feldmann et al. 2013))	14
Abbildung 5: Schematische Darstellung des Flyerwickelverfahrens (Eigene Abbildung nach (Feldmann et al. 2013))	15
Abbildung 6: Schematische Darstellung des Nadelwickelverfahrens (Eigene Abbildung nach (Feldmann et al. 2013))	16
Abbildung 7: Schematische Darstellung des vorgelagerten Flyer- (links) bzw. Einziehverfahrens (rechts) (Eigene Abbildung nach (Tzscheutschler et al. 1990))	17
Abbildung 8: Schematische Darstellung des Biegevorgangs für Steckspulen (Eigene Abbildung nach (Bälä et al. 1969))	18
Abbildung 9: Schematische Darstellung einer kontinuierlichen Hairpinwicklung (Eigene Abbildung nach (Sadiku und Witt 2009))	19
Abbildung 10: Übersicht über die für die Elektromobilität wichtigen Wickelverfahren eigene Abbildung nach (Bauer et al. 2015)	21
Abbildung 11: Darstellung des Wickelwerkzeuges - eigene Darstellung nach (Tzscheutschler et al. 1990)	26

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Arten elektrischer Maschinen - eigene Darstellung nach (Spath und Bauer 2012; Spath et al. 2010; Kampker 2014); Legende: ○ sehr schlecht, ● sehr gut	9
Tabelle 2: Vergleich der Runddrahtwickelverfahren nach (Hagedorn et al. 2016)	22

Literaturverzeichnis

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hg.) (2009): Wie Deutschland zum Leitanbieter für Elektromobilität werden kann. Statuts Quo - Herausforderungen - Offene Fragen. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag (acatech bezieht Position, 6).

Bălă, C.; Fetita, A.; Lefter, V. (1969): Handbuch der Wickeltechnik elektrischer Maschinen: Theorie, Konstruktion und Technologie von Wicklungen rotierender elektrischer Maschinen: Verlag Technik. Online verfügbar unter <https://books.google.de/books?id=ihXgOgAACAAJ>.

Battista, Gian (2015): Needle Winding Machine, particularly for winding poles arranged inside a cylindrical surface. Angemeldet durch Marsilli S.P.A. am 09.10.2015. Veröffentlichungsnr: WO 2016/058947 A1.

Bauer, Wilhelm; Rothfuss, Florian; Dungs, Jennifer; Hermann, Florian; Cacilo, Andrej; Schmidt, Sarah et al. (2015): Strukturstudie BWeMobil. Hg. v. e-mobil BW GmbH.

Beckmöller, Stefan (2013): Wickeldrähte – ein High-Tech-Produkt. - Möglichkeiten und Grenzen -. Wickelseminar, 2013.

Bickel, B.; Mahr, A.; Kuhl, A.; Franke, J.; Meixner, S.; Berendt, E.; Riedel, A.: Implementation of the needle winding technique for diamond coils. In: 2015 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC). Nuremberg, Germany, S. 1–9.

BMW (2014): BMW i Production Process Tour. Weitere Beteiligte: BMW Group. Online verfügbar unter https://www.youtube.com/watch?v=agHOW2GJ_w8, zuletzt geprüft am 20.12.2016.

Bolli, Thomas; Ulrich, Peter; Wyss, Vincens; Meier, Konrad (2007): Vorrichtung zum Wickeln von Statoren von Elektromotoren. Angemeldet durch ATS Wickel- und Montagetechnik am 21.12.2007. Veröffentlichungsnr: EP 1 936 784 B1.

Bönig, J.; Bickel, B.; Spahr, M.; Fischer, C.; Franke, J. (2015): Simulation of orthocyclic windings using the linear winding technique. In: Proceedings of 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC). Proceedings of 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC). Nuremberg, Germany, S. 1–6.

Bönig, Jochen; Bickel, Benjamin; Ebenhöch, Matthias; Spahr, Michael; Fischer, Christian; Franke, Jörg (2014): Structural Mechanics Process Simulation of Linear Coil Winding. In: *AMR* 1018, S. 47–54. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1018.47.

Braymer, Daniel H. (1920): Armature Winding And Motor Repair: Read Books Ltd.

- Dobroschke, Andreas (2011): Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte. Univ., Diss.--Erlangen-Nürnberg, 2011. Bamberg: Meisenbach (Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, 219).
- Feldmann, Klaus; Schöppner, Volker; Spur, Günter (2013): Handbuch Fügen, Handhaben und Montieren. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- DIN 8580, 2003: Fertigungsverfahren.
- DIN 8593-5, 2003: Fertigungsverfahren Fügen.
- Gerling, Dieter (2011): Trends und Herausforderungen bei zukünftigen E-Maschinen und Transformatoren. ZVEI. Fulda, 26.10.2011.
- Gerling, Dieter (2012): Optimierung des Teillast-Wirkungsgrades elektrischer Antriebe. Yokogawa Power-Meter Seminar, 19.04.2012.
- Gerling, Dieter; Mühlbauer, Klaus; Dajaku, Gurakuq (2012): Frisch Gewickelt. In: *AutoCAD Magazin*.
- Gröning, Ingolf (2016): ProLemo Abschlusstreffen. Karlsruhe, 12.12.2016. Gespräch.
- Grosse, T., Hameyer, K., Hagedorn, J. (2014): Needle winding technology for symmetric distributed windings. In: Proceedings of 4th International Electric Drives Production Conference. 4th International Electric Drives Production Conference.
- Hagedorn, Jürgen (2011): Winding technology for cost- and material-optimized stators. Electric Drives Production Conference. Nürnberg, 09.06.2011.
- Hagedorn, Jürgen (2013): Direktbewicklung innengenuteter Statoren. Möglichkeiten der Nadelwickeltechnik bei konzentrierten und verteilten Wicklungen. Wickelseminar. FAPS. Erlangen, 05.04.2013.
- Hagedorn, Jürgen (2015): Grundlagen der Wickeltechnik. für Magnet- und Motorspulen. Wickelseminar. Aumann GmbH. Espelkamp, 15.10.2015.
- Hagedorn, Jürgen; Lüttge, Wolfgang (2012): Nadelwickelsystem für zu bewickelnde Wicklungsträger, Verfahren zum Bewickeln von Wicklungsträgern mit verteilter Wicklung, Innenläufer-Stator, Aussenläufer-Rotor und Wicklungsträger für Elektromotoren mit verteilter Wicklung. Angemeldet durch Aumann GmbH am 07.01.2012. Veröffentlichungsnr: EP 2 477 315 A2.
- Hagedorn, Jürgen; Sell-Le Blanc, Florian; Fleischer, Jürgen (2016): Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren. Ein Beitrag zur Energieeffizienz. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-49210-9>.

Halder, Hubert (2013): Einziehtechnologie unter dem Aspekt höchster Kupferfüllgrade. Wickelseminar. FAPS. Erlangen, 05.04.2013.

Heiles, F. (1936): Wicklungen Elektrischer Maschinen und Ihre Herstellung. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-52594-0>.

Hofmann, Peter (2010): Hybridfahrzeuge. Vienna: Springer Vienna.

Inoue, M.; Kuroda, Y.; Nishimura, S.; Akita, H. (2011): An evaluation of concentrated and distributed windings in interior PM and claw pole motors. In: IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), 2011. May 30 2011 - June 3 2011 ; the Shilla Jeju, Jeju, Korea. ECCE Asia (ICPE 2011- ECCE Asia). Jeju, Korea (South). Institute of Electrical and Electronics Engineers; Chölllyök-Chönja-Hakkoe; International Conference on Power Electronics; ICPE; ECCE Asia. Piscataway, NJ: IEEE, S. 176–183.

Ishigami, Takashi; Tanaka, Yuichiro; Homma, Hiroshi (2014): Development of Motor Stator with Rectangular - Wire Lap Winding and an Automatic Process for Its Production. In: *Electrical Engineering in Japan* 187. DOI: 10.1002/eej.22522.

Ishigami, Takashi; Tanaka, Yuichiro; Homma, Hiroshi (2015): Motor Stator With Thick Rectangular Wire Lap Winding for HEVs. In: *IEEE Trans. on Ind. Applicat.* 51 (4), S. 2917–2923. DOI: 10.1109/TIA.2015.2391435.

Jovanoski, Jane (2015): Anforderungen an Kupferlackdrähte in der Wickeltechnik. Wickelseminar. Aumann GmbH. Espelkamp, 15.10.2015.

Kampker, Achim (2014): Elektromobilproduktion. Berlin: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-42022-1>.

Kaneiwa, Hiroshi; Takasaki, Akira (2011): Stator und drehende elektrische Maschine. Angemeldet durch Toyota Jidosha Kabushiki Kaisha am 14.06.2011. Veröffentlichungsnr: DE112012002483T5.

König, Werner (2001): Spule für eine elektrische Maschine und Verfahren zur Herstellung einer Spule. Angemeldet durch DaimlerChrysler AG am 14.02.2001. Veröffentlichungsnr: DE 101 06 719 A 1.

Kühl, Alexander (2014): Flexible Automatisierung der Statorenmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik. Univ., Diss.--Erlangen-Nürnberg, 2014. Bamberg: Meisenbach (Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, 251).

Lienkamp, Markus (2012): Elektromobilität. Hype oder Revolution? Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-28549-3>.

- Lienkamp, Markus (2014): Status Elektromobilität 2014. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/262643317_Status_Elektromobilitat_2014, zuletzt geprüft am 06.12.2016.
- Lienkamp, Markus (2016): Status Elektromobilität 2016 oder wie Tesla nicht gewinnen wird.
- Lyschick, Eduard; Mahlmeister, Fridolin; Menz, Michael; Wöhner, Norbert (2005): Verfahren zur Bewicklung einer elektrischen Maschine. Angemeldet durch Siemens AG am 08.08.2005. Veröffentlichungsnr: DE 10 2005 037 375 B4.
- MBB (2016): A global leader in modular machines for e-mobility. Online verfügbar unter <http://www.mbb.com/fileadmin/templates/downloads/presentationen/2016-12-12-aumann-unternehmenspraesentation.pdf>, zuletzt geprüft am 13.01.2016.
- Mechler, Collin Gene (2010): Manufacturing and Cost Analysis for Aluminum and Copper Die Cast Induction Motors for GM's Powertrain and R&D Divisions. Master Thesis. Massachusetts Institute of Technology, Boston. Department of Materials Science and Engineering.
- Much, Walter (1983): Wicklungen und Montage rotierender elektrischer Maschinen. 3., durchges. Aufl., unveränd. Nachdr. München: Pflaum.
- Nationale Plattform Elektromobilität (2010): Zwischenbericht der Arbeitsgruppe 1. Antriebstechnologie und Fahrzeugintegration. Hg. v. Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO).
- Plikat, Robert; Mertens, Christian (2011): Abschlussbericht zum Vorhaben. Leistungsdichte E-Maschine. im Rahmen des FuE-Programms "Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität".
- Richter, Rudolf (1952): Lehrbuch der Wicklungen elektrischer Maschinen: Braun.
- Roland Berger Strategy Consultants (Hg.) (2011): Zukunftsfeld Elektromobilität. Chancen und Herausforderungen für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau. Unter Mitarbeit von Thomas Schlick, Guido Hertel, Bernhard Hagemann und Eric Maiser. VDMA.
- Sadiku, Sadik; Witt, Bernd (2009): Prozesstechnologien zur Herstellung von Elektromotoren für Hybrid- und Elektrofahrzeuge. In: Heinz Schäfer (Hg.): Praxis der elektrischen Antriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge. Mit 17 Tabellen. Renningen: expert Verl. (Fachbuch / Haus der Technik, 102), S. 116–134.
- Schneider, M.; Bickel, B.; Risch, F.; Franke, J. (2014): Active controllable and flexible winding needle an option to reduce the complexity of needle winding machines and the stress on enameled wire. In: Proceedings of 4th International Electric Drives Production Conference (4th International Electric Drives Production Conference), S. 1–5.

- Sell-Le Blanc, Florian (2016): Bauraumoptimiertes Nadelwickeln verteilter Wicklungen für Vollblechstatoren. Eröffnung PTLEA. wbk. Karlsruhe, 12.12.2016.
- Sell-Le Blanc, Florian; Fleischer, Jürgen; Li, Li; Krause, Martin (2014): Characterization of Process-Machine-Interaction for Coil Winding Processes using Multi Body Dynamics. In: Proceedings of 3rd CIRP Conference on Virtual Machining Process Technology (VMPT). CIRP Conference on Virtual Machining Process Technology (VMPT). Calgary, III.1.
- Sell-Le Blanc, Florian; Fleischer, Jürgen; Sautter, Sven; Delzs, Tobias; Hagedorn, Jürgen: Fault analysis of linear winding processes for noncircular orthocyclic coils: Investigation of winding scheme dependencies within the winding process development. In: 2014 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC). Nuremberg, Germany, S. 1–8.
- Sell-Le Blanc, Florian; Hagedorn, Jürgen (2016): Flexible Needle Winding Approaches for Distributed Stator Windings. In: Industrial Transcript of 6th International Electric Drives Production Conference.
- Sell-Le Blanc, Florian; Ruprecht, Ester; Fleischer, Jürgen (2013): Material based process model for linear noncircular coil winding processes with large wire gauge. Investigation of wire material influences on the winding process and compensation approaches. In: Proceedings of 3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC). 3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC). Nuremberg, Germany, S. 1–5.
- Sequenz, Heinrich (1973): Die Wicklungen elektrischer Maschinen. Wechselstrom-Ankerwicklungen: Springer.
- Shinichi, Awano; Yoshiteru, Kashihara; Takuji, Harada; Yoshinobu, Yanagisawa; Atsuo, Ishizuka (2009): Method of Forming Coil Assembly for Stator. Angemeldet durch Denso Corporation am 18.11.2009. Veröffentlichungsnr: US 2010 0125 999 A1.
- Spath, Dieter; Bauer, Wilhelm (2012): Elektromobilität und Beschäftigung. Wirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf Beschäftigung und Standortumgebung (ELAB).
- Spath, Dieter; Bauer, Wilhelm; Rothfuss, Florian; Voigt, Simon; Rath, Karola (2010): Strukturstudie BW eMobil. Unter Mitarbeit von Dieter Spath und Wilhelm Bauer. Hg. v. Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO).
- Stenzel, P.; Dollinger, P.; Mihajlovic, D.; Richnow, J.; Franke, J.; Endisch, C. (2014a): Needle winding for distributed round-wire-windings without the use of insulation disks. In: Proceedings of 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC). 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC). Nuremberg, Germany, S. 1–7.
- Stenzel, P.; Dollinger, P.; Richnow, J.; Franke, J. (2014b): Innovative needle winding method using curved wire guide in order to significantly increase the copper fill factor. In:

Proceedings of 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Hangzhou, China, S. 3047–3053.

Stenzel, Peer; Dollinger, Peter; Endisch, Christian (2013): Wicklungsträger, insbesondere Stator oder Rotor einer Drehstrom-Elektromaschine und Verfahren zur Herstellung der Wicklung eines Wicklungsträgers. Angemeldet durch Audi AG am 11.01.2013. Veröffentlichungsnr: DE 10 2013 000 370 A1.

Stenzel, Peer; Dollinger, Peter; Richnow, J.; Bader, T.; Franke, Jörg; Endisch, Christian (2015a): Experimental investigations of the needle winding technology regarding the influence of the wire guide geometry on the tensile wire force. In: Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Seville, S. 2642–2649.

Stenzel, Peer; Richnow, J.; Franke, Jörg; Endisch, Christian (2015b): Impact of the needle winding technology on the operational behavior of an asynchronous machine. In: Proceedings of 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC). 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC). Nuremberg, Germany, S. 1–8.

Stenzel, Peer; Richnow, Jan (2014): Vorrichtung und Verfahren zum Bewickeln eines Wicklungsträgers. Angemeldet durch Audi AG am 25.04.2014. Veröffentlichungsnr: DE 10 2014 006 406 A1.

Stöck, Martin (2015a): Wicklung für einen Stator, elektrische Maschine, sowie Verfahren zur Herstellung der Wicklung für einen Stator. Angemeldet durch Brusa Elektronik AG am 27.01.2015. Veröffentlichungsnr: EP 3 051 669 A1.

Stöck, Martin (2015b): Formlitze, deren Verwendung, sowie Verfahren zur Herstellung eines Stators für eine elektrische Maschine. Angemeldet durch Brusa Elektronik AG am 23.04.2015. Veröffentlichungsnr: WO002015162586A3.

Tesla (2015): Manufacturing Process of Model S in TESLA Factory. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=AVCCroN7vS0>, zuletzt geprüft am 20.12.16.

Toyota USA (2016): Introducing The 2017 Prius Prime. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=ED6rZjLAPgQ>.

Tzscheuschler, Rolf; Olbrisch, Helmut; Jordan, Wolfgang (1990): Technologie des Elektromaschinenbaus. 1. Aufl. Berlin: Verl. Technik.

Udea, Toshiaki; Mori, Yoshimi; Okamura, Masaki; Ishida, Sakae, Watanabe, Toshinori (2004): Electric rotating machine and winding method for ist stator. Angemeldet durch Hitachi Ltd. am 16.04.2004. Veröffentlichungsnr: EP 1 469 579 A1.

VW Group (2015): Volkswagen e-Up Electric Motor Production. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=QgqtT85tMBA>.

Walter, Patric (2004): Stator einer elektrischen Maschine sowie Verfahren und Vorrichtung zum Wickeln des Stators. Angemeldet durch ATS Wickel- und Montagetechnik AG am 08.04.2004. Veröffentlichungsnr: EP 1 467 466 A2.

Wenger, Ulrich (2004): Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze. Univ., Diss.--Erlangen-Nürnberg, 2004. Bamberg: Meisenbach (Fertigungstechnik - Erlangen, 147).

Würfel, Peter; Raggan, Stefan (2014): Stator. Angemeldet durch Minebea Co., Ltd., Nagano, JP am 19.03.2014. Veröffentlichungsnr: DE 10 2014 003 873 A1.

Impressum

Herausgeber

Fleischer, J.

Institut für Produktionstechnik (wbk)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Autoren

Fleischer, J.; Haag, S.; Hofmann, J.

Publikationsjahr: 2017

© Copyright by Editors