



Abschlussbericht des BMBF-Verbundprojekts NeWire

Neuartige serienflexible Wickelverfahren für die wirtschaftliche auto-
matisierte Fertigung von hoch performanten elektrischen Maschinen

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen **02P16A00X** gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

BETREUT VOM



PROJEKTPARTNER:



Autoren: Jan Winter, Dr. Stefan Grützner (Volkswagen), Thomas Porabka (C.L. Gerhartl i.A. Volkswagen)

Förderkennzeichen 02P16A000

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc, Lando Weiße, Björn Klusmann (Aumann)

Förderkennzeichen 02P16A001

Nicolas Kehl, Jane Jovanoski (Essex Furukawa)

Förderkennzeichen 02P16A0002

Maximilian Halwas, Janna Hofmann, Prof. Jürgen Fleischer (KIT; wbk)

Förderkennzeichen 02P16A003

Christian Riehm, Dr.-Ing. Christian Spieker, Prof. Michael Fister (Uni Kassel; FMF)

Förderkennzeichen 02P16A004

Marcel Schröer, Dr. Mohamed Ayeb, Prof. Ludwig Brabetz (Uni Kassel; FSG)

Förderkennzeichen 02P16A004

| 17. Mai 2021

1	Inhaltsverzeichnis	
2	Einleitung und Zielsetzung	5
2.1	Motivation	5
2.2	Projektkonsortium	6
2.3	Zielsetzung.....	8
3	Stand der Technik.....	9
4	Anforderungen und Spezifikation	18
4.1	Maschinenkonzepte	18
4.2	Wickelschemata und Verschaltung.....	20
4.2.1	<i>Analytischer Grobentwurf für einen beschränkten Bauraum.....</i>	<i>20</i>
4.2.2	<i>Stator- und Wicklungsentwurf.....</i>	<i>21</i>
4.2.3	<i>Rotor- und Käfigentwurf.....</i>	<i>25</i>
4.3	Großserienanforderungen.....	26
4.4	Anforderungen an Wickelverfahren.....	28
4.5	Anforderungen an den Draht	28
5	Fertigungsrelevante Auslegung der Maschinenkonzepte	30
5.1	Wicklungsauslegung	30
5.2	Elektromagnetische Auslegung	34
5.2.1	<i>Analytische Überprüfung.....</i>	<i>34</i>
5.3	Thermische Auslegung.....	38
5.3.1	<i>Thermische Simulation</i>	<i>40</i>
5.3.2	<i>Experimentelle Parameterbestimmung</i>	<i>43</i>
5.4	Fertigbarkeitsuntersuchungen.....	45
6	Entwicklung eines Automatisierungskonzeptes	48
6.1	Definition der Aufgabenstellung	49
6.2	Konzeptentwicklung & Sekundärfunktionen.....	52
6.2.1	<i>Automated Trickle Winding-Prozess.....</i>	<i>57</i>
6.2.2	<i>Kompaktwickelprozess.....</i>	<i>61</i>
6.3	Verpressen von Wicklungen in der Nut.....	64
7	Umsetzung des Fertigungsverfahrens	66
7.1	Detailuntersuchung & Vorversuche	66
7.1.1	<i>Automated Trickle Winding-Prozess.....</i>	<i>66</i>
7.1.2	<i>Kompaktwickelprozess.....</i>	<i>70</i>

7.2	Untersuchung Schnittstellen zu vor- und nachgelagerten Prozessen	70
7.2.1	<i>Design Spulenwickelkopf</i>	70
7.2.2	<i>Isolation zum Blechpaket</i>	72
7.2.3	<i>Wickelkopfisolation</i>	74
7.2.4	<i>Mechanische Fixierung der Spulenisolation</i>	76
7.2.5	<i>Kontaktierverfahren Spulenenenden</i>	76
7.2.6	<i>Imprägnierverfahren</i>	77
7.3	Modulintegration und Prozessparallelisierung.....	77
7.3.1	<i>Automated Trickle Winding-Prozess</i>	77
7.3.2	<i>Kompaktwickelprozess</i>	82
7.4	Inbetriebnahme und Validierung Anlagentechnik.....	83
7.4.1	<i>Automated Trickle Winding-Prozess</i>	83
7.4.2	<i>Kompaktwickelprozess</i>	87
7.5	Integration in Herstellungsprozesskette	89
7.5.1	<i>Kompaktwickelprozess</i>	89
7.6	Untersuchung Referenztechnik Nadelwickeln	90
7.6.1	<i>Voruntersuchungen</i>	90
7.6.2	<i>Umbau der Maschine NWSS am wbk</i>	91
7.6.3	<i>Validierung der CAD/CAM-Schnittstelle</i>	94
7.6.4	<i>Durchführung von Versuchen mit 180°-Drehung</i>	97
7.6.5	<i>Fertigung von Prototypen</i>	97
8	Definition NeWire-Produktdesign und Prototypenaufbau	101
8.1	NeWire Produktdesign.....	101
8.2	Prototypenaufbau.....	102
9	Vermessung und Validierung eines Maschinenprototyps	103
9.1	Vermessung der Prototypen	103
9.1.1	<i>Prüfstands Aufbau</i>	104
9.1.2	<i>Grundlegende Eigenschaften der Prototypen</i>	105
9.1.3	<i>Versuche zur Validierung der Parameter der thermischen Simulation</i>	106
9.1.4	<i>Messreihen zur Verifizierung der Maschinenperformance</i>	107
9.1.5	<i>Betrieb mit oberwellenarmer Spannungsversorgung</i>	109
9.2	Validierung der Simulationsmodelle	110
9.2.1	<i>Thermische Simulation</i>	110

9.2.2	<i>Elektromagnetische Simulation</i>	113
9.3	Optimierung Prozessparameter in der Fertigung.....	117
9.4	Steigerung der Dauerleistung durch eine Ölspritzkühlung	118
10	Fazit und Ausblick	120
11	Abbildungsverzeichnis.....	122
12	Tabellenverzeichnis	128
13	Literaturverzeichnis	129
14	Veröffentlichungen im Rahmen des Projektes NeWire.....	132
15	Anhang.....	133

2 Einleitung und Zielsetzung

2.1 MOTIVATION

Heutzutage werden Elektromotoren bspw. für industrielle Anwendungen in Roboter- oder Werkzeugmaschinenantrieben in großer Serie hergestellt (ca. 5 Mio. Einheiten pro Jahr, vgl. [NPE-10b]). Die Anforderungen für den Einsatz in Automobilen und damit auch die Konstruktion und Produktion der Elektromotoren sehen allerdings im Vergleich dazu deutlich anders aus [NPE-10b] [Shh-11]. Es besteht für diese Anwendungen noch sehr großer Optimierungsbedarf [Shh-11]. Neben den Restriktionen durch begrenzten Bauraum und die engen Gewichtsvorgaben sind die erforderlichen Lebensdauern von mindestens 10 Jahren bei hohen dynamischen Belastungen im Fahrbetrieb mit Beschleunigungen von über 20-facher Erdbeschleunigung über weite Frequenzbereiche sicherzustellen. Darüber hinaus sind Wirkungsgrad, Leistungsdichte und Leistungsgewicht weiter zu optimieren [Shh-11], nicht zuletzt um die Kapazitätsanforderungen und damit das Gewicht der Batterien bei gleicher Reichweite senken zu können.

Die Statorwicklung eines Elektromotors hat einen großen Einfluss auf die Gesamtperformance des Antriebes. Mit ca. 5 kg (entspricht ca. 25 % des Statorgesamtgewichts) hat die Statorwicklung einen großen Einfluss auf das Gesamtgewicht des Motors [Pet-13]. Durch die Reduktion der nicht drehmomenterzeugenden Wickelköpfe kann das Gesamtgewicht des Motors und schließlich auch des Fahrzeugs reduziert werden. Können die Wickelköpfe kleiner ausgeführt werden, kann auch das Gehäuse in axialer Richtung kürzer gebaut werden, wodurch nochmals Bauraum und Gewicht eingespart werden kann.

Jedoch sind Änderungen an der Wicklung nicht ohne eine vorherige, detaillierte Auslegung der elektrischen Maschine möglich. Die elektrische Auslegung der Wicklung ist inhärent mit der elektrischen und thermischen Auslegung des Motors gekoppelt, weswegen bei der Auslegung immer das Gesamtsystem betrachtet werden muss. Hinzu kommt, dass die technisch realisierbaren Komponenten immer Fertigungs- und Montageabweichungen aufweisen, die bei der Auslegung berücksichtigt werden müssen. Für die Auslegung der Statorwicklung bedeutet dies, dass die Anzahl der in den Stator eingebrachten Kupferleiter (Füllgrad), die plastische Deformation der Kupferleiter (Widerstandserhöhung), Länge der Kupferleiter (Kupferverluste) und die Kompaktheit der Wicklung (Wärmeabfuhr) sowie zahlreiche weitere Einflussfaktoren bei der Auslegung berücksichtigt werden müssen.

Die hohe Unsicherheit und Dynamik der Märkte für E-Fahrzeuge [Mue-11] (vgl. Anreiz- und Regulierungsvielfalt (siehe beispielsweise Autosperre der Stadtverwaltung in Peking [Wre-11])) bedingt zusätzlich eine hohe Stückzahlflexibilität sowie Produktflexibilität der eingesetzten Produktionssysteme [NPE-10b], um Investitionsrisiken zu mindern. Bestehende Technologien zur Bewicklung von Statoren können diese Anforderungen nicht zufriedenstellend lösen, weswegen neue Produktionsverfahren zur Herstellung der Statorwicklung benötigt werden, welche sowohl automatisierbar sind, eine hohe Stückzahl- und Produktflexibilität ermöglichen, hohe Füllgrade erzeugen und den Kupferdraht definiert ablegen. Erschwerend kommt in der Automobilindustrie hinzu, dass Arbeitstemperaturbereiche von -40°C im Winter bis ca. 180°C gefordert werden. Dieser weite Temperaturbereich stellt gegenüber stationären Industriemotoren eine neue

Herausforderung an die Elektromotoren in diesem Anwendungssegment dar, welche durch eine gezielte Auslegung und neue Wickeltechnologien gelöst werden kann. Neue Wickeltechnologien können prinzipiell sowohl für vollelektrische als auch hybride Antriebe verwendet werden.

Die Fertigung von hoch performanten Elektromotoren basierend auf Runddrahtwicklungen ist aktuell noch nicht voll automatisiert für eine Großserie abbildbar. Insbesondere im Bereich der gesehenen Asynchronmaschinen erfolgen viele Fertigungsprozesse noch manuell.

2.2 PROJEKTKONSORTIUM

Die Partnerunternehmen bilden einen lückenlosen Ausschnitt der Wertschöpfungskette zur Herstellung von Statorn für Elektromotoren für Fahrzeuge. Der OEM Volkswagen AG kann aufgrund seiner Entwicklungserfahrung die Anwendbarkeit der Ergebnisse im Automobilbau sicherstellen und die Auswirkungen auf weitere Schritte der Prozesskette (wie bspw. auf die Integration der Leistungselektronik und Montage) zu jedem Zeitpunkt einschätzen. Des Weiteren entwickelt Volkswagen technische Demonstratoren in Form von vergleichbaren Statorn (hinsichtlich Wirkungsgrad und Füllfaktor), die durch die betrachteten verschiedenen Verfahren hergestellt wurden. Der Anlagenbauer Aumann GmbH kann hierzu auf ein umfangreiches Technikum mit allen wichtigen Wickelverfahren zurückgreifen. Dadurch wird eine Vergleichbarkeit der Versuche sichergestellt. Durch den Drahthersteller Essex Germany GmbH kann auf Jahrzehnte lange Erfahrung im Bereich der Kupferlackdrahtherstellung zurückgegriffen werden. Die neuesten Erkenntnisse aus der Forschung bringen die Institute FSG und FMF für die Auslegung der elektrischen Maschine mit. Das wbk hat langjährige Erfahrungen im Bereich der Anlagenentwicklung zur Produktionsautomatisierung, unter anderem im Kontext des Elektromaschinenbaus.

Die firmenspezifischen Problemstellungen, die Referenzcharakter für viele Unternehmen der Branche haben, werden im Folgenden erläutert, um daraus das Forschungsziel des Projekts abzuleiten.

Volkswagen:

Der Volkswagen Konzern hat die größte E-Offensive der Automobilindustrie gestartet und investiert hierfür 35 Mrd. Euro. Die Ziele sind im Jahr 2025 weltweit jährlich über eine Million E-Autos zu verkaufen. Außerdem möchte Volkswagen bis 2030 70 reine E-Modelle auf den Markt bringen, sodass in allen Bereichen der E-Mobilität die Entwicklung angetrieben wird. In der E-Mobilität weist der Konzern hohe Erfahrungen in der Entwicklung von elektrischen Maschinen, in der Fertigungsplanung und der Fertigung selbst auf. In der Statorwicklung, die eine hohe Bedeutung in der Fertigung annimmt, ist der Konzern allerdings auf Entwicklungspartner angewiesen, um neue Fertigungsverfahren zu entwickeln und zu etablieren. Im Rahmen des Förderprojekts NeWire liegt der Aufgabenbereich der Komponentenentwicklung in Kassel in der Herstellung und Auslegung der elektrischen Maschinen. (vgl. [Vwn-21]).

Aumann:

Die Aumann Espelkamp GmbH ist ein Standort der Muttergesellschaft, der Aumann AG. Aumann ist weltweit einer der führenden Maschinenbauer für den Automotive Sektor mit

starkem Fokus auf dem Zukunftsmarkt Elektromobilität. Mit mehr als 80 Jahren Erfahrung in der Wickeltechnik gepaart mit 30 Jahren als Partner der OEMs liefert Aumann kundenspezifische Fertigungsanlagen für ein umfangreiches Produktspektrum aus dem konventionellen- und elektrischen Antriebstrang inklusive dem Bereich Energiespeichersysteme. Die Basis bilden etablierte Lösungen aus modularen Maschinen in Kombination mit patentierten Wickel- und Montageverfahren für energieeffiziente Spulen, Elektromotoren und elektromechanische Baugruppen. Durch fundiertes Know-how beherrscht die Aumann AG zusätzlich die Drahtlackier-, Verbindungs-, Umform-, Handhabungs- sowie Messtechnik und liefert erfolgreich Automation für Industrieanwendungen und für den Sektor Verbraucherelektronik. Dabei zeichnet sich Aumann bereits bei der Produktentwicklung als innovativer Partner für Designoptimierung gemeinsam mit dem Kunden aus. So entstehen passgenaue Produktionssysteme mit sicheren Prozessen zur wirtschaftlichen und flexiblen Herstellung und Fertigung von qualitativ hochwertigen Produkten.

Essex Furukawa Magnet Wire:

Essex Furukawa ist seit Oktober 2020 ein globales Joint Venture aus den Firmen Essex Magnet Wire und Furukawa Electric Co. Essex Furukawa ist der führende, globale Anbieter von Kupferlackdraht mit seinen Produktionswerken in Asien, Nordamerika und Europa. Die Produkte von Essex Furukawa werden in den Bereichen Automotive, Energie, Industrie und weiße Ware eingesetzt. Es wird eng mit den jeweiligen Kunden zusammengearbeitet, um hocheffiziente, maßgeschneiderte Lösungen zu entwickeln. Das Produktangebot deckt den gesamten Bedarf von runden und flachen Lackdrähten ab. Im Rahmen des Förderprojekts NeWire liegt der Aufgabenbereich von Essex Furukawa in der Ermittlung und Erfüllung der Anforderungen an den Wickeldraht der E-Maschinen.

Universität Kassel, FG Fahrzeugsysteme und Grundlagen der Elektrotechnik (FSG):

Das Fachgebiet FSG befasst sich in Forschung und Lehre mit Problemstellungen der Elektrotechnik, Elektronik und Mechatronik in Fahrzeugen mit dem Fokus auf Energieeffizienz und -verteilung. Damit ergeben sich u. a. Schwerpunkte im Bereich Optimierung der Regelung und Steuerung von elektrischen Antrieben, Leistungsaktoren und Generatoren, Analyse und Validierung von Bordnetzen, sowie Applikation und Integration von Speichern. Im Rahmen von öffentlichen und industriellen Drittmittelprojekten werden dabei elektrische Maschinen, elektrische Antriebe und Hochvolt-Speicher-Systeme für die Elektrotraktion auf Prüfständen charakterisiert und appliziert. Im Vordergrund stehen dabei Fragen zur effizienten Energienutzung und zum elektromagnetischen, strukturdynamischen und thermischen Verhalten. Das Fachgebiet besitzt eine umfangreiche Prüfstandsausstattung sowie weitgehende Erfahrungen und Kompetenzen im Bereich der FEM-Berechnung, Modellierung, Regelung, Simulation und Testplanung.

Universität Kassel, FG Mechatronik mit dem Schwerpunkt Fahrzeuge (FMF):

Das Fachgebiet FMF gehört zum Institut für Antriebs- und Fahrzeugtechnik und befasst sich mit der Forschung und Lehre im Bereich der Mechatronik mit dem Schwerpunkt Fahrzeugtechnik u.a. im Rahmen von Drittmittelprojekten. Zu den Forschungsthemen gehören die konstruktive Optimierung von mechatronischen Systemen, Steuerungs- und Regelungskonzepte im Bereich des Antriebsstrangs und von Antriebsstrangprüfständen und

elektrische und hybridisierte Antriebsstrangkonzepete. Es stehen hierfür mehrere Prüfstände für Hybrid- und elektrische Antriebsstränge zur Verfügung. Weitere Themen am Fachgebiet sind u.a. Netzwerkmodelle für die Wärmesimulation, FEM-Festigkeitsberechnungen, FEM-Berechnungen von Asynchronmaschinen und Prüfstandserprobungen.

Wbk, Institut für Produktionstechnik:

Das wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) ist mit seinen mehr als 100 Mitarbeitern thematisch in der Fakultät für Maschinenbau angesiedelt. Die drei Bereiche Fertigungs- und Werkstofftechnik, Maschinen, Anlagen und Prozessautomatisierung und Produktionssysteme, die von den Professoren Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer und Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza geleitet werden, widmen sich der anwendungsnahen Forschung, der Lehre und Innovation im Bereich Produktionstechnik am KIT. Neben den Forschungsaktivitäten in den klassischen Feldern des Maschinen- und Anlagenbaus, setzt das wbk auf die Entwicklung der Produktionstechnik für Enabling Technologies, wie beispielsweise Elektromobilität, hybrider Leichtbau und additive Fertigung. Dabei wird zum einen untersucht, wie klassische Produktionstechnologien und -systematiken auf neue Materialien und Werkstoffe übertragen werden können, zum anderen wird das Upscaling von Anlagen und die Gestaltung zukünftiger Fabrikwelten und deren Netzwerke erforscht. Das wbk bietet wissenschaftlichen Mitarbeitern und Studierenden durch die moderne und umfangreiche Sachausstattung ausgezeichnete Rahmenbedingungen für theoretische und experimentelle Forschungsarbeiten mit dem Ziel, das integrative Verständnis von den Prozessen über die Anlagen und Automatisierung bis hin zu vernetzten Fabriken zu vermitteln. Mit Industriepartnern erarbeitet das wbk in gemeinsamen Projekten Lösungen für vielfältige Themenstellungen der Produktionstechnik und entwickelt außerdem mit Blick in die Zukunft Methoden und Prozesse für die Produktion von morgen.

2.3 ZIELSETZUNG

Die hoch performante Maschine, die im Rahmen des Projektes NeWwire entwickelt wurde, soll sowohl wirtschaftlichen als auch den Performance Anforderungen gerecht werden. Es gilt den Spagat zwischen geringen Herstellungskosten mit hoher Performance zu schaffen. In der aktuellen Automobilindustrie herrscht ein sehr starker Kostendruck, gleichzeitig sind in der aktuellen Serienproduktion teilweise noch viele Handarbeitsplätze vorzufinden. Die Automatisierung dieser händischen Prozesse können die Kosten verringern. Auch durch einen geringeren Verschaltungsaufwand von elektrischen Leitern im Stator sollen die Prozesszeiten verringert werden. Außerdem soll die Kostensenkung durch eine serienflexible Linie umgesetzt werden. Des Weiteren soll mit geringerem Materialeinsatz kostengünstiger produziert werden. Die NeWwire Maschine soll eine Asynchronmaschine sein, sodass keine seltenen Erden, deren Kosten stetig steigen [Fra-21], in dem Rotor verbaut werden müssen.

Die Anforderungen im Performance-Bereich sollen mit einer Erhöhung von bis zu 30 % des Füllgrades in der Statornut gegenüber des Einziehverfahrens erreicht werden. Die Leistungsdichte soll mit geringerem Kupfereinsatz erhöht werden. Bei der Einziehtechnik entstehen prozessbedingt größerer Wickelköpfe, die zu einer unnötigen Gewichtserhöhung und mehr benötigten Bauraum führen. Außerdem soll durch das NeWwire-Verfahren ein definiertes Wickelbild erstellt werden, welches zu einer Qualitätssteigerung führt.

Um einen Beitrag zu diesen Zielen zu leisten, werden im Rahmen des Forschungsprojektes „NeWire“ die Elektromotoren-Entwicklung und -Fertigung im Hinblick auf diese Kriterien optimiert.

3 Stand der Technik

Drehstrommaschinen

Die für Kraftfahrzeuge geeigneten Drehstrommaschinen basieren auf einem elektrischen Drehfeld, das durch einen dreiphasigen Wechselstrom (Drehstrom) hervorgerufen wird. Der Aufbau des Stators ist bei Asynchron- und Synchronmaschinen prinzipiell gleich. Der Ständer besteht dabei aus einem Blechpaket, in dessen Nuten die Drehstromwicklungen eingelegt werden. Auf Grund der Phasenverschiebung der Wechselströme in den drei Wicklungen entsteht ein magnetisches Drehfeld, dem der Rotor folgt [Hof-10].

Die häufigste Bauform der Synchronmaschine ist die **permanenterregte Synchronmaschine** (PSM). In modernen E-Fahrzeugen wird fast ausschließlich dieser Maschinentyp eingesetzt [Hof-10]. 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 (sogenannte vergrabene Magnete) des Rotorblechpakets eingeschoben. Vorteile der permanenterregten Synchronmaschine sind ihr sehr hoher Wirkungsgrad von bis zu 95 % [Fue.17], der einfache und wartungsarme Aufbau ohne Schleifkontakte oder Bürsten sowie ihre sehr hohe Leistungsdichte. Nachteilig sind der abnehmende Wirkungsgrad bei hohen Drehzahlen (Feldschwächbetrieb) und im Teillastbereich sowie die Abhängigkeit von seltenen Erden wie Neodym.

Aufgrund dieser Nachteile stellt die Asynchronmaschine eine ressourcenschonende Alternative zur PMSM mit hohem Potenzial dar. Diese ist aufgrund ihres denkbar einfachen Aufbaus sehr billig und robust und bedarf praktisch keiner Wartung [Spr-09]. Sie bestehen im Stator aus der bereits bekannten Drehstromwicklung und im Rotor typischerweise aus einem elektrisch leitfähigen Käfig aus Kupfer oder Aluminium. Der Aufbau einer Asynchronmaschine ist in Abbildung 1: Längsschnitt einer ASM (links), Käfigläufer und unterschiedliche Käfige (rechts) [Par-08] dargestellt. Beim Käfigläufer liegt in jeder Nut des Rotor-Blechpakets ein Aluminium oder Kupferstab, wobei alle Käfig-Stäbe an den Läuferenden durch sogenannte Kurzschlussringe miteinander verbunden sind [Par-08].

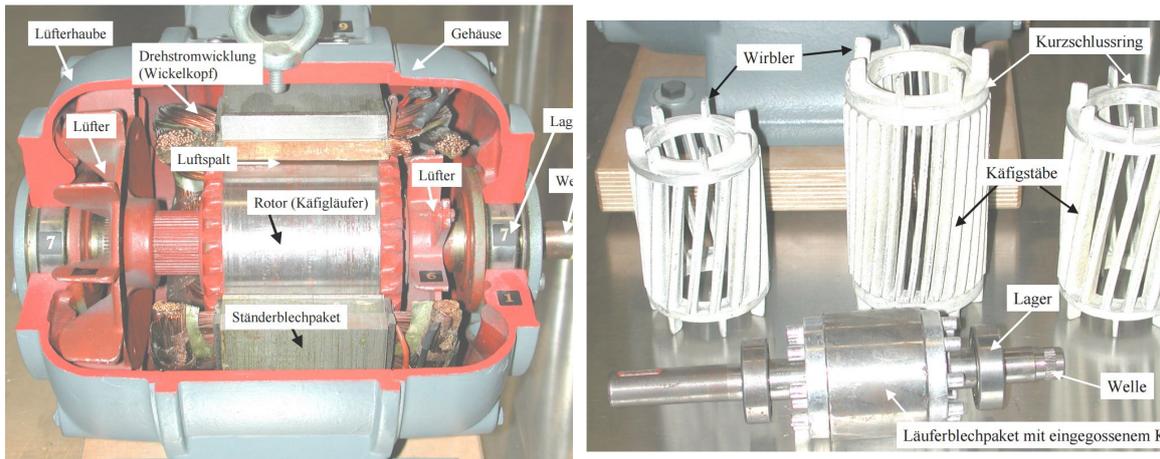


Abbildung 1: Längsschnitt einer ASM (links), Käfigläufer und unterschiedliche Käfige (rechts) [Par-o8]

Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer allgemeinen Drehfeldmaschine, in deren Stator sich drei um 120° verdrehte Wicklungen befinden. Wird eine Phasenverschiebung zwischen dem magnetischen Drehfeld des Stators und des Rotors angelegt, so entsteht im Luftspalt der Maschine ein umlaufender magnetischer Fluss, welcher eine Drehung des Rotors und damit eine Kraftwirkung erzielt [Sch-15]

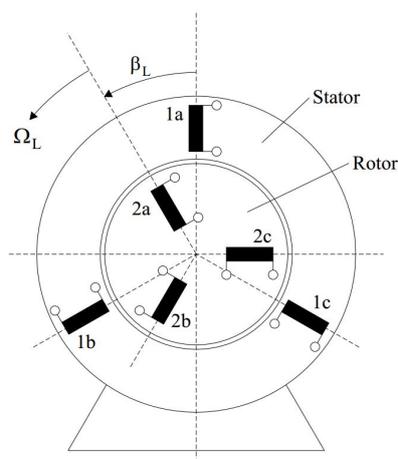


Abbildung 2: Prinzipdarstellung einer Drehfeldmaschine [Sch-15]

Dreht sich der Rotor synchron mit dem umlaufenden Magnetfeld, so wird die Induktion im Rotor zu Null, und es entsteht folglich auch kein Drehmoment. Damit die Drehfeldasynchronmaschine ein Drehmoment entwickelt, ist, im Gegensatz zur Synchronmaschine, ein asynchroner Umlauf von Magnetfeld und Rotor der Maschine notwendig [Sch-15]. Diese Verschiebung der Phasen zwischen dem Feld des Rotors und des Stators wird als Schlupf bezeichnet und führt dazu, dass der Rotor sich immer etwas zeitlich versetzt zum Statorfeld dreht. Aufgrund der Rotation des Statorfeldes wird ein Strom im Käfig des Rotors bzw. den kommutierten Spulen induziert. Diese Induktion führt zu einem elektrischen Stromfluss, welcher wiederum ein Magnetfeld erzeugt. Ist das magnetische Feld aufgebaut, so führt die Wechselwirkung von magnetischem Feld des Rotors und dem Strom der Statorwicklungen

zu einer Lorentzkraft. Diese resultiert, analog zu den restlichen Motorprinzipien, in einem Drehmoment des Rotors. Aufgrund der ständigen Induktion in den Rotor erreicht die Drehstromasynchronmaschine vergleichsweise niedrigere Wirkungsgrade als die Synchronmaschine und muss generell zumindest passiv gekühlt werden. [Hag-16]

Dennoch ist sie aufgrund ihres einfacheren Aufbaus für eine Vielzahl von Anwendungen geeignet und kostengünstig. Typische Anwendungen reichen von Industrieantrieben, über Fahrtriebe wie in der Straßenbahn oder dem Aufzug bis hin zu Kleinstmotoren in der Medizintechnik mit Drehzahlen über 300.000 U/min.

Einflüsse auf den Wirkungsgrad

Es besteht eine Vielzahl von Einflussfaktoren, die die späteren Eigenschaften eines Elektromotors und dessen wirtschaftliche Produktion beeinflussen. Um einen Elektromotor zu optimieren, besteht vor allem in der Verringerung der Verlustleistungen noch ein hohes Potential zur Erhöhung des Wirkungsgrades. Wie in Abbildung 3 zu erkennen, gibt es vor allem in der Verringerung der Kupfer-(Stromwärme-)Verluste noch ein großes Potential. Um dieses Potential auszuschöpfen muss der Motor sowohl auslegungs- als auch fertigungstechnisch optimal aufeinander abgestimmt sein.

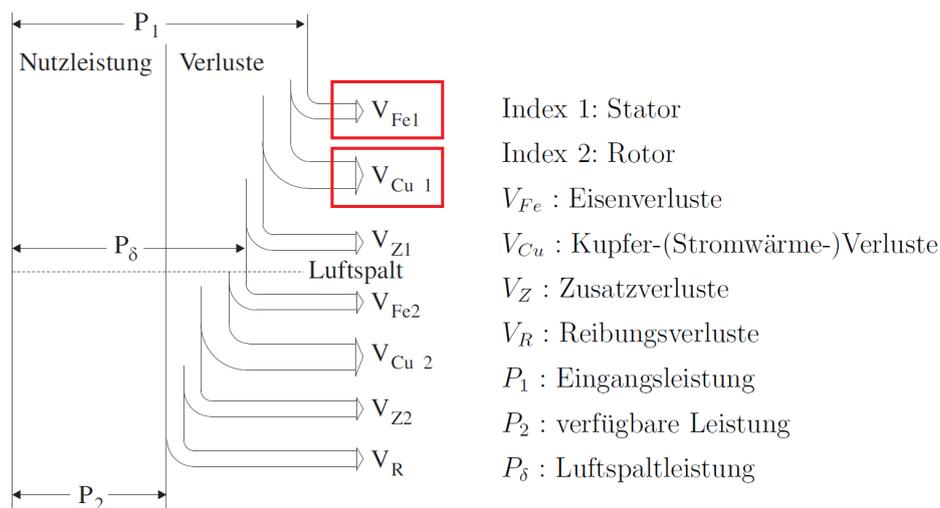


Abbildung 3: Leistungsfluss durch einen Motor [Sch-07]

Im Vorfeld der Produktion eines Motors müssen also entsprechend alle Bereiche beleuchtet werden. Der Fokus dieses Vorhabens liegt daher nicht nur auf dem Einfluss der Fertigungsverfahren sondern auch auf dem Zusammenspiel zwischen Auslegung und Fertigung, beispielsweise durch die Entwicklung neuartiger Kühlkonzepte.

Auslegung Elektromotor

Bei der Auslegung einer elektrischen Maschine erfolgt in der Regel eine elektromagnetische Optimierung hinsichtlich der Zielgrößen Wirkungsgrad und Leistung unter Berücksichtigung thermischer und strukturdynamischer Randbedingungen sowie einer meist materialbezogenen Kostenfunktion. Hierfür stehen neben bekannten Konzepten und Erfahrungen analytische und vor allem FEM basierte Simulationswerkzeuge zur Verfügung, welche mitt-

lerweile die physikalische Realität mit hoher Güte abbilden. Dabei gibt es domänenspezifische wie auch multiphysics-Tools. Aufgrund der Form und Symmetrie der elektrischen Maschine wird häufig lediglich ein Teil in 2D simuliert, während die ungleich rechenaufwendigeren 3D Berechnungen meist nur für komplexere Geometrien wie den Wickelkopf angewandt werden. Der Entwicklungsprozess ist meist ausschließlich designgetrieben, d.h. nach einer a priori Festlegung eines Prozesses, z.B. einer Wicklungsart und ihrer Parameter, erfolgt keine weitere Berücksichtigung der Fertigung. Abweichend davon ist die Richtung des im Projekt NeWwire vorgeschlagenen Vorgehens invers, da das Maschinenkonzept fertigungsgetrieben ist und iterativ Fertigungsparameter und Maschinenauslegung optimiert werden. Zudem werden fertigungstypische Vorgaben wie z.B. Unsicherheiten hinsichtlich Leitungsposition und -führung oder Toleranzen zu berücksichtigen sein ([Bach-15], [Daja-13], [May-07], [Neu-15]).

Der Auslegungsprozess und die Fertigungstechnologie bedingen sich gegenseitig in hohem Maße. Eine optimale Auslegung der E-Maschine kann nur unter Berücksichtigung des Fertigungsprozesses erfolgen.

Produktionsprozess Elektromotor

Der Produktionsprozess eines Elektromotors lässt sich entsprechend seines Aufbaus in drei wesentliche Teilschritte aufteilen: Herstellung des Stators, Herstellung des Rotors und Endmontage. Der Fokus von NeWwire liegt auf der Prozesskette zur Herstellung der Statorwicklung. Ausgehend vom Kupferlackdraht, dessen Herstellung ebenfalls Gegenstand der Arbeiten in NeWwire ist, wird die Wicklung erst erzeugt und anschließend montiert.

Drahtherstellung

Generell unterscheiden sich elektrische Leiter für die Wickeltechnik neben dem Material nur durch deren Geometrie. Im Kern des Leiters ist der Blankdraht, welcher aus verschiedenen Werkstoffen (typischerweise Kupfer oder Aluminium) bestehen kann. Der Blankdraht wird optional mit einem Primer behandelt. Darüber wird ein Grundlack zur elektrischen Isolation aufgebracht. Nach dem Grundlack werden eine optionale Funktionsschicht (engl. Overcoat) sowie für Runddrähte ein Gleitmittel aufgetragen. Bei Flachdraht ist der Gleitmittelauftrag optional. Der resultierende Drahtaufbau ist in Abbildung 4 zu erkennen. [Hag-16]

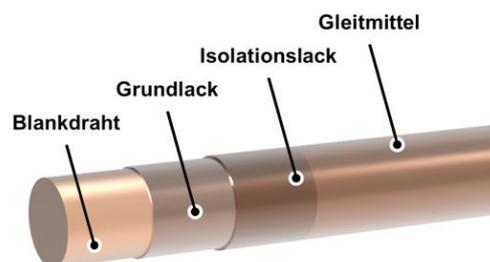


Abbildung 4: Aufbau eines Leiters für Wickelgüter [Hag-16]

Die Leiter können verschiedene Querschnittsformen und verschiedene Durchmesser aufweisen. Die häufigste Verwendung haben, neben runden Querschnitten, Leiter mit einem

rechteckigen Querschnitt. Die Prozessschritte zur Herstellung von Kupferlackdraht lassen sich in die Schritte „Umformen“, „Weichglühen“, „Reinigen“, „Isolationsschicht aufbringen“, „Funktionsschicht aufbringen“, „Aushärtung“, „Aufspulen“ unterteilen, welche in Abbildung 5 dargestellt sind. [Hag-16]

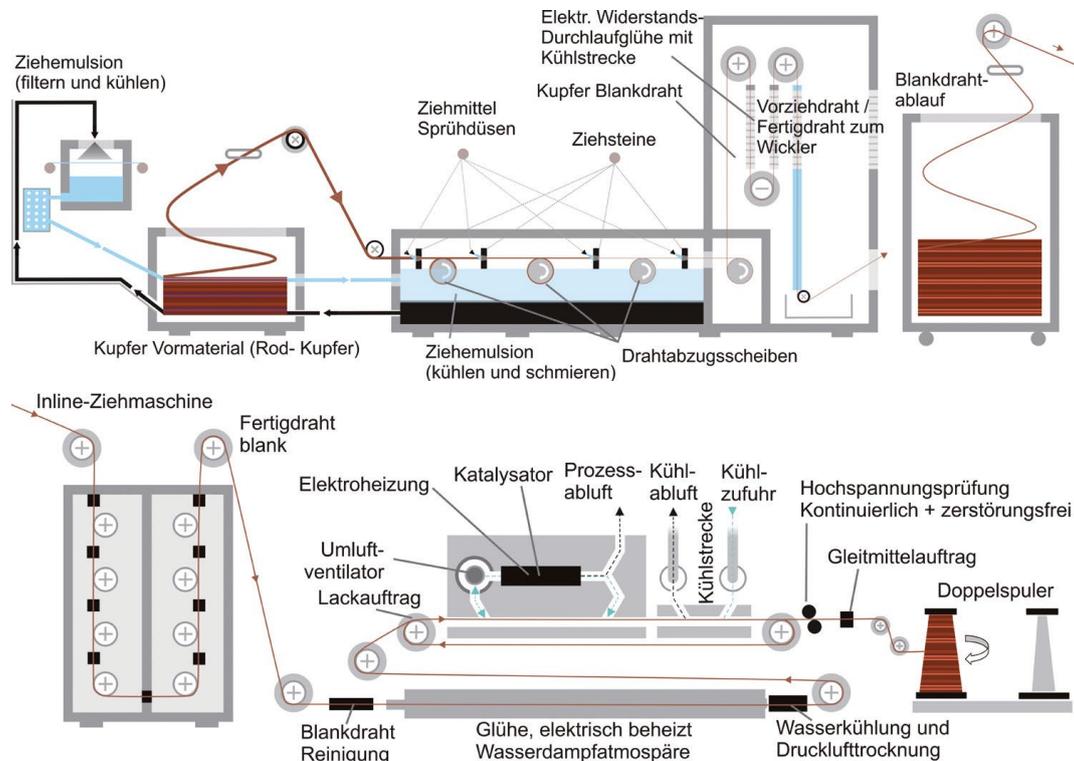


Abbildung 5: Prozesskette zur Herstellung von Kupferlackdraht [Hag-16]

Die Produktion eines an das Wickelverfahren angepassten Kupferlackdrahts wurde im Projekt HeP-E untersucht. Der Fokus der Untersuchungen lag auf der Herstellung einer angepassten Gleitschicht und der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften für das Einzziehverfahren. [Bec-11]

Zur Herstellung von Drähten mit variablen, sich im Querschnitt ändernden Profilen gibt es nach dem Stand der Technik bislang keine Lösung zur Anwendung für kontinuierliche Wickelverfahren.

In dem Verbundprojekt HeP-E wurde über Drähte mit sich ändernder Isolationszunahme diskutiert. Der Vorteil dieser Drähte läge in einer guten Isolierung der Wickelköpfe bei einer gleichzeitigen Erhöhung der Kupferfüllfaktoren in den Wickelnuten durch eine reduzierte Drahtisolierung. Auf Phasenisolierungen könnten ggf. verzichtet werden. Im Rahmen des Verbundprojektes wurde eine Machbarkeitsbetrachtung solcher Drähte durchgeführt, die zu dem Schluss kam, dass die geforderten Toleranzen in Verbindung mit dem in dem Projekt gewählten Wickelverfahren, nicht realisierbar sind. Zum einen können bei der Drahtherstellung die Übergänge der unterschiedlichen Dicken aufgrund der kontinuierlichen Drahtfertigung nicht auf wenige Millimeter genau eingehalten werden. Zudem besteht ein nicht zu unterschätzendes Risiko, in Abhängigkeit des gewählten Wickelverfahrens, dass Bereiche mit reduzierter Isolierung in Bereiche mit hohen Spannungspotentialen gelangen.

Für das automatisierte Träufelwickeln existieren ebenfalls keine angepassten Drähte, weshalb die Werkzeugentwicklung für einen solchen, an den Träufelwickelprozess angepassten, Draht ein zentraler Punkt im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ist.

Herstellung der Statorwicklung

Zur Fertigung der Wicklung einer elektrischen Maschine haben sich unterschiedliche Wickeltechnologien etabliert. Dabei kann in erster Linie zwischen direkten und indirekten Wickeltechnologien unterschieden werden. Bei den direkten Wickelverfahren (Linear-, Nadel- und Flyerwickeln) wird der Draht direkt auf den Spulenkörper (bei Einzelzähnen) bzw. den Vollblechschnittstator aufgebracht. Die Spulenherstellung ist laut DIN 8590 als Fertigungsverfahren Fügen durch Umformen einzuordnen. Bei den indirekten Wickelprozessen (Einziehtechnik und Träufelwickeln) wird der Draht hingegen zuerst auf einer Schablone (oder auch direkt auf das Einzieh-/Einbringwerkzeug) gewickelt, bevor er als Spule in den Vollblechschnittstator eingebracht wird. Bei diesen Prozessen ist immer ein vorgelagerter Verfahrensschritt zur Spulenherstellung vor dem Montageschritt notwendig, weshalb die indirekte Wicklungsherstellung als Prozess bezeichnet werden kann. [Hag-16]

Die Wickelverfahren können außerdem hinsichtlich der unterschiedlichsten Eigenschaften bewertet und verglichen werden. Die herstellbaren Wicklungsarten, realisierbaren Zykluszeiten und verarbeitbaren Drahtdurchmesser sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Vergleich der Wickelverfahren nach [Hag-16]. Konz. W. = Konzentrierte Wicklung, Vert. W. = Verteilte Wicklung

	Linearwickeln	Nadelwickeln	Flyerwickeln	Einziehverfahren	Manuelles Träufelwickeln
Max. Geschwindigkeit [Windungen/min]	30.000	2.500	12.000	-	-
Max. Drahtdurchmesser	5 mm	2,5 mm	2,5 mm	2 mm	5 mm
Verarbeitung Profildraht	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja
Erzeugbares Wickelschema	Ortho-zyklisch	Ortho-zyklisch	Ortho-zyklisch	Wilde Wicklung	Ortho-zyklisch
Theoretisch erzeugbarer mechanischer Füllfaktor	90,1%	90,1%	90,1%	60%	90,1%
Wicklungstypen	Konz. W.	Konz. W, Vert. W.	Konz. W, Vert. W.	Vert. W.	Vert. W.
Drahtbeanspruchung	Gering	Hoch	Mittel	Hoch	Gering
Investitionskosten	Gering	Mittel	Mittel	Hoch	Gering
Automatisierungsgrad	Hoch	Hoch	Hoch	Mittel	Manuell

In der Mittel- und Großserienfertigung von Statorn elektrischer Maschinen sind das Einziehverfahren, das Nadelwickeln, das Linearwickeln und Flyerwickeln etablierte Verfahren. Zur Herstellung einer verteilten, oberwellenarmen Statorwicklung haben sich im Automotive-Sektor besonders das Einziehverfahren und das Nadelwickeln bewährt. Die einzelnen Verfahren werden im Folgenden kurz dargestellt.

Beim **Einziehverfahren** wird die Wicklung entweder auf einem Schablonenwickler vorgefertigt und dann auf das Einziehwerkzeug übertragen oder sie wird direkt über einen Flyerwickler auf das Werkzeug aufgewickelt (siehe Abbildung 6).

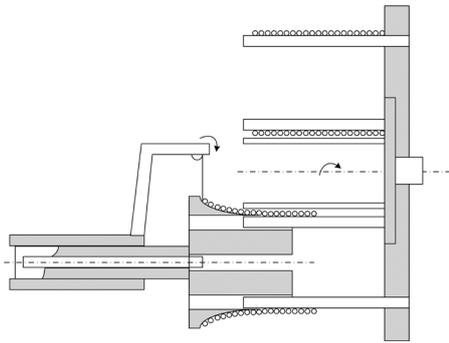


Abbildung 6: Vorbereitung der Wicklung Bild (l.) nach [Tzs-90]; Einziehen der Wicklung (Bildquelle (r.): Otto Rist GmbH)

Im Anschluss daran wird die Wicklung über das Werkzeug in insgesamt drei Phasen in die Statornuten eingebracht (Abbildung 7). Zunächst erfolgt das Eindringen des Werkzeugs in den Stator. Anschließend erfolgt das Ausfahren des Einziehpilzes zur Einbringung der Spule in die Nut. Nach erfolgreichem Eintritt der Drähte in die Nut wird ein Deckschieber nachgeschoben, der ein Herausdrängen der Drähte aus der Nut nach dem Herausfahren des Einziehwerkzeuges verhindern soll. Abschließend wird die Spule fertig eingezogen. [Hag-16]

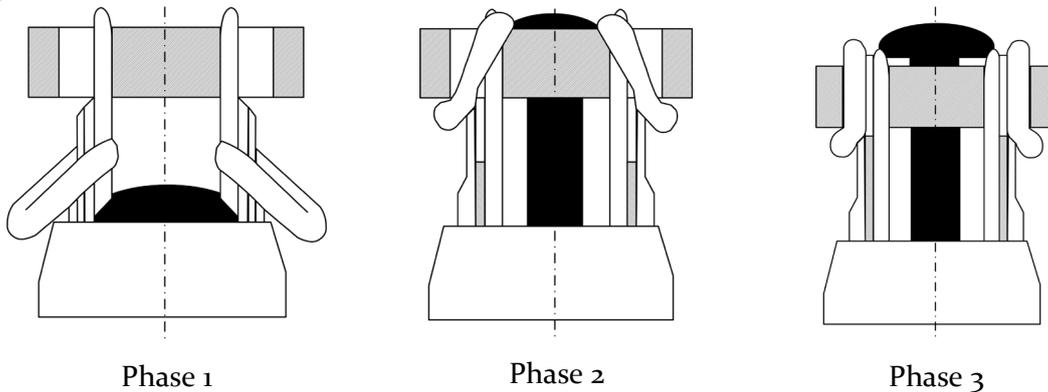


Abbildung 7: Einziehen der Wicklung in die Statornut [Tzs-90]

Das Einziehverfahren weist vergleichsweise geringe Prozesszeiten für die Einbringung der Spulen in den Stator auf. Dieser Zeitvorteil gegenüber den anderen Verfahren wird jedoch durch den einhergehenden hohen Verlegungs- und Verschaltungsaufwand wieder stark eingeschränkt. Außerdem ist das Einziehverfahren auf Runddrähte mit mittlerem Durchmesser beschränkt [Tzs-90].

Demgegenüber steht das **Nadelwickelverfahren**, welches die Verlegung und Verschaltung der Spulen aufgrund der dauerhaften Führung des Drahtes einfach erlaubt [Ste-14]. Der Begriff Nadelwickeltechnik leitet sich aus dem Geometrieaufbau des Drahtführers bzw. dem der Düse ab. Der Drahtführer, der wie eine Nadel wirkt, fährt den kompletten Verlegeweg direkt am Spulenkörper ab und weist damit den hauptsächlichen Unterschied zu anderen Wickelverfahren auf. Der Spulenkörper ist bei diesem Wickelverfahren fest eingespannt. Um den Draht im Nutschlitz abzulegen, wird die Nadel in einem Winkel von 90° entlang

des Nutschlitzes bewegt. Am Wendepunkt ist jedoch eine rotatorische Bewegung des Spulenkörpers notwendig, um die Reversierbewegung der Nadel zu ermöglichen (vgl. Abbildung 8). Daher ist die Aufspannung, welche den Spulenkörper trägt, drehbar. Soll eine verteilte Wicklung entstehen, müssen zusätzlich Deckscheiben mit Drahtführungselementen an den Stirnseiten des Stators montiert oder eine komplexere Verfahrensvariante eingesetzt werden. [Fel-14] [Diss JaH]. Das Nadelwickeln ist jedoch im Allgemeinen für die Verarbeitung von Profildrähten und großer Drahtdurchmesser ungeeignet.

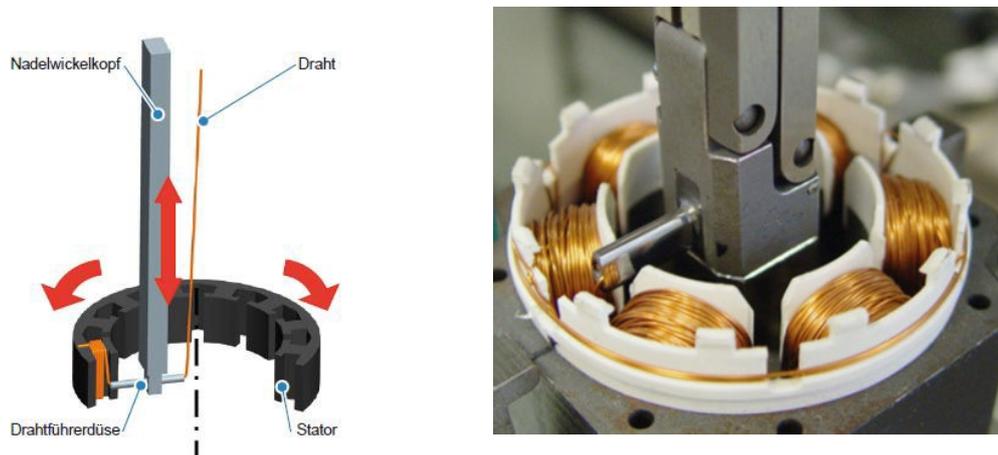


Abbildung 8: Aufbau des Nadelwickelverfahrens [Fel-14], [Hag-16]

Für dünne Drähte und zur Herstellung von verteilten Wicklungen wird häufig das **Flyerwickeln** eingesetzt. Durch eine zusätzliche Kinematik ist das Verschalten der Spulen auch beim Flyerwickeln möglich, jedoch auf dünne Drähte beschränkt [Fel-14]. Eine durch **das Linearwickeln** hergestellte Zahnspule weist gegenüber den anderen Verfahren einen besonders hohen Füllfaktor auf. Auch lassen sich mit dem Linearwickeln Drahtdurchmesser bis 5 mm verarbeiten. Allerdings sind die durch das Linearwickeln herstellbaren Einzelzahnwicklungen nur für Synchronmotoren geeignet und müssen in einem dem Wickelprozess nachgelagerten Prozess zu einem Stator montiert werden, sodass erst dann eine Verschaltung erfolgen kann.

Für Kleinstserien und variantenreiche Elektromotoren wird häufig das manuelle Einlegen der Wicklung in die Statornuten, das sogenannte Träufelwickelverfahren angewendet. Die Spulen werden dabei, wie in Abbildung 9 zu sehen, auf einer Schablone vorgefertigt. Dabei muss beim Herunternehmen der Spulen von der Schablone besonders vorsichtig vorgegangen werden, um die Ordnung der Spulen nicht durcheinander zu bringen und so einen späteren Kurzschluss herbeizuführen.



Abbildung 9: Herstellung eines Spulenstranges auf einer Schablone [Hag-16]

Das manuelle Verfahren eignet sich insbesondere für verteilte Wicklungen und Mehrschichtwicklungen sowie für einen großen Drahtdurchmesserbereich. Dabei ergeben sich durch die manuelle Handhabung optimale Füllfaktoren mit einem kompakten Wickelkopf [Mül-08].



Abbildung 10: Verwendung von Hilfswerkzeugen zur Wicklungseinbringung: Holzkeil [Hag-16]

Bei der Träufelwicklung kommt es insbesondere darauf an, dass die Drähte geordnet gegriffen und der gleiche Teilleiter auf beiden Seiten des Stators gleichzeitig eingelegt wird. Dieser Prozess erfordert ein hohes Maß an motorischen Fähigkeiten und kann durch das händische Einlegen sehr gut abgebildet werden (s. Abbildung 10). Stand der Technik ist eine manuelle Durchführung dieses Prozesses.

Wie in Tabelle 2 gezeigt, kann das ideale Wickelverfahren ein breites Spektrum an Drahtdurchmessern verarbeiten, weist eine geringe Zykluszeit und einen geringen Verschaltungsaufwand (Drähte werden im Wickelprozess definiert abgelegt und können einfach kontaktiert werden) auf, eignet sich für einen geordneten Lagenaufbau und Mehrdrahtverlegung in der Nut, kann verteilte Wicklungen und Mehrschichtwicklungen sowie Einzelzahnwicklungen herstellen und führt zu einem geringen Wickelkopf sowie einem hohen Füllfaktor bei dennoch geringen Drahtbelastungen.

Tabelle 2: Vergleich der Wickelverfahren für verteilte Wicklungen nach [Hag-16]

	Einziehverfahren	Nadelwickeln	Manuelles Träufelwickeln	Ideales Verfahren
Max. Drahtdurchmesser	⊖	⊖	⊕⊕	⊕⊕
Verarbeitung Profildraht	⊖⊖	⊖⊖	⊕⊕	⊕⊕
Erzeugbares Wickelschema	⊖⊖	⊕	⊕⊕	⊕⊕
Theoretisch erzeugbarer mechanischer Füllfaktor	⊖⊖	⊕	⊕⊕	⊕⊕
Drahtbeanspruchung	⊖⊖	⊖⊖	⊕⊕	⊕⊕
Zykluszeit	⊕⊕	⊖	⊖⊖	⊕⊕
Automatisierungsgrad	⊕⊕	⊕⊕	⊖⊖	⊕⊕
Anforderung: technisch, wirtschaftlich				
Legende: ⊕⊕ = sehr gut; ⊕ = gut ⊖ = mäßig ⊖⊖ = schlecht; ⊖⊖ = sehr schlecht				

Von den existierenden automatisierten Wickelverfahren kann keines alle Kriterien zufriedenstellend erfüllen. Wie aus Tabelle 2 ersichtlich wird, ist das manuelle Träufelwickelverfahren das einzige, das alle hier definierten technischen Anforderungen an das ideale Wickelverfahren erfüllt. Allerdings ist es aufgrund der manuellen Tätigkeit zum aktuellen Zeitpunkt nicht großserientauglich. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist daher die Entwicklung eines automatisierten Träufelwickelverfahrens und Erfüllung der technischen sowie wirtschaftlichen Anforderungen.

4 Anforderungen und Spezifikation

4.1 MASCHINENKONZEPTE

Das Projektziel ist die Dimensionierung einer hoch performanten Asynchronmaschine, die gleichzeitig durch einen hohen Automatisierungsgrad für den Einsatz in der Großserie geeignet ist.

Um eine realitätsnahe Maschine in diesem Projekt zu entwickeln, wurden für die NeWwire-Maschine Anforderungen definiert, die vergleichbar mit Anforderungen einiger bereits existierender Antriebe bei Volkswagen sind. Die nachfolgende Tabelle 3 beinhaltet hierbei die wichtigsten Kriterien und Auslegungsmerkmale.

Tabelle 3: Anforderung an den Hochleistungs- und Hochdrehzahl-Traktionsantrieb

Bemessungswerte	Symbol	Wert	Einheit
Außendurchmesser Stator	D_{a1}	210	[mm]
Innendurchmesser Rotor	D_{i2}	48	[mm]
Axiale Gesamtlänge	L_{Ges}	< 205	[mm]
Maximale Drehzahl	n_{max}	16.000	[min ⁻¹]
Maximales Drehmoment im Grundstellbereich	M_{S2}	≥ 155.4	[Nm]
Maximale Leistung bei maximaler Drehzahl	P_{S2}	≥ 88.8	[kW]
Dauerleistung	P_{S1}	≥ 22,2	[kW]
Nominale Zwischenkreisspannung	U_D	334	[V]
Effektivwert der Grundschiwingung der Klemmspannung	$U_{LL} = U_{N, Str}$	215	[V]
Effektivwert der Grundschiwingung des Phasenstrom	I_N	< 450	[A]

Prinzipbedingt reagieren Asynchronmaschinen in Kurzschlussläufer-Ausführung wesentlich anfälliger auf Oberwelleneinflüsse als permanentmagneterregte Synchronmaschinen. Die niederpolige Ausführung der Asynchronmaschinen und die damit verbundene große Polteilung τ_p erfordern einen möglichst kleinen Luftspalt δ , um eine ausreichend große Hauptreaktanz $X_h \sim \tau_p / \delta$ sicherzustellen. Der schmal ausgeführte Luftspalt begünstigt jedoch die Anfälligkeit für Oberwelleneinflüsse [Bin-16].

Bei symmetrischen, dreisträngigen, verteilten Drehfeldwicklungen treten neben der Grundwelle weitere unerwünschte Induktionsoberwellen der Ordnungszahl $v = 6k \pm 1$ mit $k = 1, 2, 3, \dots$ auf. Diese Oberwellen erzeugen parasitäre Oberwellenmomente, welche das Betriebsverhalten verschlechtern und zusätzliche Verluste sowie Schwingungen und Geräusche erzeugen [Mue-05].

Daher wurde die vorliegende Asynchronmaschine als gesehnte Zweischichtwicklung ausgeführt. Durch eine Sehnung mit einer Spulenweite von $5/6$ werden die dominierenden Oberwellen stärker unterdrückt.

Zur Sicherstellung einer wirtschaftlichen Großserienfähigkeit wird die Maschine in Dreieckschaltung betrieben. Dadurch entfällt der (händische) Prozess des Sternpunktkontaktierens, gleichzeitig reduziert sich die (einseitige) axiale Wickelkopfausdehnung, sodass außerdem Verluste minimiert werden und zusätzlich eine höhere Ausnutzung des Bauraums ermöglicht wird.

Hierbei ist zu beachten, dass Sättigungsharmonische in allen drei Strängen gleichphasige Spannungen induzieren. Da diese Spannungen kein Drehsystem bilden (sog. Nullsystem)

und durch die Dreieckschaltung kurzgeschlossen werden, bilden sich Kreisströme aus, welche zusätzliche Verluste hervorrufen können [Mue-07][Mue-20].

Die Statorwicklungen werden aus Runddrähten gefertigt und thermisch nach Wärme-klasse H (180°C Grenztemperatur) ausgenutzt. Der Rotor wird mittels Druckgussverfahren als (Einfach-)Käfiginnenläufer mit tropfenförmigen Stabquerschnitt ausgeführt. Hierbei wird Kupfer (CU-ETP1) statt des preiswerteren Aluminiums als Gussmaterial verwendet. Kupfer bietet im Vergleich zu Aluminium eine bessere elektrische Leitfähigkeit und daher weniger Stromwärmeverluste, eine höhere mechanische Festigkeit und bessere thermische Eigenschaften (bezogen auf die Wärmekapazität und -leitfähigkeit).

4.2 WICKELSCHEMATA UND VERSCHALTUNG

Die Ermittlung der Hauptabmessungen elektrischer Maschinen erfolgt üblicherweise anhand analytischer Näherungen, welche auf Erfahrungswerte und empirischen Gleichungen beruhen. In einschlägigen Fachliteraturen wie bspw. [Mue-07] und [Mue-20] wird eine freie Dimensionierung für netzgespeiste, stationäre Anwendungen für einen speziellen Betriebspunkt beschrieben. Daher können die verfassten Entwurfs- und Berechnungsgänge nur begrenzt für die vorliegende umrichter- gespeiste Traktionsmaschine und den geforderten Überlast- und Drehzahlstellbereich bei beschränktem Bauraum Anwendung finden. Im Vordergrund der Auslegung steht die Maximierung der Leistung für den vorgegebenen Bauraum unter Einhaltung der Spezifikation.

4.2.1 Analytischer Grobentwurf für einen beschränkten Bauraum

Um dem Anspruch eines Hochdrehzahlantriebs gerecht zu werden, soll die Maschine vierpolig ausgeführt werden. Eine zweipolige Ausführung hätte zur Folge, dass sich die Statorjoch-Abmessungen h_{joke} sowie die Spulenweiten und damit die axiale Wicklungskopfausdehnung l_{wk} verdoppeln (siehe Formel 1). Die überwiegende axiale Bauraumlänge würde somit aus Wickelkopf statt aus drehmomentbildenden Blechpaketen bestehen.

Laut [Fin-11] ergibt sich analytisch ein von den Stator- und Rotorabmessungen abhängiger Drehmomentverlauf (vgl. Abbildung 11), welcher Aufschluss über den Rotorausendurchmesser D_{a2} liefert.

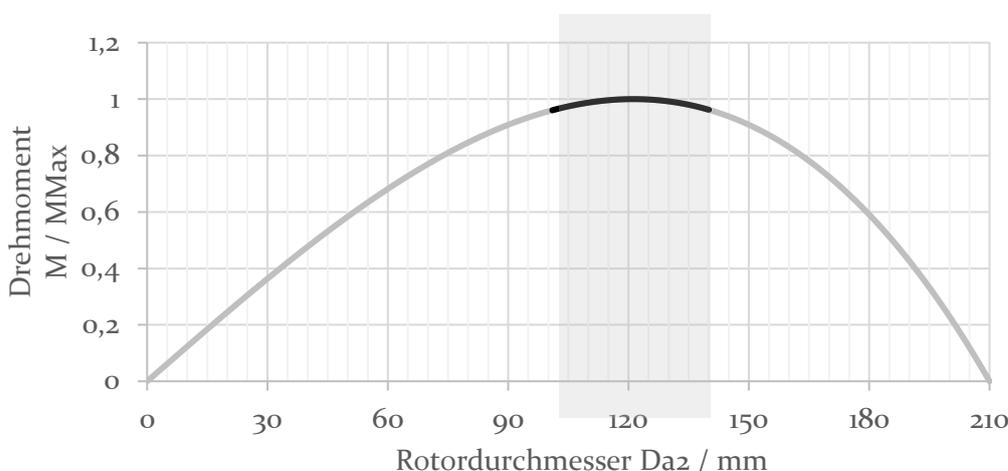


Abbildung 11: Normiertes Drehmoment über den Rotorausendurchmesser D_{a2} für einen Statorausendurchmesser $D_{a1} = 210$ mm

Anhand des Rotorausendurchmessers D_{a2} lassen sich erste Abmessungen zum Statorjoch h_{Joke} treffen.

$$h_{Joke} = \frac{D_{a1} - D_{a2}}{4} \approx 17,5 \dots 22,5 \text{ mm} \quad \text{Formel 1}$$

Die gewählten Abmessungen entsprechen den Richtwerten für relative Rückenhöhen im Verhältnis zur Polteilung τ_p von 0,13...0,28 nach [Mue-07]. Da der untere Grenzwert sich an niedrige Polpaarzahlen richtet, wird zunächst in Abbildung 11 der Bereich für den Bohrungsdurchmesser zwischen 120 mm und 140 mm betrachtet.

$$\frac{h_{Joke}}{\tau_p} = \frac{h_{Joke} \cdot 2p}{D_{a2} \cdot \pi} \approx 0,16 \dots 0,24 \quad \text{Formel 2}$$

Mit dem mittleren Nutdurchmesser $D_{Slot, Center}$, der vorgegriffenen Lochzahl q (siehe Abbildung 13) und dem (verkürzten) Wicklungsschritt W in Nutteilungen wird ein erster Schätzwert für die einseitige Wickelkopflänge l_{wk} ermittelt.

$$D_{Slot, Center} = \frac{D_{a1} + D_{a2}}{2} - h_{Joke} \quad \text{Formel 3}$$

$$l_{wk} \approx \frac{\pi \cdot D_{Slot} \cdot W}{2p \cdot q \cdot m} \cdot \frac{N_1}{2} \approx 46,6 \dots 51,5 \text{ mm} \quad \text{Formel 4}$$

Der axial begrenzte Bauraum, abzüglich der (beidseitig) geschätzten Wickelkopfausdehnung definiert die aktive Blechpaketlänge von $l_{Fe} = 110 \text{ mm}$.

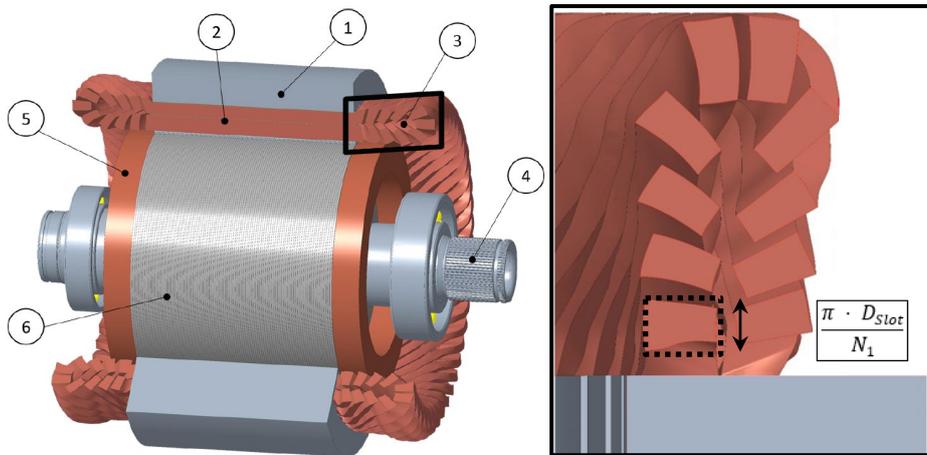


Abbildung 12: Visualisierung des zusammengebauten Statorblechpakets ① mit (Vollmaterial--) Spulenseiten ② und den gesehten (Vollmaterial--) Spulenenenden (mit natürlicher Umschichtung), die den Wickelkopf ③ bilden, das Rotorblechpaket ④ mit den beiden Kurzschlussringen ⑤, sowie der Rotorwelle ⑥ mit den Lagern

4.2.2 Stator- und Wicklungsentwurf

Für ein Maximum an Überlastbarkeit, welches das Verhältnis zwischen Kipp- und Nennmoment widerspielt, gilt es laut [Mue-05], die Gesamtstreuung der Maschine zu minimieren. Die Gesamtstreureaktanz X_σ setzt sich aus der Summe der in Tabelle 4 aufgeführten Teilstreureaktanzen zusammen.

Tabelle 4: Teilstreureaktanzen

Bezeichnung der Reaktanzen	Symbol
Nut- und Zahnkopfsteuerung	$X_{\sigma nz}$
Oberwellensteuerung (sog. doppeltverketete Streureaktanz)	$X_{\sigma o}$
Stirnsteuerung (Wicklungskopf- und Ringsteuerung)	$X_{\sigma wk}, X_{\sigma Ring}$
Schrägungssteuerung	$X_{\sigma schr}$

Es wurde für den Wicklungsentwurf ein geringer Oberwellenanteil im Luftspaltfeld angestrebt. Dadurch lässt sich die Oberwellensteuerungsreaktanz $X_{\sigma o}$ verringern. Laut [Bin-16], [Mue-07] und [Obe-69] reduzieren sich mit steigender Lochzahl die Nut- und Zahnkopf-, sowie Oberwellensteuerung. Dieser Sachverhalt lässt sich durch eine feinere Nutung begründen, wodurch eine oberwellenärmere Feldverteilung im Luftspalt resultiert. Abbildung 13 verdeutlicht die Dämpfung auftretender Oberwellenamplituden anhand des Zonenfaktors ξ_{Zone} für verschiedene Lochzahlen q . Es wurde daher eine Lochzahl von $q=4$ ausgewählt, um den Einfluss vorherrschender Ordnungszahlen zu reduzieren.

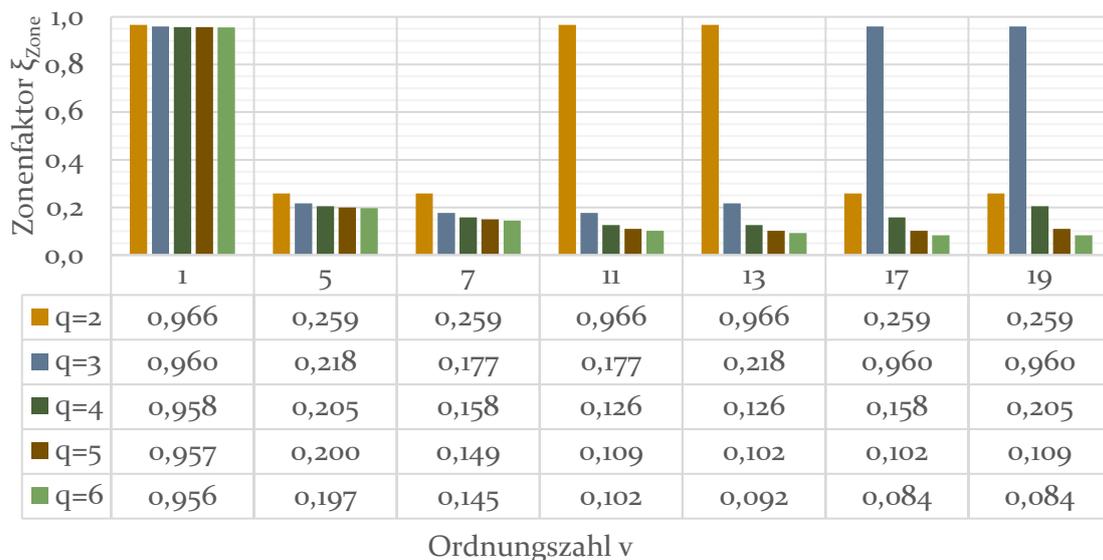


Abbildung 13: Betrag des Zonenfaktors ξ_{Zone} abhängig von der Lochzahl q für die Ordnungszahlen bis $v = 19$

Zur weiteren Schwächung der unerwünschten Ordnungszahlen wird eine gesehnte Zweischicht-Ganzlochwicklung verwendet. Um gerad- und ungeradzahlige Harmonische zu vermeiden, wurde von einer Bruchlochwicklung abgesehen. Die Verkürzung des Wicklungsschritts $W/\tau_p = 10/12$ (in Nutteilungen) dämpft besonders die dominierende fünfte und siebte Oberschwingung.

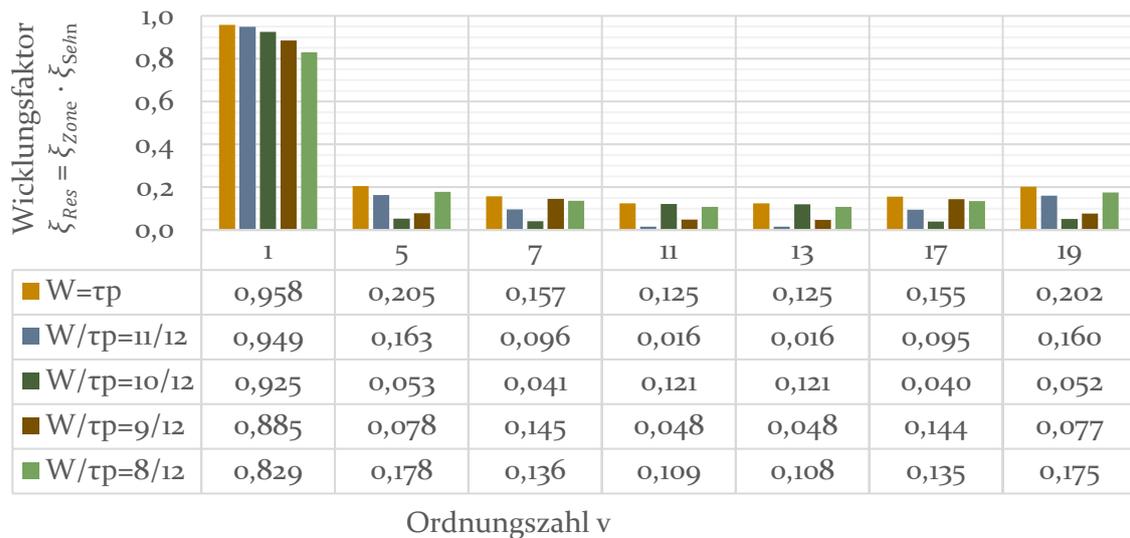


Abbildung 14: Betrag des resultierender Wicklungsfaktor $\xi_{Res} = \xi_{Zone} \cdot \xi_{Sehn}$ für die Lochzahl $q = 4$ und unterschiedliche Wicklungsschrittweiten in Nutteilungen für die Ordnungszahlen bis $v = 19$

Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass durch die Sehnung der Einfluss von Nutharmonischenpaaren (17/18, 35/37, ...) nicht wirksam geschwächt werden kann. Nutharmonischenpaare besitzen den gleichen Wicklungsfaktor wie die Grundwelle $\xi_{res,v=1}$ und können fallweise Schwingungen und Geräusche sowie Wirbelstromverluste in massivleitfähigen Teilen bewirken. Als mögliche Maßnahme kann der Kurzschlussläufer geschrägt ausgeführt werden [Bin-16]. Im Vorgriff auf die Rotordimensionierung soll von einer Schrägung abgesehen werden, um Rotorpaketquerströme und eine zusätzliche Schrägungsstreureaktanz $X_{\sigma Schr}$ zu vermeiden.

Laut [Mue-07] verhält sich der Magnetisierungsstrom I_{μ} proportional zum Luftspalt δ . Für einen großen Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$ sollte daher der Luftspalt möglichst klein gewählt werden. Um zusätzliche Verluste und parasitäre Effekte bei kleinen Luftspaltweiten zu vermeiden, sollte auf offene Nuten verzichtet werden. Die Runddrahtwicklungen werden daher in halbgeschlossene Nuten eingeträufelt.

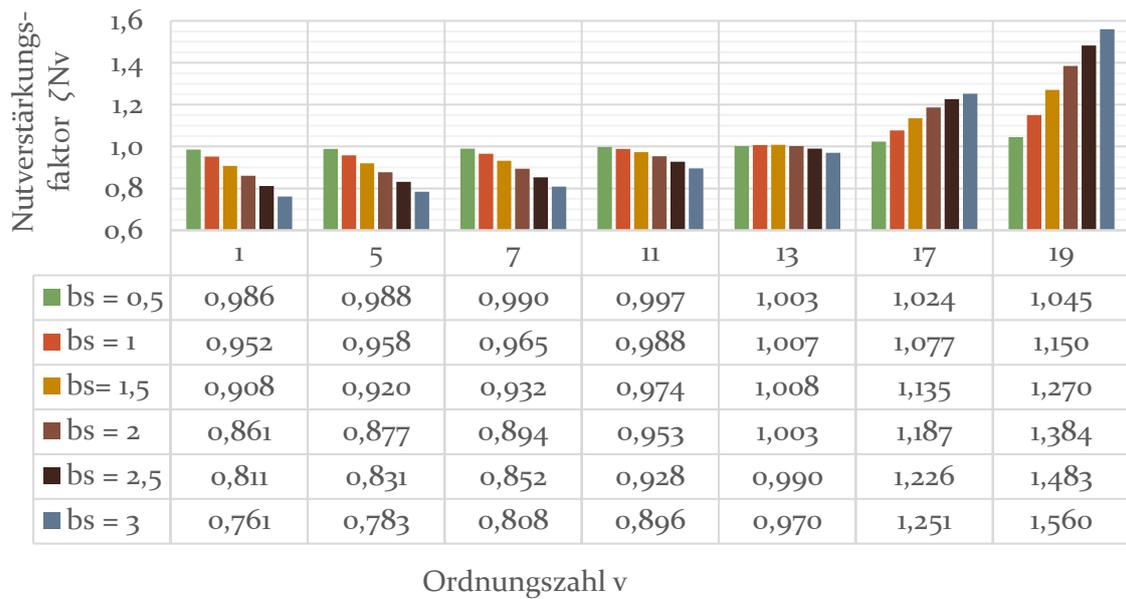


Abbildung 15: Betrag des Nutverstärkungsfaktors ζ_{Nv} für einseitige Nutung, einem konstanten Luftspalt $\delta = 0,5$ mm und einem Bohrungsdurchmesser von $D_{ii}=140$ mm für die Ordnungszahlen bis $v = 19$

In Abbildung 15 ist der Nutverstärkungsfaktor ζ_{Nv} (für stromdurchflossene Nuten) nach [Bin-16] bzw. [Kno-13] für unterschiedliche (Stator-)Nutschlitzbreiten b_s (in mm) aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass sich mit steigender Nutschlitzbreite b_s , die Amplitude der Grundwelle und weiterer niedriger Ordnungszahlen verringern. Gleichzeitig nehmen aber Amplituden höherer Ordnungen stark zu (insbesondere die Nutharmonischenpaare). Daher wurde die Nutschlitzöffnung b_s möglichst schlank ausgeführt ($b_s=2,6$ mm).

Entscheidend für die Dimensionierung der Strangwicklung ist die Spannungsinduktion der Grundwelle des Luftspaltfeldes. Die Grundschnung der Klemmenspannung ist für den Bemessungspunkt festgelegt. Anhand einer angenommenen mittleren Luftspaltinduktion von $B_\delta = 0,65$ T, der Polteilung τ_p und der Eisenlänge l_{Fe} lässt sich der Luftspaltfluss ϕ_δ abschätzen.

$$\phi_\delta = B_\delta \cdot l_{Fe} \cdot \tau_p \approx 6,7 \dots 7,9 \text{ mVs} \quad \text{Formel 5}$$

Für eine erste Schätzung der spannungshaltenden Windungszahl je Strang w_1 kann laut [Mue-07] für den Hauptfluss ϕ_h (welcher durch die Grundwelle des Luftspaltfeldes erzeugt wird) der abgeschätzte Luftspaltfluss ϕ_δ eingesetzt werden.

Aufgrund des großen Drehzahlspektrums soll die Nenndrehzahl der Maschine n_N (sog. Eckpunkt) zunächst mittig des zu stellenden Bereichs platziert werden. Durch die festgelegte Polpaarzahl $p = 2$ ergibt sich die elektrische Frequenz f_{el} :

$$f_{el} = n_N \cdot p \quad \text{Formel 6}$$

Der resultierenden Wicklungsfaktor der Grundwelle $\xi_{Res, v=1}$ lässt sich anhand Abbildung 14 für die gewählte Schrittverkürzung von $W/\tau_p = 10/12$ entnehmen.

Anhand der Gleichung für spannungshaltende Windungszahl aus [Mue-07] lässt sich ein erster Wert für die Strangwindungszahl w_1 berechnen:

$$w_1 = \frac{U_N \cdot \sqrt{2}}{2\pi \cdot f_{el} \cdot \xi_{res,v=1} \cdot \phi_h} \approx 25 - 29 \quad \text{Formel 7}$$

Um die niedrige Windungszahl realisieren zu können, müssen aufgrund der angestrebten hohen Lochzahl und der daraus resultierenden großen Anzahl an Nuten parallele Wicklungszweige a gebildet werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Leiterzahl z_{N1} geradzahlig sein muss, um eine zweischichtige Ganzlochwicklung realisieren zu können. Anhand der nachfolgenden Entwurfsgleichung lassen sich die geeigneten Wertepaare zur Realisierung des Hauptflusses definieren:

$$w_1 = pq \frac{z_N}{a} \quad \text{Formel 8}$$

Nachfolgend sind in Tabelle 5 mögliche Kombinationen aus Reihen- und Parallelschaltung der Spulengruppen aufgeführt. Es wurde $a=4$ gewählt und die drei möglichen Kombinationen mit Hilfe einer analytischen Berechnung untersucht (siehe Kapitel 6.2).

Tabelle 5: Potentielle Wicklungskennwerte

m	q	N_1	z_N	a	w_1
3	4	48	6	2	24
			8		32
			12	4	24
			14		28
			16		32

4.2.3 Rotor- und Käfigentwurf

Die Kombinationen von Stator- und Rotornutzahlen besitzen großen Einfluss im Hinblick auf das Geräuschverhalten, die Oberwellenmomente und die Entstehung von Zusatzverlusten. Leider lässt sich keine einfache Regel zur Bestimmung der optimalen Läufernutzahl eines Käfigläufers finden. Es wird sich daher an „günstigen“ Nutzahlkombinationen nach [Bin-15], [Mue-07] und [Obe-69] orientiert. Mögliche sinnvolle Rotornutzahlen wären z.B.: 42, 46, 50, 54, 58, 60.

Um die (Rotor-)Oberwellenstreuung zu verringern, wird die Rotornutzahl größer als die Statornutzahl gewählt. Das hat bei geschrägten Rotoren Querströme zwischen den (unisolierten) Stäben und dem Blechpaket zufolge. Um Rotorpaketquerströme und die zusätzliche Schrägungstreureaktanz $X_{\sigma_{Schr}}$ zu vermeiden, wird die Maschine daher ungeschrägt ausgeführt [Bin-16].

Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit werden die Kurzschlussstäbe nicht gestabt und verlötet, sondern als gegossener Käfig im Druckgussverfahren ausgeführt. Um vorhandene Blechkurzschlüsse zu vermeiden, wird im Anschluss an den Gießvorgang die Rotoroberfläche überdreht [OBE-69]. Die durch Umrichterspeisung bedingten Oberschwingungen erzeugen hohe Rotorfrequenzen in den Kurschlussstäben, welche zu Stromverdrängung und zu erhöhten Stromwärmeverlusten führen. Wird der Kurzschlussstab tropfenförmig und

mit einer möglichst geringen Stabhöhe ausgeführt, erfährt dieser nur wenig Stromverdrängung. Des Weiteren bilden sich parallelfankige Rotorzahnstege, welche magnetische Engpässe mit hohen Flusskonzentrationen vermeiden und somit den Magnetisierungsstrom nicht unnötig erhöhen [Bin-16].

Die Stabhöhe wird durch die minimale Breite des Rotorstabschlitzes begrenzt. Zu schmal gewählte Schlitz lassen sich im Gießprozess nicht vollständig mit Leitermaterial füllen. Die minimale Schlitzbreite sollte daher nicht kleiner 0,8 - 1,3 mm bei einer Aktivteillänge von ca. 200 mm gewählt werden.

4.3 GROßSERIENANFORDERUNGEN

Im Rahmen der Großserienanforderungen wurde die aktuelle Statormontage für den e-Golf, die mit der Einziehtechnik gefertigt werden untersucht und bewertet. Hier gilt es analog zur Einziehtechnik, die eine gute Automatisierung vorweisen kann, den NeWire Prozess mit demselben Automatisierungsgrad beim Wickeln und Einbringen auszulegen. Dennoch liegt der Nachteil der Einziehtechnik in der Produktauslegung, welche keine größere Flexibilität in den Produkten zulässt. Um die Anforderungen näher zu erläutern wird im Folgenden die aktuelle Statormontage näher erläutert. Die Prozesskette wird in der Abbildung 16 dargestellt.

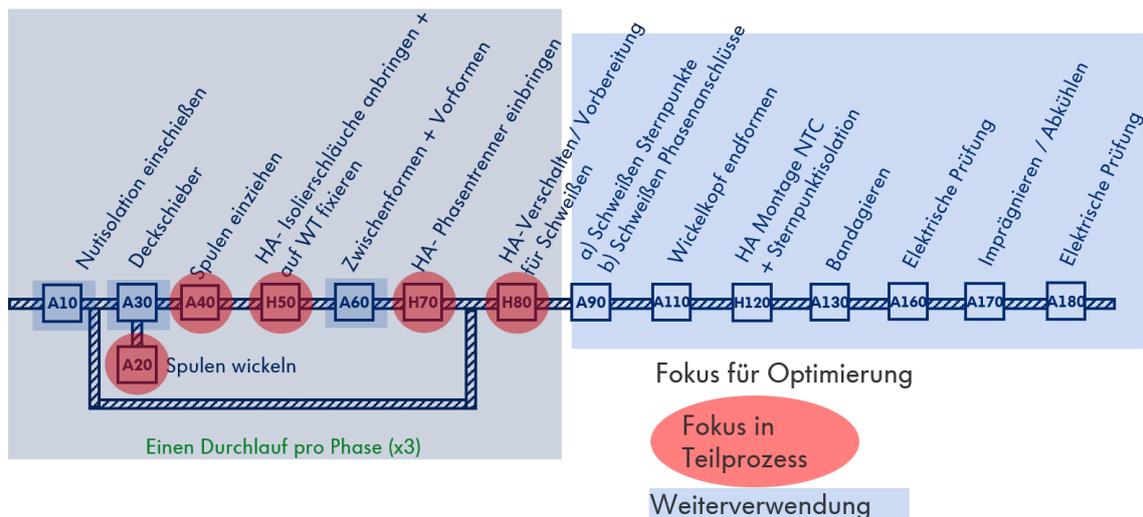


Abbildung 16: Prozesskette aktuelle Statormontage

Die Prozesse sind mit den Anfangsbuchstaben H für händisch und A für automatisiert deklariert. Die Montage startet mit der Übergabe (H10) des Stators an den Nutisulationsautomat (A10). Der Schablonenwicklerautomat (A20) wickelt die Spulen, die im Einziehautomat (A30) in den Stator eingebracht werden. Daraufhin wird der Deckschieber in den Stator gefügt (A40) und anschließend die Phasenanschlüsse mit Schläuchen versehen (H50). Nachdem die Schläuche für die Phasenabgänge angebracht wurden, werden die Wickelköpfe zwischengeformt (A60) und anschließend die Phasentrenner in den Wickelkopf gesetzt (H70). Diese Prozesskette wird einmal pro Phase durchgeführt. Der Stator wird händisch verschaltet und zum Schweißen vorbereitet (H80), ehe die Phasen automatisch verschweißt werden (A90). Anschließend wird eine Nacharbeit durchgeführt, die u.a. das Abschneiden der Sternpunkte beinhaltet (A100). Darauf folgt das Endformen der Wickel-

köpfe(A110), bevor die Sternpunkte isoliert und die NTC eingebracht werden (H120). Abschließend wird der Wickelkopf bandagiert (A130) und elektrisch geprüft (A160) zur Imprägnieranlage (A170) übergeben. Nachdem der Stator imprägniert und abgekühlt ist, folgt eine abschließende elektrische Prüfung (A180).

Wie in der Abbildung 16 zu erkennen liegt der Fokus für den NeWire Prozess im Wickeln und Einbringen der Spulen in das Statorblechpaket. Für diese gesamte Montagelinie wurden die Anforderungen auf Basis der Einziehtechnik definiert und werden im Folgenden aufgelistet.

- Vollautomatisiert
- Maschinenverfügbarkeit
- Keine Drahtbeschädigung
- Ordnung der Drähte
- Skalierbarkeit (axiale und radiale Längen der Spule)
- Modularität (Erweiterung der Anlagentechnik möglich)
- 500-2000 Einheiten/Tag (3 Schicht)

Wenn diese Anforderungen in der NeWire Technik umgesetzt werden können, würde es eine Verbesserung gegenüber der aktuellen Technik darstellen.

Darüber hinaus ist es das Ziel, die Weiteren in Abbildung 16 rot dargestellten Prozesse wie das Verschlauchen der Phasenabgänge, das Einbringen der Zwischenisolation oder das Verschalten des Stators für eine mögliche Automatisierung zugänglich zu machen indem man schon bei dem Produktdesign diese Anforderungen einfließen lässt. Zudem soll auch der Verschaltaufwand, indem man eine Dreiecksschaltung gegenüber der Sternschaltung verwendet, um 30 % reduziert werden.

Die Prozesse die dem Verschalten in Abbildung 16 folgen können für die NeWire Technik übernommen werden.

4.4 ANFORDERUNGEN AN WICKELVERFAHREN

Im Rahmen verschiedener Workshops und Arbeitstreffen wurden die Anforderungen an das Wickelverfahren erarbeitet und definiert. Dabei wurde die VDI 2221 bzw. die Entwicklungsmethodik nach Pahl / Beitz zu Grunde gelegt. Hierbei werden die Hauptaufgaben identifiziert, die Randbedingungen beschrieben und ein Funktionsplan nach VDI 2860 zur Erfassung der manuellen Prozessabfolge erstellt, um letztendlich die Anforderungen an das Wickelverfahren systematisch zu erarbeiten. Die verwendeten Hauptmerkmale (Kategorien) der Anforderungen sind in der Abbildung 17 aufgezeigt. Anschließend wurden die Ergebnisse mit allen Projektpartnern abgeglichen und erweitert, sodass eine für das Projekt allgemeingültige Anforderungsliste an das Wickelverfahren entstanden ist. Die Anforderungsliste ist im Anhang (A1) zu finden, die weiterführenden Ergebnisse der Prozessanalyse und Konzeptfindung werden in Kapitel 6 beschrieben. [Fel 13]

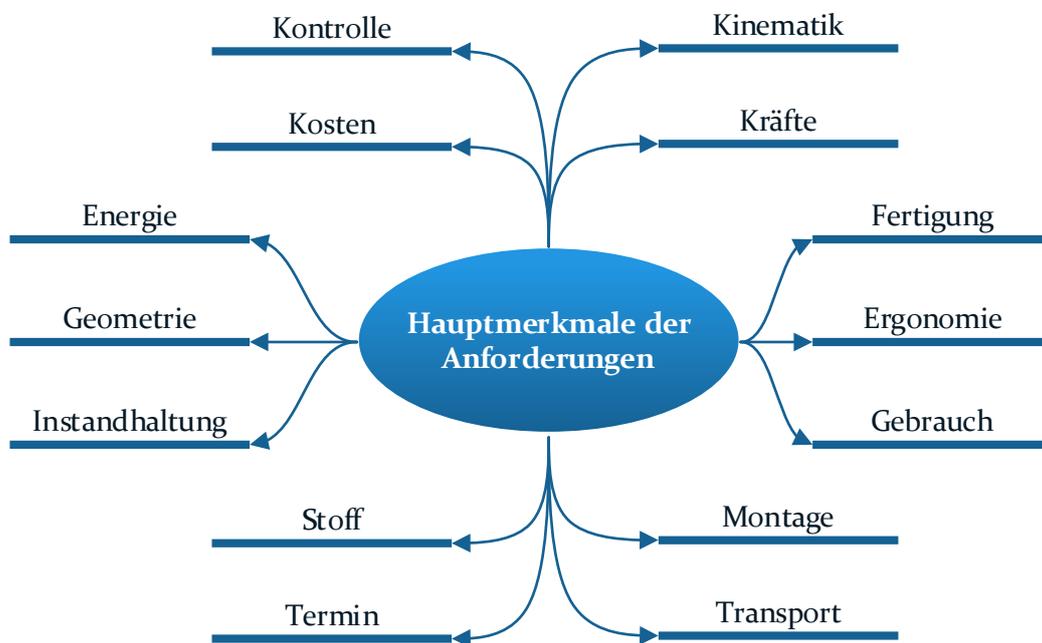


Abbildung 17: Darstellung der Hauptanforderungen an das Wickelverfahren im Projekt

4.5 ANFORDERUNGEN AN DEN DRAHT

Aufgrund der neuen Anforderungen bei dem Träufelwickelverfahren (teilautomatisch) ergibt sich eine neue Drahtbehandlung im Fertigungsverfahren. Um diese neuen Anforderungen an den Draht bewerten zu können, wurden verschiedene Muster in Bezug auf Isolation, Zugfestigkeit, Fehlstellen, Dehnbarkeit und Haftung produziert und getestet.

Im ersten Schritt wurden Muster mit den Dimensionen 0,56mm, 0,70mm und 0,90mm, einer Isolation vom Grad 2 und einer Beschichtung aus Polyesterimid/Polyamidimid produziert, getestet und an die Projektpartner für Wickelversuche versendet. Im Anschluss wurden weitere Muster der oben genannten Abmessungen mit unterschiedlichen Isolationszunahmen (Grad 1 und Grad 3) zu weiteren Verifizierungsprüfungen produziert und getestet.

Im Anschluss an die ersten Musterdrähte und Tests, durch die Firma Essex sowie die Projektpartner, wurde gemeinsam die Anforderungsliste an den Draht erstellt (Anhang A1)

Hierbei wurden folgende Punkt in die Anforderungsliste an den Lackdraht aufgenommen:

- Drahtdurchmesser
- Kupfersorte
- Isolationsmaterial
- Isolationszunahme
- Bruchdehnung
- Dehnbarkeit und Haftung
- Spannungsfestigkeit

Im späteren Projektverlauf wurde durch die Projektteilnehmer das Wickelschemata, die elektromagnetische, thermische sowie chemische Auslegung getätigt. Aufgrund der optimalen Auslegung unter Bezug der Anzahl der Leiter und der gesamten Kupferfläche je Nut, wurde ein 0,71mm Leiterdurchmesser als Draht festgelegt.

In einem weiteren Untersuchungspunkt wurde der mögliche mechanische Einfluss des Wickelprozesses bei unterschiedlichen Schichtdicken und Lacktypen getestet. Um diese mechanische Anforderung ohne Beschädigungen des Lackdrahtes zu gewährleisten, wurden im Projekt Drähte mit unterschiedlichem Isolationsmaterial und unterschiedlichen Schichtdicken produziert. Ziel war es, das ideale Verhältnis von Polyesterimid und Polyamidimid für dieses Produkt festzulegen.

Bei gleichbleibendem Außendurchmesser wurden die Isolationsschicht Polyesterimid und Polyamidimid im Verhältnis zueinander unterschiedlich aufgebaut.

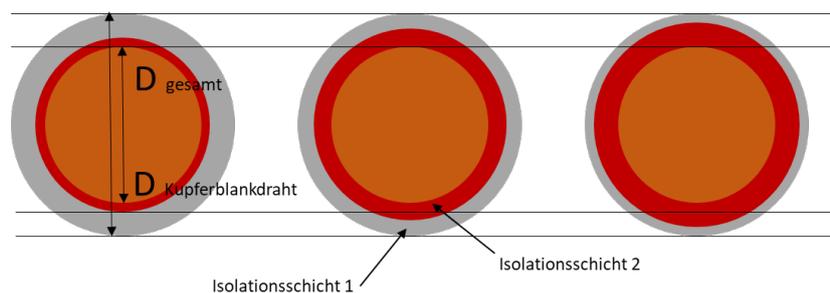


Abbildung 18: Schematisches Bild Lackdrahtaufbau der Muster

Der Schwerpunkt der Analyse bei diesen Mustern lag auf der **Durchschlagsspannung** (Maß für die Isolationsfestigkeit von Isolierstoffen), **Dehnbarkeit und Haftung** (beschreibt die Fähigkeit des Drahtes, Beanspruchungen wie Strecken, Wickeln, Biegen und Verdrillen ohne Risse oder Ablösung der Isolierung zu widerstehen) sowie die **Schabefestigkeit** (Analyse wie viel Hub mit zusätzlichem Gewicht benötigt wird, um den Lack bis zum Kupfer abzuschaben).

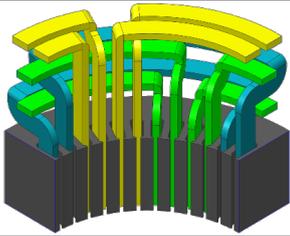
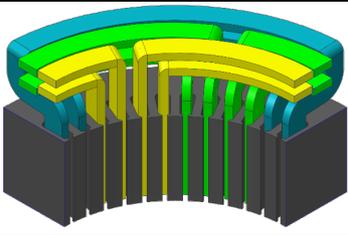
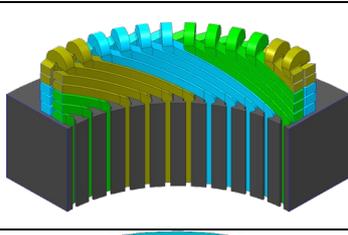
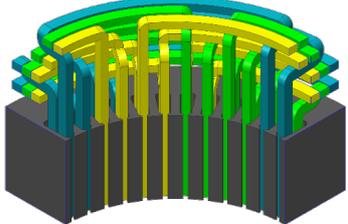
Die ermittelten Spannungsfestigkeiten liegen deutlich über den in der Anforderungsliste festgelegten 2,1 kV [DC]. Als optimale Schichtdickenverteilung wurde ein Verhältnis von 80 % Polyesterimide und 20 % Polyamidimid in Bezug auf Dehnbarkeit und Haftung sowie Schabefestigkeit ermittelt. Mit der erstellten Anforderungsliste wurde die Umsetzung des Arbeitspakets erfüllt.

5 Fertigungsrelevante Auslegung der Maschinenkonzepte

5.1 WICKLUNGS AUSLEGUNG

Um die gewünschte hoch performante elektrische Maschine herstellen zu können, soll die Wicklungsauslegung und Verschaltung für den Stator festgelegt werden. Im Rahmen dieses Zieles werden verschiedene Wickelschemata sowohl im CAD als auch mit Hilfe von Versuchsaufbauten bewertet und anschließend festgelegt werden.

Die ausgewählten Wickelschemata sind in der Abbildung 19 mittels einer CAD-Konstruktion dargestellt. Es sollen zwei Einschichtwicklungen, die sich ausschließlich in der Spulenweite unterscheiden und drei Zweischichtwicklungen, die sich in der Spulenweite und in dem Schichtaufbau unterscheiden.

1		<ul style="list-style-type: none"> • Einschicht • Spulen gleicher Weite
2		<ul style="list-style-type: none"> • Einschicht • Spulen ungleicher Weite
3		<ul style="list-style-type: none"> • Zweischicht • Spulen gleicher Weite • Mit Schichtwechsel
4		<ul style="list-style-type: none"> • Zweischicht • Spulen gleicher Weite • Ohne Schichtwechsel

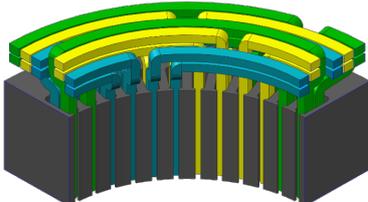
5		<ul style="list-style-type: none"> • Zweischicht • Spulen ungleicher Weite • Ohne Schichtwechsel
---	---	---

Abbildung 19: Wickelschemata

Analog zur CAD-Konstruktion wurden die Wickelschemata in aus Kunststoff gedruckten Statorblechpaketen aufgebaut sowie nach Produkt und Fertigungsprozess anhand ausgewählter Kriterien bewertet. Unter Produkt wurden u. a. der Bauraum für die Wickelköpfe, der möglichst klein gehalten werden soll oder der Umfang des Isolationsmaterials, der z. B. bei einer Zweischichtwicklung automatisch zunimmt, bewertet. Für die Prozessbewertung wurden Kriterien wie der Verschaltungsaufwand oder das Einbringen der Spulen in die Statornut untersucht. Die Abbildung 19 zeigt den Konzeptaufbau der Zweischichtwicklung mit Schichtwechsel. Hier wird die axiale Länge und die Isolierung des Wickelkopfes untersucht.



Abbildung 20: Abbildung Versuchsaufbau

Anzumerken ist, dass bei der Bewertung der verschiedenen Wickelschemata auch die Maschinenperformance mit eingeflossen ist. Unter Berücksichtigung aller genannten Kriterien einigte man sich im Projektkonsortium auf eine gesehnte Zweischichtwicklung (Abbildung 19 Wickelschema 3). Im Rahmen einer Vorabuntersuchung wurde die Wicklungsausführung untersucht. Besonders bei den rotortemperaturkritischen Asynchronmaschinen weist ein mehrlagiger sowie gesehnter Wicklungsaufbau Vorteile auf. Im Gegensatz

zu Einschichtwicklung verhält sich der drehmomentbildende Luftspalt sinusförmiger (s. Abbildung 21).

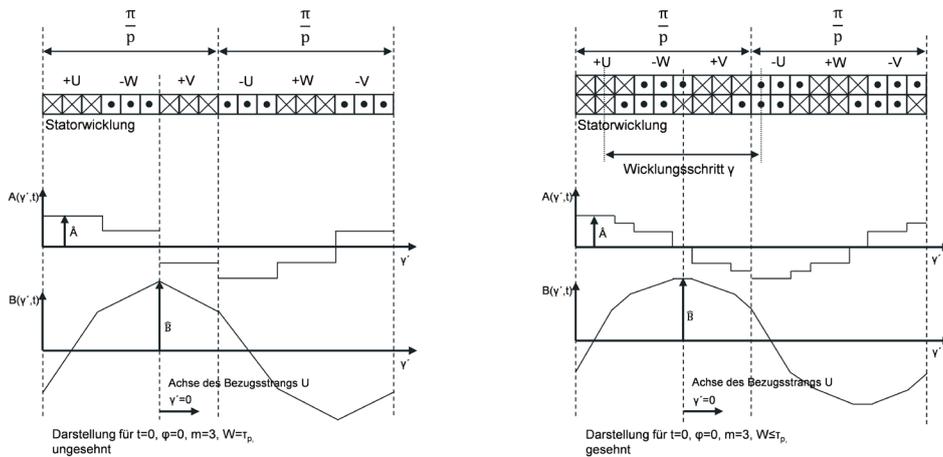


Abbildung 21: Luftspaltunterschied gesehnte Wicklung zur Einschichtwicklung

Weiter können durch geschickte Sehnung unerwünschte Oberwelleneffekte unterdrückt werden. Durch die Induktionswirkung des Statorfeldes können bei einer gesehnten Zweischichtwicklung die Rotorverluste positiv beeinflusst werden. Aufgrund der geringeren Rotorverluste können eine höhere thermische Verfügbarkeit des Antriebes sowie eine gesteigerte Reproduzierbarkeit der elektrischen Eigenschaften erreicht werden.

Die beschriebenen Vorteile aus Sicht der Maschinenauslegung bedeuten aus Fertigungssicht eine große Herausforderung, insbesondere hinsichtlich der angestrebten Automatisierbarkeit. Die Problematik lässt sich anhand der Abbildung 22 gut erläutern, in der ein Beispiel für die Reihenfolge, in der die Spulen in die Statornuten eingebracht werden, dargestellt wird. Hier besteht eine Spulengruppe aus vier in Reihe geschaltete Einzelspulen, sodass sie in Summe acht halbe Nuten füllt. Legt man die erste Spulenseite in die ersten vier Nuten in die Unterschicht, so muss die zweite Spulenseite in die Oberschicht gelegt werden.

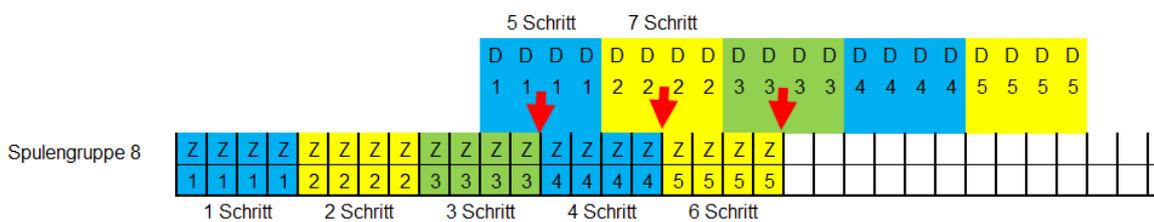


Abbildung 22: Händisches Einbringen der Statorwicklung

Dadurch müssen vorerst weitere Spulengruppen in die Nuten eingebracht werden, um den zweiten Teilschenkel der Spulengruppe 1 in der Oberschicht platzieren zu können. Während die nächsten Spulen eingebracht werden, benötigt es ein Konzept, den zweiten Schenkel der Spule 1 in irgendeiner Art außerhalb der Nut abzulegen oder fest zu halten. Generell steigt die produktionstechnische Herausforderung aufgrund des geringen Innendurchmessers des Stators und dem daraus resultierenden geringen Bauraums für das Einbringen der

Spulen. Somit hat sich das Projektteam als Ziel gesetzt, eine Anlagentechnik zur Herstellung dieses Wickelschemas zu entwickeln. Sollte diese Anforderung nicht erreicht werden, dient die Wickelschema Variante 2 mit einer Einschichtwicklung als Alternative.

Der Stator der Asynchronmaschine ist vorbehaltlich kritischer Kreisströme im Dreieck zu verschalten, um den Fertigungsaufwand durch den Entfall der Sternpunkte zu minimieren. Zusätzlich kann der axiale Bauraum höher ausgenutzt werden. Hinsichtlich betriebsbedingter Umrichtereinflüsse wirkt sich die höhere Windungszahl der Dreieckschaltung minimierend auf die resultierenden Oberwelleneinflüsse der Umrichtertaktung aus. Die Verschaltung ist in Abbildung 23 dargestellt.

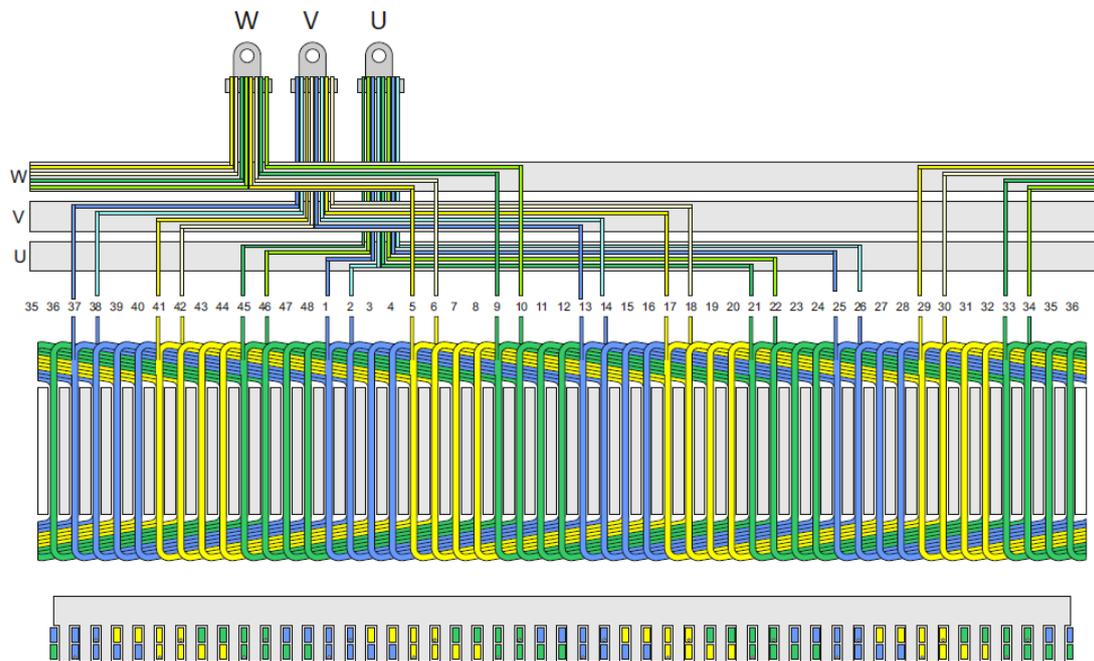


Abbildung 23: Verschaltungsbild NeWwire

5.2 ELEKTROMAGNETISCHE AUSLEGUNG

5.2.1 Analytische Überprüfung

Nachdem in Kapitel 3.2 die grundlegende Dimensionierung erläutert wurde, soll im Folgenden die Untersuchung des Betriebsverhaltens der Asynchronmaschinen mittels des analytischen Rechenmaschinenprogramms ASYN 6.5 der Universität Hannover dargestellt werden. Zunächst wurde die Strangwindungszahl w_1 entsprechend Tabelle 4 variiert und die resultierenden Grenzkurvenverläufe mit der Spezifikation verglichen.

Eine Strangwindungszahl $w_1 = 28$ bildet den besten Kompromiss zwischen einem hohen Drehmoment im Grundstellbereich und einer ausreichenden mechanischen Leistung bei maximaler Drehzahl.

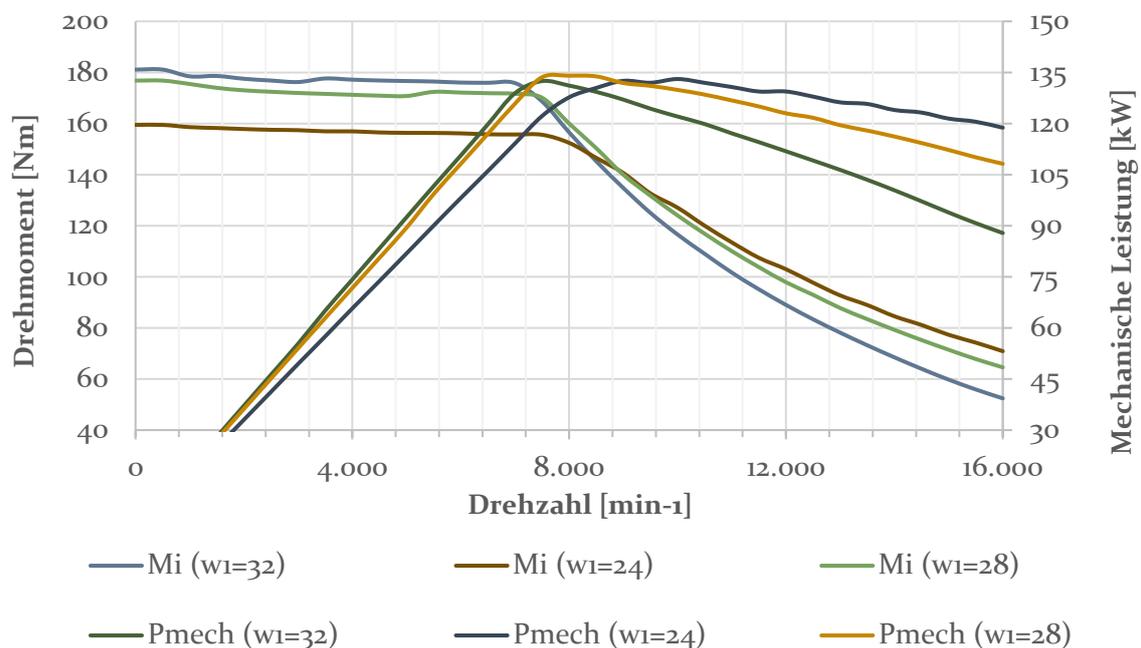


Abbildung 24: Gegenüberstellung der Drehmomente und Leistungen über die Drehzahl für die spannungshaltenden Strangwindungszahlen $w_1 = 24, 28, 32$

Entsprechend der gewählten Strangwindungszahl resultieren $a = 4$ parallele Spulengruppen, die aus $q = 4$ Spulen mit jeweils $w_{sp} = Z_N/2 = 7$ Windungen bestehen. Nachfolgend sind das Wickelschema und die zugehörige Verschaltung abgebildet.

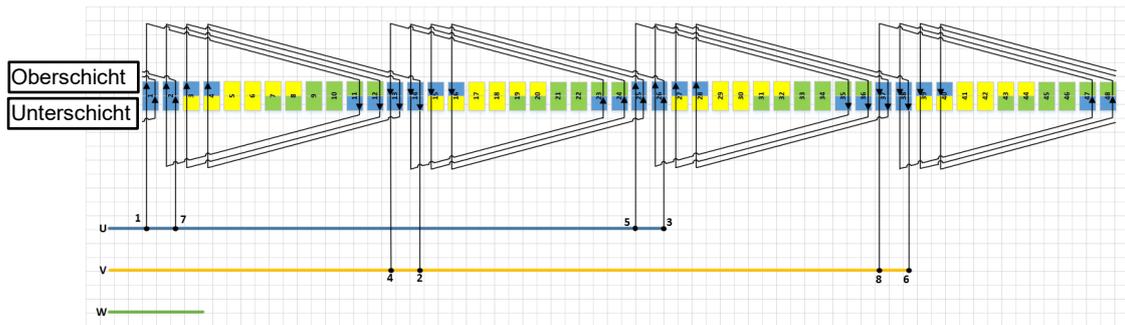


Abbildung 25: Wickelschema eines Strangs für die Strangwindungszahl $w_1 = 28$
 ($w_{sp} = z_N/2 = 7$ und $a = 4$)

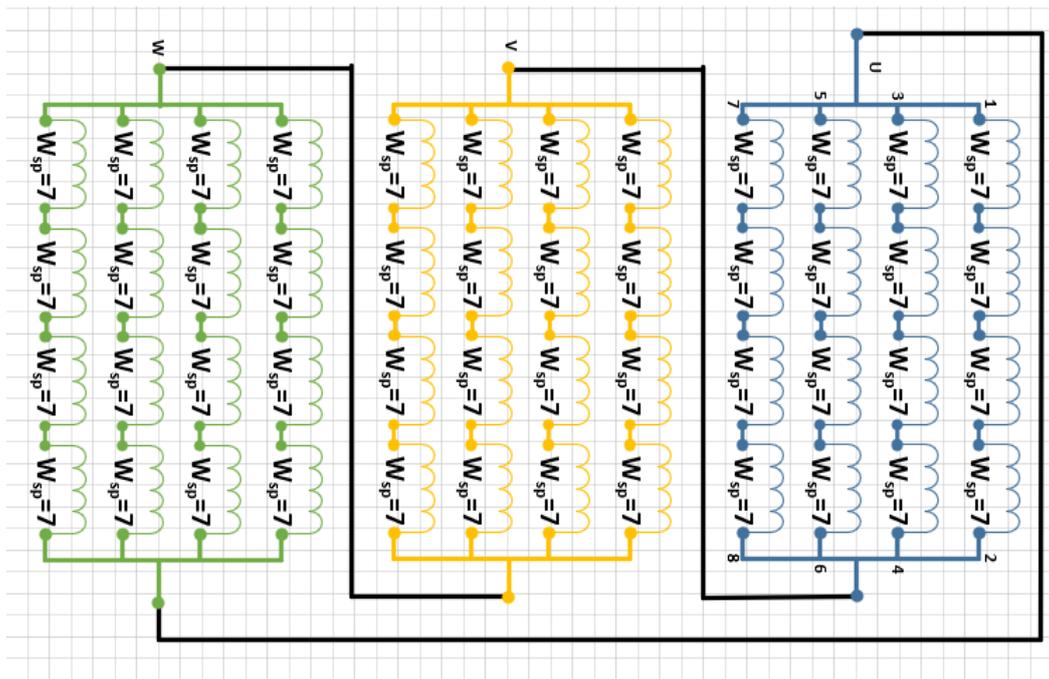


Abbildung 26: Dreieck-Verschaltung der drei Stränge (U, V, W)

Für die Auslegung werden zwei unterschiedliche Elektrobänder eingesetzt. Für den Stator wird die Blechsorte NO30-16 (mit Backlack-Überzug) und für den Rotor wird die Blechsorte NO 30-19 verwendet. Beide Materialien besitzen eine Blechstärke von 0,3 mm und einen Stapelfaktor von 95 %.

Es werden das Statorjoch und die Statorzähne sowie das Rotorjoch und die Rotorzähne bemessen. Richtwerte bzgl. der Induktion lassen sich anhand einschlägigen Literaturen bspw. [Mue-07] entnehmen. Die vorherrschenden Induktionen für die jeweiligen Bereiche sind in Tabelle 6.2-1 zusammengefasst. Zeitgleich wurde iterativ der Bohrungsdurchmesser ermittelt und damit ist die Statornutfläche festgelegt.

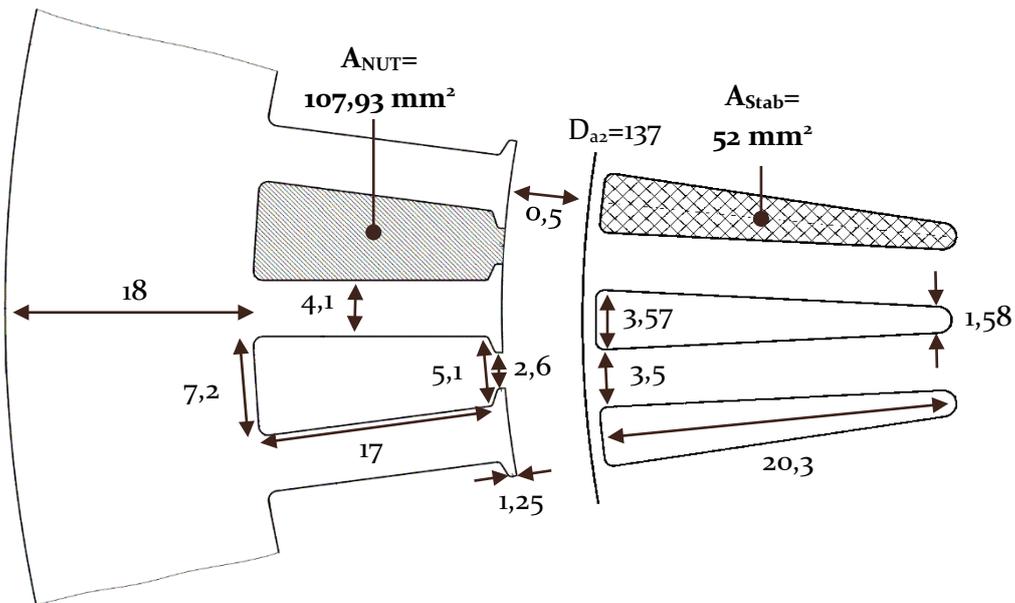


Abbildung 27: Detaillierte Abmessungen des Magnetkreises (alle Werte sind in mm angegeben)

Die in Abbildung 27 gewählten Abmessungen rufen die nachfolgenden Induktionen hervor.

Tabelle 6: Resultierende Induktionen

Bezeichnung		Symbol	Flussdichte in [T]
Stator	Joch	B_{Joch1}	< 1,8
	Zahn	B_{Zahn1}	< 1,8
Rotor	Joch	B_{Joch2}	< 1,7
	Zahn	B_{Zahn2}	< 1,4
Luftspalt		B_{δ}	< 0,6

Die hohen Ströme benötigen einen entsprechend großen Kupferquerschnitt. Die zuvor gewählten Abmessungen des Statorjochs und der Statorzähne begrenzen die Nutfläche. Anhand der Spulenwindungszahl $z_N = 14$ je Nut, der Anzahl an parallelen Teileitern a_{TL} und dem Leiterquerschnitten d_{Cu} lassen sich die Füllfaktoren bestimmen.

Für eine möglichst große Kupferfläche werden $a_{TL} = 9$ parallele Teileiter mit einem Kupferquerschnitt von $d_{Cu} = 0,71 \text{ mm}$ bzw. einem Außendurchmesser von $D_{Cu} = 0,789 \text{ mm}$ verwendet. Es befinden sich daher 126 Leiter in jeder Nut (siehe Bild 6.2-5).

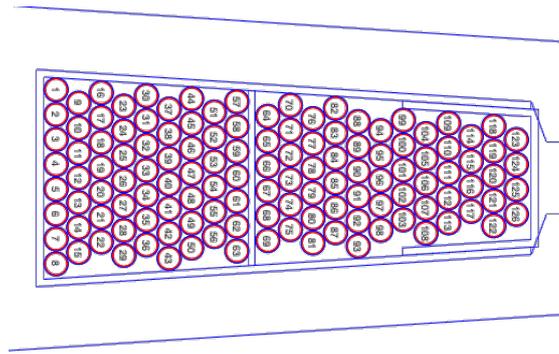


Abbildung 28: Visualisierung der Nutfüllung. Darin ersichtlich die 126 Einzelleiter, deren Lackschicht, der gefaltete Deckschieber, der Phasentrenner und die umhüllende Nutisolation.

Tabelle 7: Zusammenfassung des Isolationssystems

Bezeichnung	Material	Wert in mm
Einseitiger Lackauftrag Kupferdraht (Grad 2)	MagneTemp CA-200	0,0395
Deckschieberdicke	NKN5022	0,22
Nutisolation	Nomex410	0,13
Spulenschenkelisolation	NKN2511	0,11
Wicklungskopfisolation	Nomex410	0,18

Der klassische Phasentrenner in der Nut wird durch zwei separate Spulenschenkelisolationen substituiert. Somit entfällt der Prozessschritt des Phasentrenner-Einbringens.

Unter der Bezeichnung „NKN“ wird ein flexibles dreilagiges Laminat verstanden, welches aus einer Polyimid-Folie („Kapton“ – Produktname der Fa. DuPont) mit beidseitig kalandriertem Nomex-Papier besteht. Hierbei bezeichnen die ersten beiden Ziffern in Tabelle 7 die Dicke der Polyimid-Schicht und die letzten beiden Ziffern die Stärke des gesamten Materials. Ein dreilagiges Laminat vereint die guten elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Kaptonfolie mit den chemischen und hochthermischen Eigenschaften des Nomex-Aramid-Papiers. Zusätzlich begünstigt das Nomex-Papier die abschließende Aufnahme von Imprägnierharz.

Es lässt sich nun der elektrische Füllfaktor bestimmen. Dieser liegt bei 48,4% und beschreibt das Verhältnis zwischen der Kupferfläche und der gesamten Nutfläche (gemessen bis zum Nutschlitz).

Der mechanische Füllfaktor liegt bei 73,6% und setzt den gesamten Inhalt der Nut (darin enthalten: die Kupferfläche, die Lackschicht, der Deckschieber, der Phasentrenner und die Nutisolation) in das Verhältnis zur Nutfläche (gemessen bis zum Nutschlitz).

Analog zum Stator liegt durch die Abmessungen der Rotorzähne und des Rotorjochs die Stabbreite bereits fest. Anhand der jeweiligen Kupferflächen lassen sich die maximalen Stromdichten für den Überlastbetrieb ermitteln. In den Statorwicklungen entstehen Stromdichten J_1 von $< 18 \text{ A/mm}^2$, im Kurzschlusskäfig werden Stromdichten J_2 von $< 12 \text{ A/mm}^2$ erwartet.

5.3 THERMISCHE AUSLEGUNG

Einen weiteren elementaren Aspekt bei der Festlegung des Maschinendesigns bildet die thermische Auslegung der zu entwickelnden elektrischen Maschine. Sie dient dazu, sicherzustellen, dass die während des Betriebs durch Verluste innerhalb der Maschine entstehende Wärme hinreichend effizient abgeführt wird, um die zuvor spezifizierten Leistungsanforderungen zu erreichen und gleichzeitig einen frühzeitigen Ausfall der Maschine, z. B. durch (Alterungs-)Schäden an der Isolation, zu vermeiden.

Die Norm IEC 60034-6 (DIN EN 60034-6) beschreibt eine Reihe gängiger Kühlmethoden elektrischer Maschinen. Sie unterscheiden sich unter anderem nach Art der Kühlung, ob offener oder geschlossener Kühlkreislauf oder ggf. einer Kombination aus beiden, danach ob sie fremd- oder eigengekühlt sind und welches Kühlmedium eingesetzt wird [Mue-05]. Während Maschinen kleiner Leistung (z. B. in Elektrogeräten) oft in offenen Kreisläufen luftgekühlt werden, kommt in Traktionsantrieben für Elektrofahrzeuge aufgrund der Anforderungen an Leistungsdichte und Bauraum meist eine Kombination aus flüssigkeitsgekühltem Primärkreislauf und Wärmetauscher zum Einsatz.

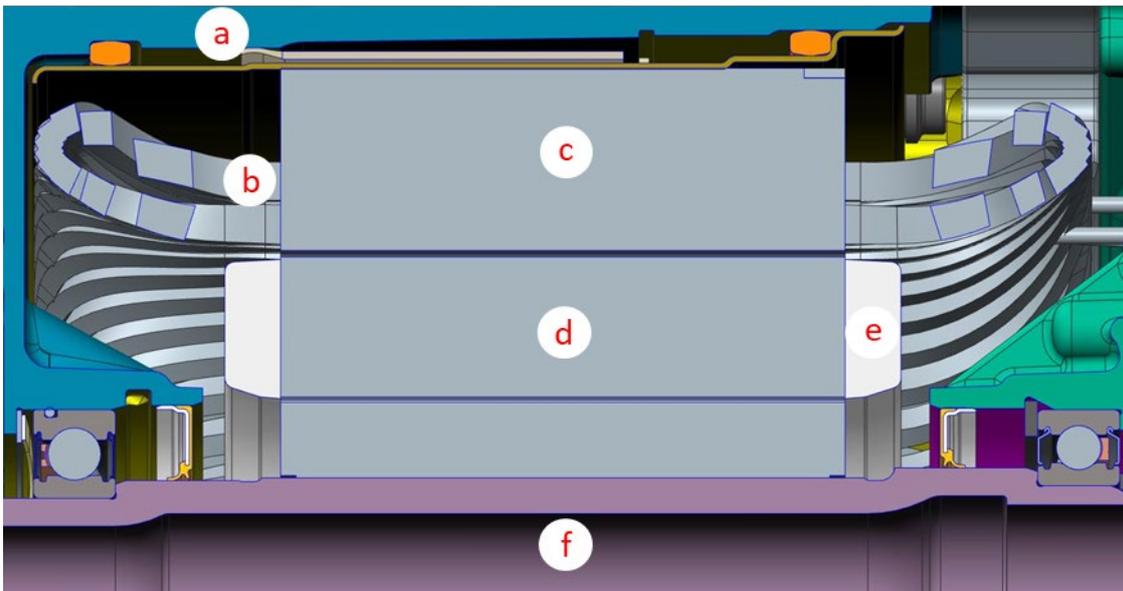


Abbildung 29: Ausschnitt der E-Maschine mit Kühlmantel

- a) Gehäuse & Kühlkanal
- b) Ständerwicklung
- c) Ständerblechpaket
- d) Rotorblechpaket
- e) Kurzschlusskäfig
- f) Rotorwelle

Die im Verhältnis zur abrufbaren Dauerleistung vergleichsweise hohe verfügbare Leistung des Kurzzeitbetriebs ist kennzeichnend für den auszulegenden Zusatzantrieb (vgl. 4.1 Maschinenkonzepte). Die hohe thermische Masse des Rotors und damit einhergehende große Zeitkonstante bei dessen Erwärmung begünstigen ein Kühlkonzept ohne aktive Rotorkühlung für den angestrebten Verwendungszweck. Abbildung 29 zeigt einen Teil des Maschinenquerschnitts. Als primäre Wärmesenke ist der zwischen dem Gehäuse (a) und dem

Ständerblechpaket (c) eingebrachte Kühlmantel vorgesehen. Als Kühlmedium wird ein wasserbasierendes Gemisch eingesetzt. Nachfolgend werden die zur Auslegung und Simulation verwendeten Methoden beschrieben.

Die Entstehung von Fertigungsprozess und Maschinendesign sind im Projekt NeWire zwei parallele Prozesse, die fortlaufend aufeinander Einfluss nehmen. Nach der Festlegung des Maschinenkonzeptes erfolgt eine initiale Beurteilung anhand analytischer Berechnungen und Simulationen, die die erwartete Temperaturverteilung und Beanspruchung einzelner Komponenten erlaubt. Aufkommende Anforderungen aus der parallelen Entwicklung – das können z. B. Anpassungen der Geometrie oder des Isolationskonzeptes sein – werden aufgegriffen und mit Hilfe der Methoden der thermischen, aber auch elektrischen Auslegung neu bewertet. Des Weiteren kommen hierzu auch Messungen an einer ihrer Art nach vergleichbaren Referenzmaschine zum Einsatz (s. a. [Roe-17], [Roe-19]).

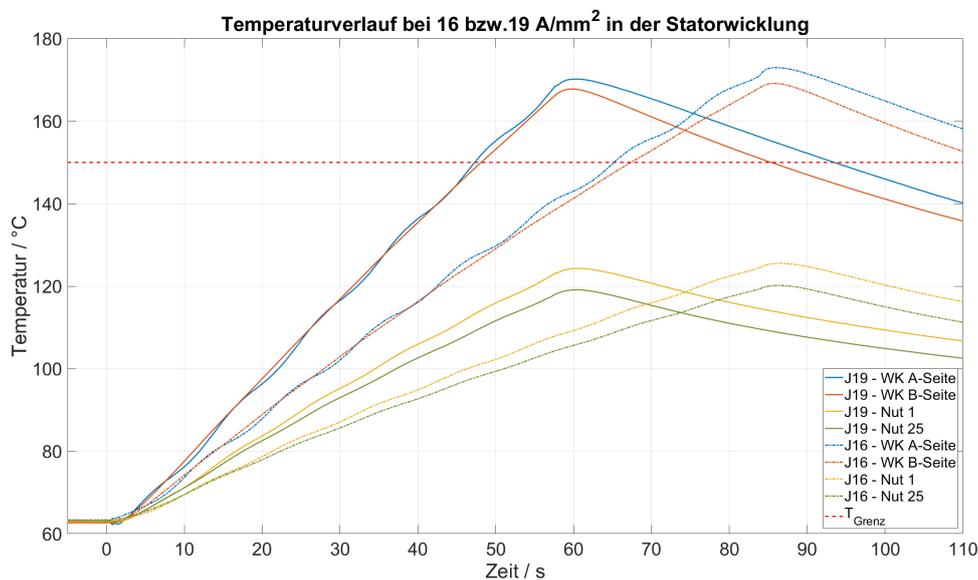


Abbildung 30: Temperatur-Zeit-Verhalten bei zwei Betriebspunkten mit unterschiedlicher Stromdichte

Im Hinblick auf den künftigen Einbringprozess für die Wicklung in den Stator und die zur Verfügung stehende Nutfläche ist es unter Umständen erforderlich, die Anzahl an Teilleitern einer Windung um eins zu reduzieren. Dieses Vorgehen ist für die Fertigung notwendig, verringert aber die effektive Leiter-Querschnittfläche. Dadurch erhöhen sich der Wicklungswiderstand und infolgedessen auch die ohmschen Stromwärmeverluste. Um diesen Umstand zu bewerten, wird bei einer Referenzmaschine mit ähnlichem Aufbau das Temperatur-Zeit-Verhalten bei Variation der Stromdichte bzw. der ohmschen Stromwärmeverluste in der Statorwicklung aufgezeichnet (vgl. Abbildung 30). Die Temperatursensoren in Nut und Wickelkopf zeigen einen deutlich höheren Temperaturgradienten bei einer Steigerung der Stromdichte von 16 A/mm² auf 19 A/mm². Die bis zum Erreichen der festgesetzten Grenztemperatur verstrichenen Zeiten können gegenüber gestellt werden. Dies erlaubt eine Worst-Case-Abschätzung für die Referenzmaschine.

Ein weiterer Aspekt, der mithilfe der Referenzmaschine untersucht wurde, ist das Auftreten von Kreisströmen. Die Dreieckschaltung der Statorwicklung bietet, wie oben erwähnt, Vorteile bei der Fertigung und beim benötigten Bauraum. Allerdings ermöglicht diese auch einen zusätzlichen Stromfluss über die zu einem geschlossenen Strompfad verketteten Wicklungen der drei Phasen. Asymmetrien können, z. B. durch Bauteiltoleranzen hervorgerufen, zur Einprägung zusätzlicher Ströme und infolgedessen zusätzlichen ohmschen Stromwärmeverlusten innerhalb der Statorwicklung führen. Messungen der Strangströme mit Rogowski-Spulen legen nahe, dass die durch Kreisströme hervorgerufenen Stromwärmeverluste im niedrigen einstelligen Prozentbereich der regulären Stromwärmeverluste liegen und als unkritisch bewertet werden können. Da die Referenzmaschine zu großen Teilen mit den gleichen Fertigungsverfahren (den Wickelprozess ausgenommen) hergestellt und konstruktiv ähnlich aufgebaut ist, können die gewonnenen Erkenntnisse als übertragbar angenommen werden.

5.3.1 Thermische Simulation

Die Durchführung von thermischen Simulationen bildet einen weiteren Baustein bei der thermischen Auslegung. Sie erlaubt es, mit einem vergleichsweise geringen Aufwand das Temperaturverhalten der ausgelegten Maschine nachzubilden und so die zu erwartende Wärmeverteilung unter einer Vielzahl von Betriebsbedingungen zu ermitteln, ohne diese in langwierigen und kostenintensiven Messreihen an Prototypen zu erfassen. Allerdings stellt auch die Entwicklung genauer Simulationsmodelle eine Herausforderung in sich dar. Nachfolgend wird zunächst das erstellte Simulationsmodell beschrieben, bevor näher auf die Bestimmung spezieller Modellparameter eingegangen wird. In einem späteren Kapitel (vgl. 9.2 Validierung der Simulationsmodelle) erfolgt eine Überprüfung des Modells anhand von Messungen an Prototypen.

Grundlage der thermischen Modelle bildet die Wärmeübertragung basierend auf dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik:

$$\Delta E = Q + W + E_M \quad \text{Formel 9}$$

[Vdi-13]. Die Energieänderung ΔE eines Systems, welches durch eine Systemgrenze von seiner Umgebung abgegrenzt ist, erfolgt durch den Austausch von Energie in Form von Wärme Q , Arbeit W und Energie E_M , die mit einer Masse M über die Systemgrenze transportiert wird. Wärmetransport bezeichnet den Vorgang, der aufgrund einer Temperaturdifferenz übertragende Energie als Wärme Q . [Vdi-13]

Weiterhin wird die je Zeiteinheit übertragende Wärme als Wärmestrom \dot{Q} mit

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} \quad \text{Formel 10}$$

und der auf ein Flächenelement bezogene Wärmestrom wiederum als Wärmestromdichte \dot{q} mit

$$\dot{q} = \frac{d\dot{Q}}{dA} \quad \text{Formel 11}$$

bezeichnet. [Vdi-13]

Wärmeübertragung findet entweder durch Kontakt oder durch Strahlung statt. Bei Kontakt zweier Körper wird zwischen Wärmeleitung für Körper, die sich relativ zueinander in Ruhe befinden und Konvektion, bei der sich zwei Körper relativ zueinander in Bewegung befinden, unterschieden [Bol-18]. Als Wärmestrahlung wird die in elektromagnetischen Wellen an seine Umgebung abgegebene Energie eines Körpers bezeichnet. Sie ist nicht an ein Medium gebunden [Vdi-13].

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \quad \text{Formel 12}$$

Das Grundgesetz der Wärmeleitung nach Fourier beschreibt, wie der Wärmestrom \vec{q} immer in Richtung des Temperaturgefälles gerichtet ist. λ ist hierbei der materialabhängige Proportionalitätsfaktor der Wärmeleitfähigkeit. [Bol-18]

Wird das Fouriersche Gesetz mit dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik kombiniert, resultiert die für Wärmeleitungsmechanismen zentrale Wärmeleitungsgleichung [Bol-18]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T + Q \quad \text{Formel 13}$$

Hierbei ist ρ die Dichte und c die spezifische Wärmekapazität des beinhalteten Mediums. ΔT repräsentiert den Laplace eines Temperaturfeldes T und Q die durch Verluste hervorgerufene Wärme je Volumenelement, welche örtlich und zeitlich variieren kann.

Da eine analytische Lösung der Wärmeleitungsgleichung bei der gegebenen Komplexität von Geometrie und Materialien für die entwickelte Maschine nicht möglich ist, kommen hier üblicherweise numerische Verfahren oder die sogenannten Wärmequellennetze zum Einsatz. Beide Ansätze weisen Vor- und Nachteile auf. Während numerische Verfahren eine detaillierte räumliche Auflösung der Temperatur erlauben, ist ihre Berechnung für dreidimensionale Modelle schnell zu aufwändig. Für den Einsatz echtzeitfähiger Modelle und wenn es um Wirkungszusammenhänge bei der Optimierung eines Entwurfs geht, sind Wärmequellennetze daher besser geeignet. Hier muss allerdings berücksichtigt werden, dass sie für die einzelnen modellierten Maschinenbereiche lediglich eine Durchschnittstemperatur angeben. [Bol-18]

Für das Projekt NeWire wird als primäres Tool zur Auslegung ein Wärmequellennetz entwickelt, welches die Temperaturentwicklung innerhalb der Maschine sowohl für stationäre Arbeitspunkte als auch das dynamische Temperaturverhalten nachbildet. Wärmequellennetze verwenden hierzu eine Analogie zum elektrischen Strömungsfeld [Fis-17]. Mehrdimensionale Wärmeflüsse werden dabei als eindimensionale Wärmepfade dargestellt, welche die als Einzelkörper abgebildeten Bereiche einer Maschine miteinander verbinden [Bol-18]. Die während des Betriebs entstehenden Einzelverluste – diese können grob in Eisen-, Kupfer-, Reibungs- und Ventilationsverluste unterschieden werden – führen am Ort ihres Auftretens zu einer lokalen Erwärmung der Maschine, welche sich über die Mechanismen der Wärmeleitung über die Komponenten und Bereiche hinweg ausbreitet. Temperaturunterschiede zwischen zwei angrenzenden Komponenten führen zu einem Wärmestrom in Richtung des Temperaturgefälles. Abhängig von der materiellen Zusammensetzung einer Komponente erwärmt diese sich unterschiedlich schnell.

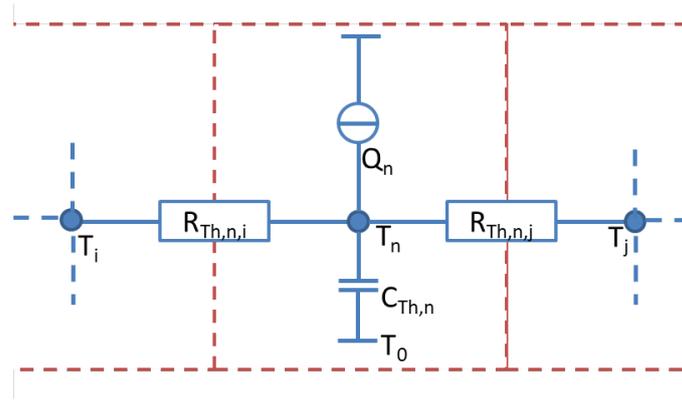


Abbildung 31: Einfaches Wärmequellennetz mit mehreren Temperaturknoten

In Abbildung 31 sind diese Zusammenhänge vereinfacht dargestellt. Die Temperaturknoten T_i, T_n, T_j spiegeln die mittleren Temperaturen dreier angrenzender Komponenten bzw. Bereiche innerhalb der Maschine wieder. C_{th} entspricht der thermischen Kapazität eines Bereichs und Q_n den als Wärmestrom eingprägten Verlusten in diesem Bereich. Angelehnt an den elektrischen Widerstand ist der thermische Widerstand R_{Th} zwischen zwei angrenzenden Bereichen definiert als [Vdi-13]:

$$R_{th,n,i} = \frac{\Delta T_{n,i}}{\dot{Q}_{n,i}} \quad \text{Formel 14}$$

Für den einfachen Fall eines homogenen festen Körpers der Länge l mit dem Querschnitt A berechnet sich der thermische Widerstand zu [Fis-17]:

$$R_{th} = \frac{l}{\lambda \cdot A} \quad \text{Formel 15}$$

Die Berechnung des thermischen Widerstands für komplexere Geometrien, Kontaktflächen oder Grenzschichten von Festkörpern zu einem Fluid (z. B. der Umgebungsluft) wird u. a. in [Vdi-13], [Fis-17] und [Bol-18] beschrieben. Der Wärmeübergang im Luftspalt der rotierenden Maschine stellt einen Spezialfall dar, auf den in [How-12] näher eingegangen wird.

Auf der Basis dieser Grundlagen wird ein Wärmequellennetz für die auszulegende Asynchronmaschine entwickelt, welches die Berechnung der Temperaturentwicklung in allen kritischen Komponenten der Maschine erlaubt. Die Simulation berücksichtigt eine asymmetrische Entwicklung der Temperaturen von A-Seite zu B-Seite durch eine Segmentierung des Aktivteils der Maschine in mehrere Teilabschnitte des Rotor- und Statorblechpakets. Weiterhin ist die Simulation so ausgelegt, dass die Temperaturentwicklung sowohl für stationäre als auch dynamisch wechselnde Betriebszustände zeitlich dargestellt werden kann.

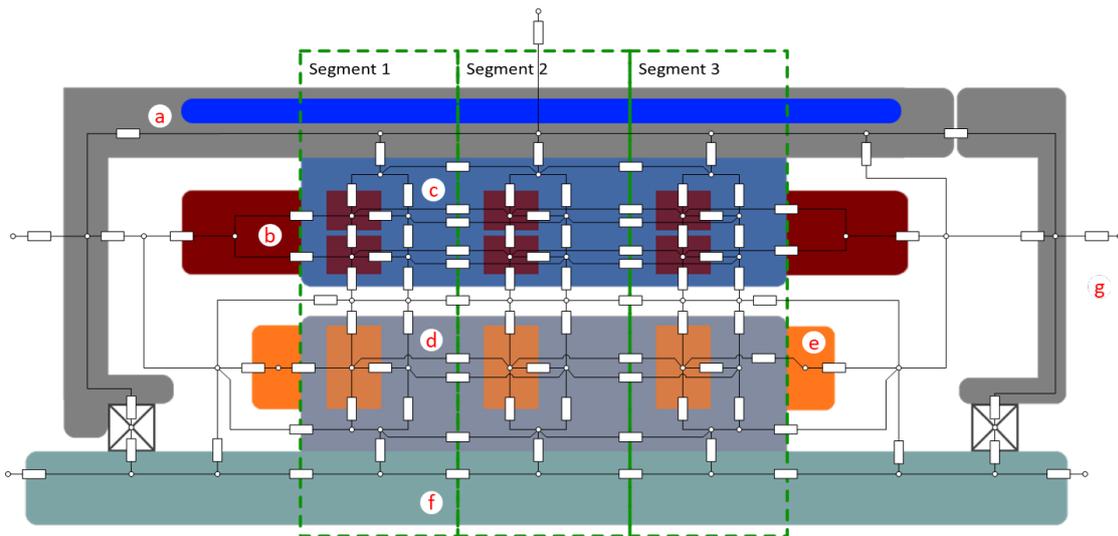


Abbildung 32: Thermisches Netzwerkmodell der E-Maschine

- a) Gehäuse & Kühlkanal
- b) Ständerwicklung
- c) Ständerblechpaket
- d) Rotorblechpaket
- e) Kurzschlusskäfig
- f) Rotorwelle
- g) Umgebung

Das resultierende Netzwerk aus Temperaturknoten, welche die mittlere Temperatur eines geometrisch abgegrenzten Bereichs spiegeln, und thermischen Widerständen, die den Wärmefluss zwischen zwei Bereichen ermöglichen, ist in Abbildung 32 dargestellt. Es bildet den internen Aufbau der auszulegenden Asynchronmaschine nach (vgl. Abbildung 29). Die Blechpakete von Rotor und Stator mit den Stäben des Kurzschlusskäfigs bzw. den Schichten der Statorwicklung sind in je drei axial angegliederte Segmente unterteilt. Insgesamt fünf Widerstände (drei umliegend am Gehäuse und zwei an den Abschlüssen der Motorwelle) erlauben den Wärmeaustausch mit der Umgebung. Um die Übersicht zu wahren, entfällt die Abbildung der Elemente wie der einem Bereich zugeordneten thermischen Kapazität (vgl. Abbildung 31).

5.3.2 Experimentelle Parameterbestimmung

Eine Herausforderung bei der Erstellung des thermischen Modells stellen einzelne thermische Widerstände und die zu ihrer Berechnung benötigten Koeffizienten dar. Die Wärmeleitfähigkeit der aus einem Verbund von Kupfer, Isolationslack, Isolationspapieren und Imprägnierharz bestehenden Wicklung sowie vom Fertigungsprozess beeinflusste Kontaktwiderstände an den Grenzflächen des Statorblechpakets sind analytisch aufgrund unbekannter Parameter (z. B. Anpressdruck, Materialhärte, Positionstreuung der Einzelleiter etc.) schwer berechenbar [Oec-18], [Phu-18]. Um die betreffenden thermischen Widerstände dennoch zu bestimmen, werden die gesuchten thermischen Eigenschaften entweder mithilfe eines Vergleichs zwischen Simulation und speziell ausgewählten Messungen an einem Prototypen angenähert (siehe dazu 9.2 Validierung der Simulationsmodelle) oder experimentell ermittelt.

Für den Fall der thermischen Widerstände zwischen Wicklungsschichten und Temperaturnoten des Statorblechpakets wurden die Wärmeleitfähigkeit innerhalb der Nut quer zur Wicklung sowie des Wärmedurchgangskoeffizienten an der Nutisolation unter Verwendung eines eigens dafür angefertigten experimentellen Aufbaus bestimmt (siehe Abbildung 33).

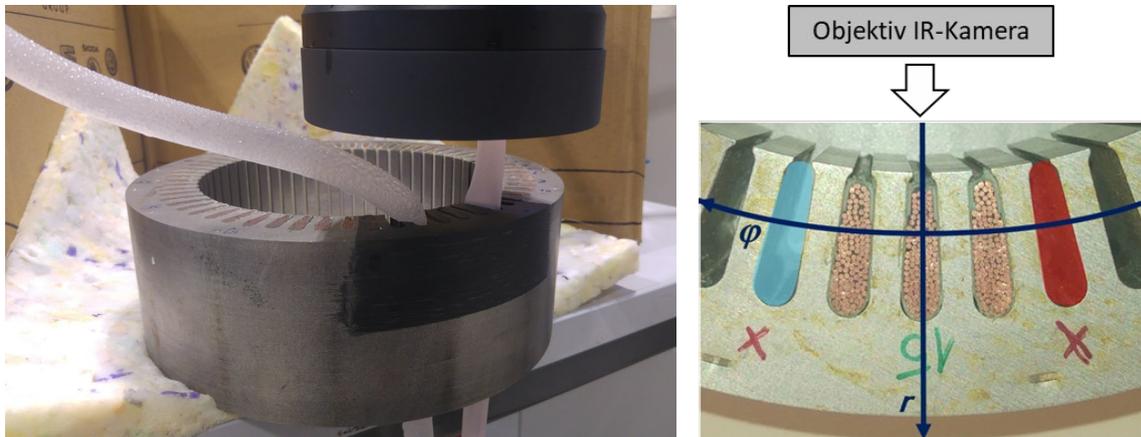


Abbildung 33: Teilstück eines Stator-Musters; Versuchsaufbau (links), Ansicht von oben (rechts)

Bei einem Stator-Muster werden die Wickelköpfe abgetrennt und in zwei freien Nuten Silikonschläuche angebracht. Der eine führt heißes, der andere Schlauch führt kaltes Wasser. Hierdurch entsteht ein Wärmefluss durch die dazwischenliegenden, mit der Wicklung gefüllten Nuten. Die sich nach einiger Zeit konstant einstellende Temperaturverteilung wird mit einer Infrarotkamera an der Oberfläche des Schnittmusters erfasst. Um einen Wärmefluss an die Umgebung zu minimieren, ist der Stator im finalen Aufbau außer auf den Ausschnitt für die Aufnahme thermisch isoliert.

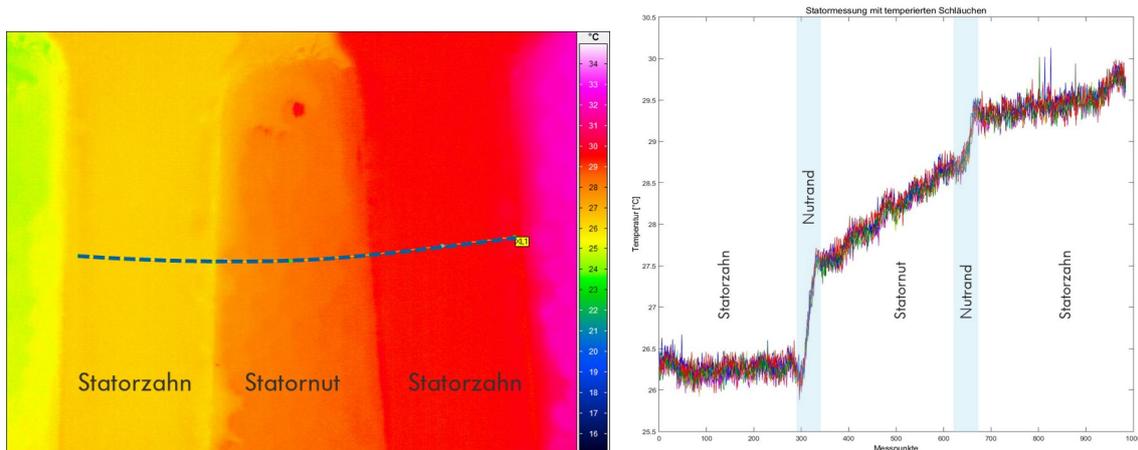


Abbildung 34: Temperaturentwicklung; Übersichtsbild (links), Temperaturen entlang Linie (rechts)

Abbildung 34 zeigt den Temperaturverlauf zwischen den temperierten Schläuchen. Es wird ein konstanter Wärmefluss entlang des Winkels φ angenommen (vgl. Abbildung 33). Allgemein kann der Wärmefluss in der Form beschrieben werden:

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T = -\lambda \left(\vec{e}_r \frac{\partial}{\partial r} + \vec{e}_\varphi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \vec{e}_z \frac{\partial}{\partial z} \right) T \quad \text{Formel 16}$$

$$q_\varphi = -\lambda \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \quad \text{Formel 17}$$

Im Bereich eines Statorzahns wird hieraus

$$q_{\varphi,Fe} = -\lambda_{Fe} \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \quad \text{Formel 18}$$

mit λ_{Fe} als der Wärmeleitfähigkeit des Elektroblechs. Für die Nutisolierung wird mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten α_{Iso} gerechnet:

$$q_{\varphi,Iso} = \alpha_{Iso} (T_{Iso,li} - T_{Iso,re}) \quad \text{Formel 19}$$

$(T_{Iso,li} - T_{Iso,re})$ entspricht hierbei dem Temperaturabfall über die Isolationsschicht.

Für das Kupfer-Harz-Gemisch der Wicklung wird ein mittlerer Wärmefluss angenähert als

$$q_{\varphi,CuH} = \frac{\lambda_{CuH}}{b_{CuH}} (T_{CuH,li} - T_{CuH,re}), \quad \text{Formel 20}$$

mit b_{CuH} als Breite der Nut, λ_{CuH} als der gesuchten Wärmeleitfähigkeit der Wicklung und $(T_{CuH,li} - T_{CuH,re})$ als dem azimutalen Temperaturabfall über der Nut. Für einen konstanten Wärmefluss am betrachteten Radius entsprechen der Wärmefluss in der Isolationsschicht und der Nut dem Wärmefluss im Elektroblech:

$$q_{\varphi,Fe} = \vec{q}_{\varphi,Iso} = \vec{q}_{\varphi,CuH} \quad \text{Formel 21}$$

Außer den gesuchten Größen können alle Variablen aus der Messung und dem Versuchsaufbau bestimmt werden. Aus mehreren Messungen wird ein Mittelwert für die Wärmeleitfähigkeit innerhalb der Nut mit

$$\lambda_{CuH} = 3.65 \frac{W}{m \cdot K} \quad \text{Formel 22}$$

und für den Wärmedurchgangskoeffizienten der Nutisolierung mit

$$\alpha_{Iso} = 708.8 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad \text{Formel 23}$$

berechnet. Diese Werte dienen als Grundlage für die Berechnung des Wärmequellennetzes. Sie werden im weiteren Projektverlauf während der Modellvalidierung verifiziert.

5.4 FERTIGBARKEITSUNTERSUCHUNGEN

Nachdem alle Anforderungen an die Maschine ausgearbeitet wurden und die elektrische und thermische Auslegung gestartet werden konnte, wurde mit der Fertigbarkeitsuntersuchung begonnen. Im Rahmen dieser wurden sämtliche Aktivkomponenten im CAD konstruiert, um anschließend die Fertigbarkeit der NeWire Maschine zu überprüfen.

Im Rahmen eines Designfreezes wurden alle wichtigen Größen der Aktivkomponenten festgelegt. Das Statorblechpaket ist, wie in Tabelle 8 dargestellt, definiert.

Tabelle 8: Statorabmaße

Bemerkung	
Blechdicke	0,3mm
Material	NO30-16HS
Paketierverfahren	Backlack
Anzahl Nuten	48
Durchmesser Stator außen	210 mm
Durchmesser Stator innen	138 mm
Lamellenpaketlänge	110 mm

Auf Basis dieses Stators muss der Zusammenbau des Rotors festgelegt werden. Die aktive Länge des Rotorblechpaketes sollte im Idealfall die gleiche Länge wie das Statorblechpaket aufweisen. Der Luftspalt zwischen dem Außendurchmesser des Rotorblechpaketes und des Innendurchmessers des Statorblechpakets wird auf 1 mm festgelegt. Somit ergeben sich die Maße für den Rotor, die in Abbildung 35 dargestellt sind.

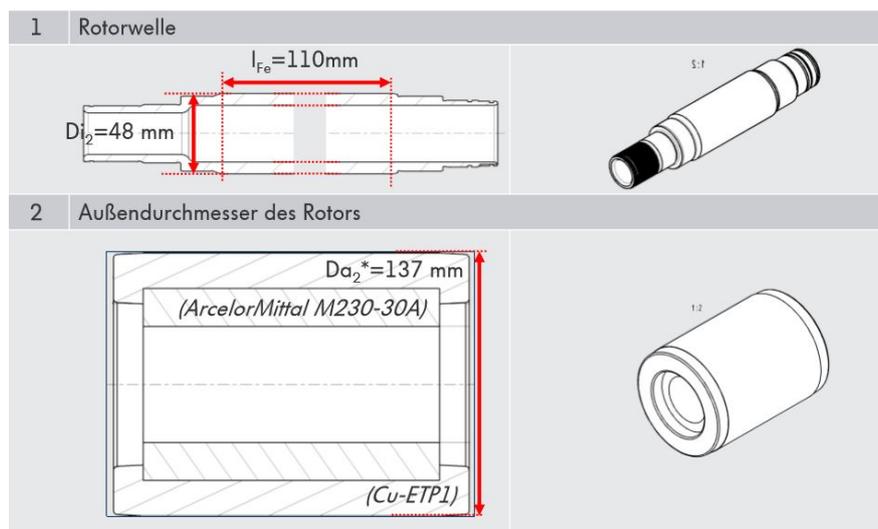


Abbildung 35: Rotordetails

Die Anbindung zum Motorgehäuse wird über die Lagerung der Rotorwelle realisiert. Aufgrund des sehr hohen Aufwandes bei der Konstruktion eines Gehäuses für eine E-Maschine, wurde für die NeWire-Maschine auf ein vorhandenes Gehäuse eines anderen Projektes

zurückgegriffen. Für die Fertigbarkeit der elektrischen Maschine mussten demzufolge einige Kleinigkeiten angepasst werden. Unter anderem wurde fehlende axiale Länge des Gehäuses mittels eines Distanzringes ausgeglichen. Die Abbildung 36 zeigt den Aufbau.

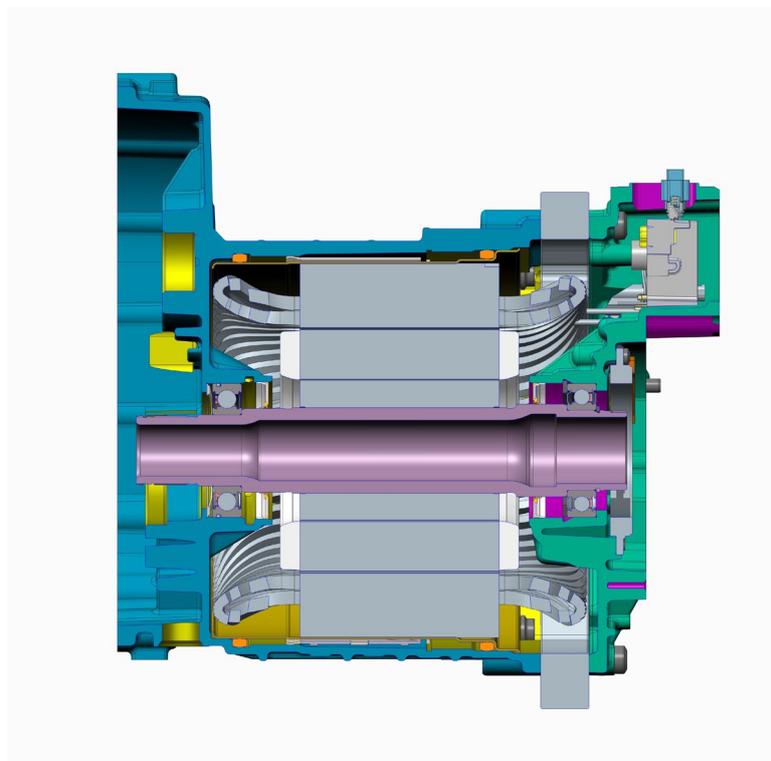


Abbildung 36: Schnittbild E-Maschine

Beim Zusammenbau der Maschine müssen sämtliche Abstände zwischen Gehäuse und Stator bzw. Rotor eingehalten werden, um die erforderlichen Luft und Kriechstrecken einzuhalten. Als kritische Punkte sind u. a. der Abstand zwischen Kurzschlussläufer und Gehäuse oder auch Wickelkopf zu Gehäuse zu nennen. Die Abstände konnten zwar gewährleistet werden, jedoch musste eine schlechtere Anbindung des Stators an das Kühlsystem in Kauf genommen werden. Der Stator wird bei dem gewählten Kühlsystem in eine Hülse gefügt, die sowohl für die Positionierung im Gehäuse als auch für die Anbindung zum Kühlmedium zuständig ist. Diese Hülse wird samt Stator an das Gehäuse geschraubt. Zwischen den Motorgehäuse und der Hülse befindet sich das Kühlmedium, welches die Wärme abträgt. In der Abbildung 36 lässt sich erkennen, dass die Hülse nicht die komplette Statorlänge abdeckt. Eine optimale Anbindung des Stators an das Kühlsystem wäre grundsätzlich möglich gewesen, für die in diesem Projekt getätigten Untersuchungen war dies aber nicht notwendig.

6 Entwicklung eines Automatisierungskonzeptes

Vorgehensweise der Konzeptentwicklung

Das Vorgehen zur Entwicklung eines Automatisierungskonzepts orientiert sich an dem Prozessmodell der VDI 2221 (1993). Dieses beschreibt die vier Phasen beim Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte und Systeme. Zur Übersicht wurde die unter Abbildung 37 dargestellte Grafik eingeführt, welche die vier Phasen darstellt und im weiteren Verlauf dieses Berichtes die Zugehörigkeit der Kapitel zu den Phasen der Produktionssystementwicklung aufzeigt. Die Abbildung 38 stellt den ausführlichen Zusammenhang dar. [Fel 13]



Abbildung 37: Phasen der Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte nach VDI 2221

Phase 1: In der ersten Phase wird die Aufgabenstellung geklärt und präzisiert. Ziel dieser Phase ist es, eine Anforderungsliste zu erstellen, in der alle Wünsche und Forderungen an das Projekt festgehalten werden.

Phase 2: Die zweite Phase des Konstruktionsprozesses, die Konzipierungsphase, baut auf der Anforderungsliste der ersten Phase auf. Hier soll eine Gesamtfunktion gebildet werden, die zunächst in technisch relevante Teilfunktionen gegliedert wird. Nach dem Suchen der Wirkprinzipien der Teilfunktionen können diese zu prinzipiellen Lösungen ausgearbeitet werden. Anschließend werden die Konzepte nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien bewertet.

Phase 3: Das in der Konzipierungsphase priorisierte Konzept wird weiterverfolgt und in der dritten Phase mit Hilfe eines CAD Systems zu einem Entwurf ausgearbeitet.

Phase 4: Die vierte Phase, welche die Ausarbeitung des Entwurfs inkludiert, umfasst das Erarbeiten aller nötigen Produktdokumentationen. Technisch wichtige Merkmale der Anforderungsliste werden im Nachfolgenden aufgegriffen.

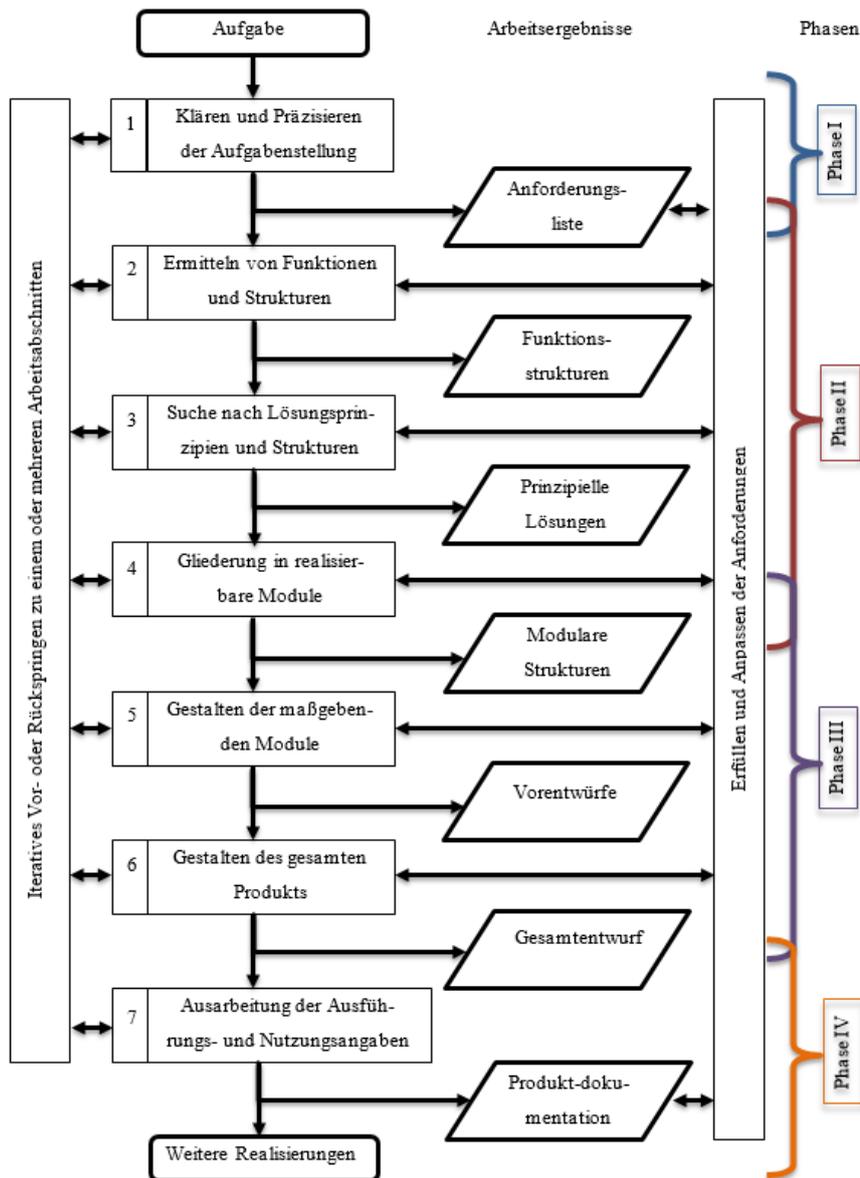


Abbildung 38: Prozessmodell nach VDI 2221: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren [Fel 13]

6.1 DEFINITION DER AUFGABENSTELLUNG



In der Anforderungsliste, siehe Auszug in Abbildung 39 und detaillierte Darstellung im Anhang A1, werden alle ermittelten Anforderungen gesammelt und in Wünsche und Forderungen klassifiziert. Die beschriebenen Forderungen sind die Merkmale oder Funktionen, die das zu entwickelnde Produkt aufweisen muss. Die Wünsche sind für den Kunden nicht zwingend erforderlich, sollten aber trotzdem mitberücksichtigt und angestrebt werden. Für einen strukturierten Aufbau der Anforderungsliste dient die *Leitlinie mit Hauptmerkmalsliste*, diese ermöglicht durch Assoziationen weitere Erkenntnisse zu den betreffenden

Punkten zu gewinnen und hilft dabei, darauf basierend neue Anforderungen zu formulieren. [Fel 13]

Projekt: NewWire		Produkt: Prozess - Einbringen		Verantwortliche: Janna Hoffmann, Manuel Peter, Florian Sell-Le Blanc, Nicolas Kehl, Alexander Wist, Maximilian Halwas, Lando Weiße		
Nr.	Datum	F/W	Hauptmerkmal	Anforderung	Quantifizierung	Bemerkung
25	22.06.2017	W	Geometrie	Drahtablage in der Nut	kreuzungsfrei	
26	22.06.2017	W	Geometrie	Drahtablage in der Nut	bündig zum Nutgrund und zur Nutflanke	
27	22.06.2017	F	Stoff	Drahtwerkstoff	Cu-ETP	

Abbildung 39: Auszug der Anforderungsliste

Funktionelle Betrachtung und Abstraktion auf Funktionsstrukturen

Zunächst sind als ein elementarer Schritt zur Konzepterstellung eine Reduktion auf die Kernmerkmale und eine nachfolgende Abstraktion der Anforderungen auf eine prägnante Aussage durchzuführen. In aktuellen Literaturen gibt es grundsätzlich zwei Sichten der Funktionsstruktur, die *Input-Output-Sicht* und die *hierarchische Sicht*. Bei der sogenannten *Input-Output-Sicht* werden dem Fluss der Haupt- bzw. Teilfunktionen definierte Ausgangsgrößen zugeordnet. In den nachfolgenden Abbildung 40 und Abbildung 41 sind exemplarisch die Funktionsstrukturen für einen Schablonenwickler und einer Einbringmechanik dargestellt. [Fel 13]

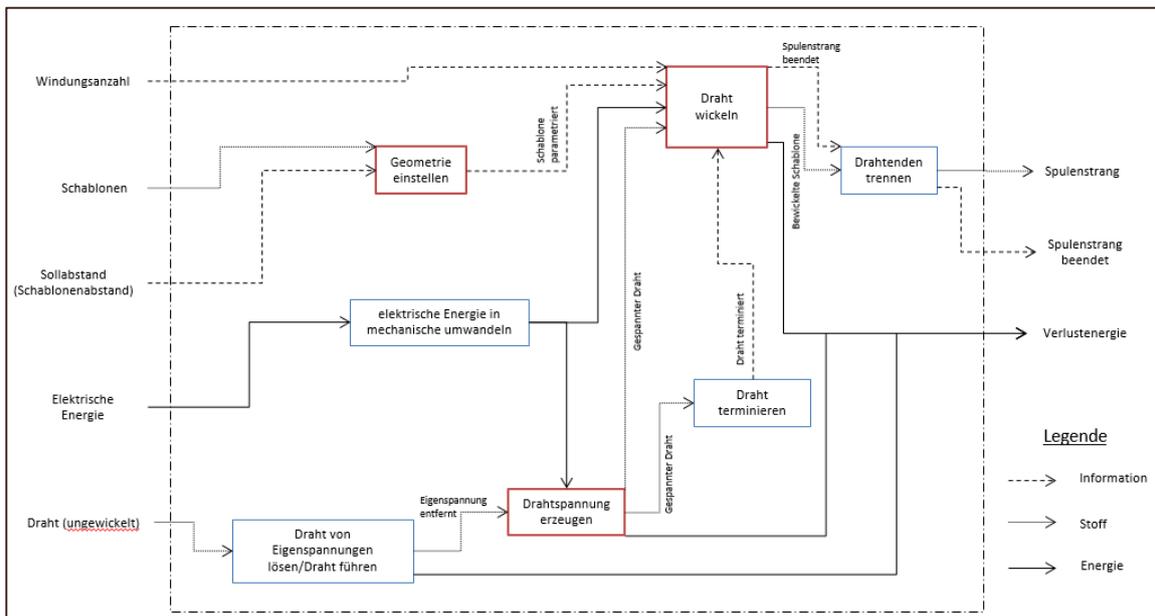


Abbildung 40: Funktionsstruktur für einen Schablonenwickler

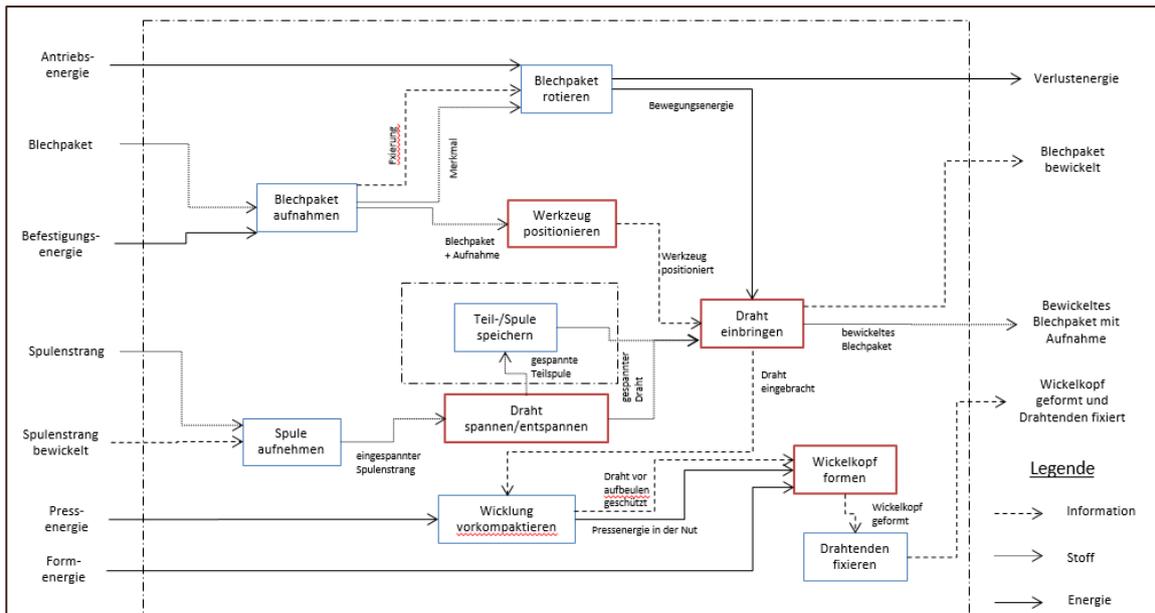


Abbildung 41: Funktionsstruktur zum Einbringen der Drähte (Einbringmechanik)

Prozessverständnis

Zum Prozessverständnis wurden die Arbeitsschritte des manuellen Träufelwickelns analysiert und mithilfe der Handhabungssymbole nach VDI 2860 detailliert beschrieben. Hierbei wurde jedem Handhabungs- oder Prozessschritt ein lösungsneutrales Symbol zugeordnet, um den gesamten Prozess zu beschreiben. Auf dieser Beschreibung basierend wurden in einem Kreativitätsworkshop nach der Brainwriting-Methode und der Analogiemethode neue Konzepte erarbeitet und mithilfe einer Clusteranalyse in realisierbare Module zur Teilfunktionserfüllung gegliedert (siehe Abbildung 42). Diese realisierbaren Module wurden dann in einem morphologischen Kasten zusammengefasst. In Expertengesprächen wurden aussichtsreiche Lösungskombinationen ausgewählt und mithilfe einer Nutzwertanalyse bewertet. Die höchstbewerteten Lösungskombinationen wurden daraufhin in Grobkonzepten zusammengefasst und nochmals ganzheitlich bewertet.

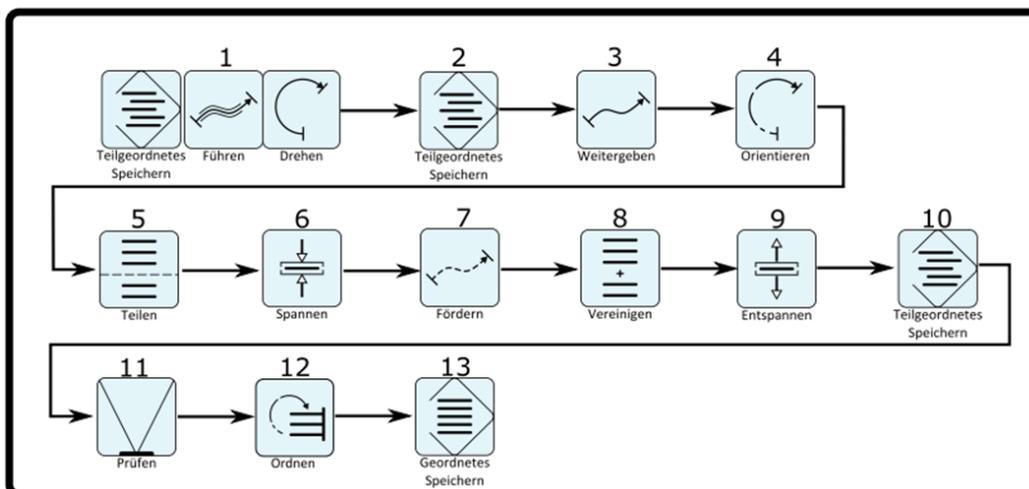


Abbildung 42: Prozessfolge des händischen Träufelwickelverfahrens

Ableitung der Teilfunktionen:

- 1 Spulenstrang wickeln.
- 2 Spulenstrang ist teilgeordnet gespeichert.
- 3 Spulenstrang wird vom Arbeiter aufgenommen und zum Einbringen durch den Stator transportiert.
- 4 Spulenstrang wird so orientiert, dass dieser oberhalb der zu befüllenden Nut liegt.
- 5 Einzelne Drähte werden durch eine Träufelbewegung vom Strang abgetrennt.
- 6 Der Strang wird von beiden Seiten vom Arbeiter gespannt.
- 7 Die einzelnen Drähte werden durch den Nutschlitz in die Nut gefördert.
- 8 In der Nut werden die einzelnen Drähte wiedervereinigt.
- 9 Die Spannung wird vom Draht weggenommen.
- 10 Die Drähte liegen in einem teilgeordneten Zustand in der Nut.
- 5 → 10 Wiederholung der Prozessschritte bis sich der gesamte Spulenstrang in der Nut befindet.
- 11 Der eingebrachte Spulenstrang wird auf Kreuzungsfreiheit überprüft.
- 12 Es erfolgt ggf. ein Ordnen der einzelnen Drähte.
- 13 Abschließend liegt ein geordneter Zustand innerhalb der Nut vor.

Anschließend: Wiederholung des Ablaufs mit der anderen Spulenseite.

6.2 KONZEPTENTWICKLUNG & SEKUNDÄRFUNKTIONEN



Konzeptfindung durch Kreativitätsworkshops und morphologischer Kasten

Aufbauend auf den Funktionsstrukturen wurde die Suche nach Wirkprinzipien vorangetrieben. Hierfür wurden konventionelle, intuitive und diskursive Lösungsmethoden hinzugezogen. Mit Hilfe des Einsatzes der 6-3-5 Kreativitätsmethode wurden in Kreativitätsworkshops verschiedene Teillösungen für die automatisierte Prozessfolge gefunden. Diese wurden in einen morphologischen Kasten übertragen; der unter Abbildung 43 gezeigte Ausschnitt zeigt mit den drei farblich markierten Pfaden drei mögliche Konzepte.

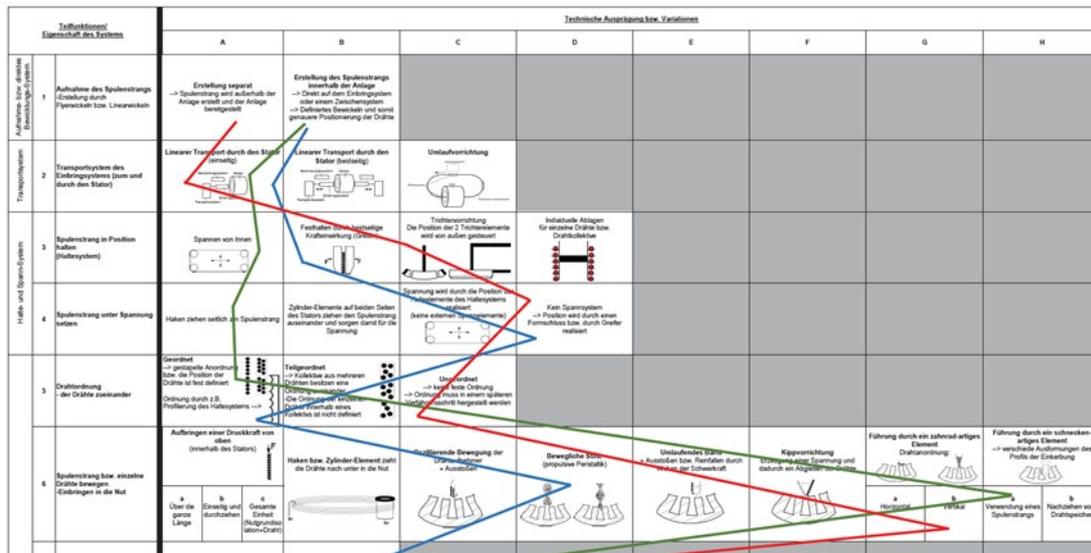


Abbildung 43: Ausschnitt aus dem morphologischen Kasten mit Teillösungen für das automatisierte Träufeln

Nach einer ersten Vorbewertung ergaben sich fünf betrachtenswerte Konzepte, die im Folgenden näher beschrieben werden. Nicht ausgewählte Konzepte sind beispielsweise nicht kombinierbare Teillösungen oder Gesamtlösungen, die den zuvor festgelegten Anforderungen und Spezifikationen eindeutig widersprechen. Die Konzepte wurden anhand des Einbringens in den Stator benannt und zusätzlich mit Großbuchstaben bezeichnet.

- **Drahtbündelmontage mit Schieber (Konzept A)**

Bei dem Konzept der Drahtbündelmontage (siehe Abbildung 44) werden die Drahtbündel, bzw. die Spulengruppen oder Teilspulen, aus einem vorgelagerten Werkzeug mittels eines Schiebers in die Nut des Statorblechpaketes übertragen. Hierbei ist die Länge des Schiebers größer als die des Blechpaketes, sodass die benötigte Kraft zur Montage der Drahtbündel an den beiden außenliegenden Kraftangriffspunkten übertragen werden kann. Weiterhin ist es notwendig, dass die Breite der Nuten in dem Übergabewerkzeug und der entsprechenden Schieber mit der Nutschlitzbreite übereinstimmt. Hierbei ist es denkbar, dass die Spulengruppen bereits mit Isolationsmaterial umschlossen sind, um die Kupferlackdrähte vor Beschädigungen durch Werkzeug- oder Blechpaketkontaktstellen zu schützen. Eine Kompaktierung des Wicklungsaufbaus in der Nut durch den Schieber ist ebenfalls denkbar.

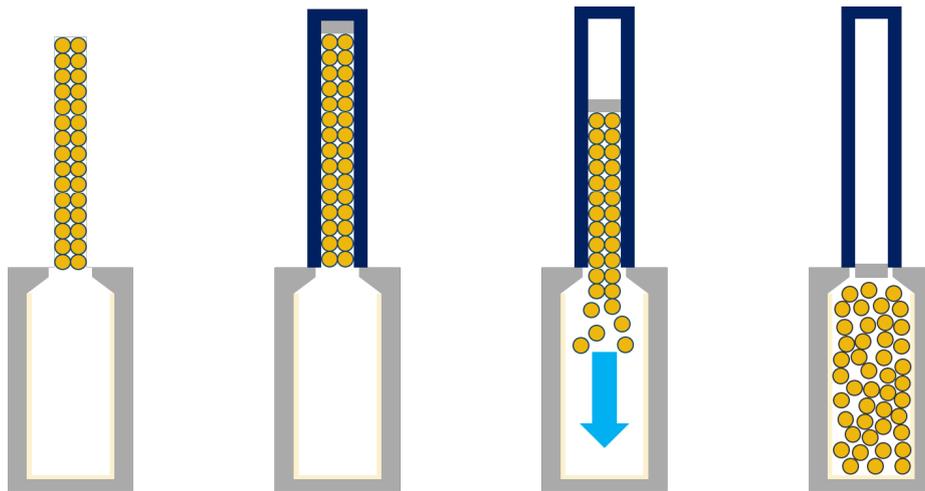


Abbildung 44: Graphische Darstellung Drahtlagenbündel (Konzept A)

- **Drahtlagenmontage (Konzept B)**

Das Konzept der Drahtlagenmontage zielt darauf ab, den Prozessschritt des „Träufelns“ durch die Bildung von vereinzelt Drahtlagen nachzubilden. Hierbei wird die angeordnete Drahtlage vor dem Nutschlitz um 90 Grad gedreht, um diesen aufgrund der geringeren Abmessung der Drahtlage in Höhen- als auch Breitenrichtung überwinden zu können, siehe Abbildung 45. Es ist eine äußere Greiferstruktur notwendig, um die Drahtlage bewegen zu können. Hierbei ist das Greifen von beiden Seiten der Nutöffnung vorgesehen. Eine Verbesserung des Lagenaufbaus durch Anwendung dieses Konzeptes im Vergleich zum händischen Träufelwickeln ist bei der Verwendung von vorverpressten oder verbackenen Drahtlagen möglich. Es ist denkbar, eine lagengenaue Wicklungsstruktur zu erzeugen.

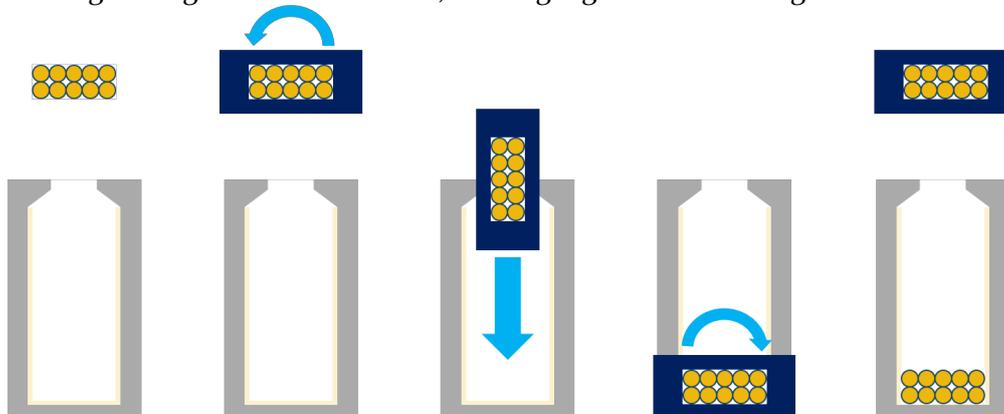


Abbildung 45: Graphische Darstellung Drahtlagenmontage (Konzept B)

- **Schnecke (Konzept C)**

Bei diesem Konzept werden die Drähte mit Hilfe von Schrauben in die Nuten transportiert (siehe Abbildung 46). Die Spulen werden außerhalb des Stators mit der Flyerwickeltechnik an einem Hakensystem direkt auf den Schrauben gewickelt, ehe diese in den Stator transportiert werden. Die Drähte befinden sich in den Gewindetälern der Schrauben und werden durch Drehen der Schrauben in die Nuten eingebracht. Beim ersten aufgebauten Prototyp wird die Spule manuell in die einzelnen Gewindetäler gewickelt.

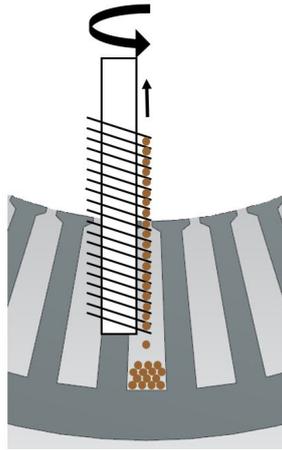


Abbildung 46: Graphische Darstellung Einbringung mit Schnecke (Konzept C)

- **Peristaltik (Konzept D)**

Wie bei den bis jetzt genannten Konzepten A, B und C werden die Spulen auch in diesem Konzept bereits außerhalb des Stators gewickelt. Zwei parallele Greifer nehmen die gewickelten Spulenstränge auf und transportieren diese in das Innere des Stators. Nachfolgend werden die Drähte durch eine treibende Wellenbewegung in die Nuten geführt. Mehrere Exzenterwellen drehen sich und bilden so abwechselnd engere und breitere Zwischenräume zwischen den Greifern. Dies führt zu einer treibenden wellenartigen Bewegung der Membran und die Drähte werden einzeln in Richtung der Nuten nach unten gefördert. Es ist wichtig, dass sich die fünf Wellen untereinander in eine Richtung drehen, während sich die gegenüberliegenden Reihen in die entgegengesetzte Richtung drehen. (siehe Abbildung 47)

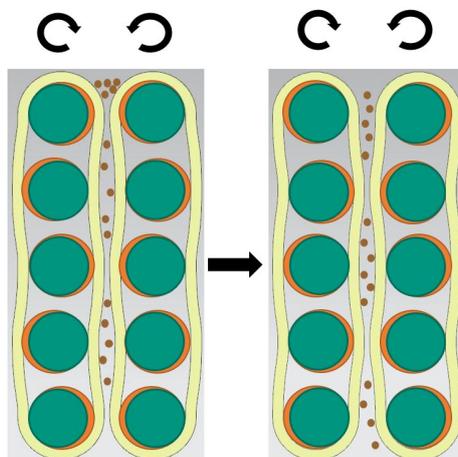


Abbildung 47: Graphische Darstellung der Einbringung mittels Peristaltik (Konzept D)

- **Zahnrad/Trichter (Konzept E)**

Bei diesem Konzept wird die Spule auch mit Hilfe der Flyerwickeltechnik außerhalb des Stators gewickelt. Die gewickelte Spule wird in ein Trichtersystem gegeben. Das Design des Trichters ist in Abbildung 48 dargestellt. Die gezahnten, radartigen Treiber des Einführsystems werden dann in Rotation versetzt, um die Drähte einzeln durch die Nut zu führen. Nachdem ein Draht die Nut passiert hat, wird er in der Nut mittels eines Anordnungssystems (hier nicht dargestellt) in einer definierten Position platziert.

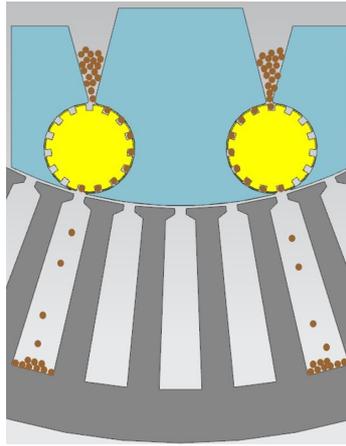


Abbildung 48: Graphische Darstellung Einbringung mittels Zahnrad/Trichter (Konzept E)

Konzeptauswahl und Bewertung nach VDI 2225

Die gebildeten Wirkstrukturen, welche im Anhang zu finden sind, werden nun mit Hilfe einer Werteskala bewertet. Da die bevorzugten Lösungen bereits zu mehreren Gesamtwirkstrukturen zusammengefasst wurden, können diese nun nach VDI-Richtlinie 2225 bewertet werden. Dazu werden zunächst die Bewertungskriterien anhand der Anforderungsliste formuliert und durch die Faktoren g_i gewichtet (vgl. [Gro 14] S. 29).

Formel 24: Gewichtungsfaktor VDI-Richtlinie 2225 (vgl. [Gro 14] S. 29)

$$g_i (\sum g_i = 1)$$

Um die technisch wertigste Lösung zu erhalten, wird eine Beurteilung anhand des Erfüllungsgrades der Bewertungskriterien über eine Bewertungsskala mit vier Punkten w_{ij} vorgenommen. Eine 4-Punkte-Lösung entspricht einer Ideallösung, eine 0-Punkte-Lösung dagegen einer gänzlich ungenügenden bzw. technisch nicht umsetzbaren Lösung. Die Teilwerte lassen sich durch wg_{ij} bestimmen und zu einem Gesamtwert Gw_j addieren.

Formel 25: Teilwertbestimmung VDI-Richtlinie 2225 (vgl. [Gro 14] S. 29)

$$wg_{ij} = g_i * w_{ij}$$

Formel 26: Gesamtwertbestimmung VDI-Richtlinie 2225 (vgl. [Gro 14] S. 29)

$$Gw_j = \sum_{i=1}^n g_i * w_{ij}$$

Nachdem die Bewertungskriterien anhand eines paarweisen Vergleichs priorisiert wurden, können dafür entsprechende Eigenschaftsgrößen definiert werden. Anhand dieser Eigenschaftsgrößen werden die Gesamtwirkstrukturen bewertet. Dafür eignet sich ein sogenanntes Urteilsschema. Das Urteilsschema ordnet der Eigenschaftsgröße einen Wert nach der Werteskala der VDI 2225 zu. Quantitative Angaben sind hier zu bevorzugen, da nach entsprechenden Annahmen Werte zugeordnet werden können. Die Abbildung 49 zeigt die komplette Bewertungsmatrix.

Wertskala nach Richtlinie VDI 2225 0 = unbefriedigend 1 = gerade noch tragbar 2 = ausreichend 3 = gut 4 = sehr gut (ideal)	Priorität	Eigenschaftsgrößen	Variante A (Drahtbündelmontage)			Variante B (Drahtlagenmontage)			Variante C (Schnecke)			Variante D (Peristaltik)			Variante E (Zahnrad/Trichter)						
			Einh.	Eigenschaft	Wert	Gew. Wert	Eigenschaft	Wert	Gew. Wert	Eigenschaft	Wert	Gew. Wert	Eigenschaft	Wert	Gew. Wert	Eigenschaft	Wert	Gew. Wert			
1	0,10	Axiale Länge	mm	3	0,3			2	0,2			1	0,1			2	0,2			3	0,3
2	0,06	-	-	2	0,12			3	0,18			3	0,18			4	0,24			2	0,12
3	0,09	Kreuzungsvermeidung	-	3	0,27			4	0,36			4	0,36			2	0,18			1	0,09
4	0,14	Eignung zur Mehrschichtwicklung	binär	3	0,42			3	0,42			3	0,42			3	0,42			3	0,42
5	0,11	Füllfaktor	elektrischer FF	%	3	0,33		4	0,44			3	0,33			2	0,22			2	0,22
6	0,11	Nutslitzbreite	Breite des Nutslitzes	mm	3	0,33		4	0,44			4	0,44			3	0,33			3	0,33
7	0,03	Prozessgeschwindigkeit	Dauer einer Teilschleife	s	4	0,12		1	0,03			1	0,03			1	0,03			2	0,06
8	0,06	Prozessparallelisierung	binär	3	0,18			1	0,06			1	0,06			1	0,06			1	0,06
9	0,06	Anwendung unterschiedlicher Drahtdurchmesser	Drahtdurchmesserbereich	mm	4	0,24		3	0,18			2	0,12			3	0,18			2	0,12
10	0,07	Bauraumabschätzung (Einbringer)	minimaler Statorinnendurchmesser	mm	2	0,14		0	0			0	0			0	0			3	0,21
11	0,10	Definierte Drahtlage	Positioniergenauigkeit	-	2	0,2		3	0,3			3	0,3			1	0,1			1	0,1
12	0,07	Komplexität Prozessablaufaktive Maschinenkomponenten	-	-	2	0,14		0	0			1	0,07			1	0,07			3	0,21
	1,00	Summe				32,00	2,85		28,00	2,61		25,00	#BEZUG!			22,00	#BEZUG!			23,00	2,03

Abbildung 49: VDI2225 - Bewertung der Einbringverfahren

Der Bewertungsmatrix ist zu entnehmen, dass das Konzept A – Drahtbündelmontage – in der Summe der gewichteten Werte die meisten Punkte erhalten hat. Das Konzept weist das größte Potenzial für die Entwicklung eines großserientauglichen Verfahrens auf. Dieses Konzept wurde daher vom Projektpartner Aumann in dem Projekt NeWwire weitergeführt und wird nachfolgend mit dem Namen **Automated Trickle Winding-Prozess** bezeichnet. Die übrigen Konzepte weisen, insbesondere unter Beachtung der großserientauglichen Kriterien, einen erhöhten Forschungsbedarf auf, um eine sichere, kostengünstige und zeitsparende Wicklungsmontage zu ermöglichen. Um die Forschungsbedarfe genauer zu identifizieren, wurden diese durch den Projektpartner wbk prototypisch umgesetzt, wie in Abbildung 50 dargestellt. Weitere Ausführungen sind unter [Pet-17] und [Hal-18_3] weiter erläutert. Allerdings ist besonders durch die lagengenaue und kompaktierte Wicklung von Verbesserungen der Produkteigenschaften einer elektrischen Maschine auszugehen. Deshalb wurde durch das wbk das Konzept B – Drahtlagenmontage – unter der Bezeichnung **Kompaktwickelprozess** weiterentwickelt.

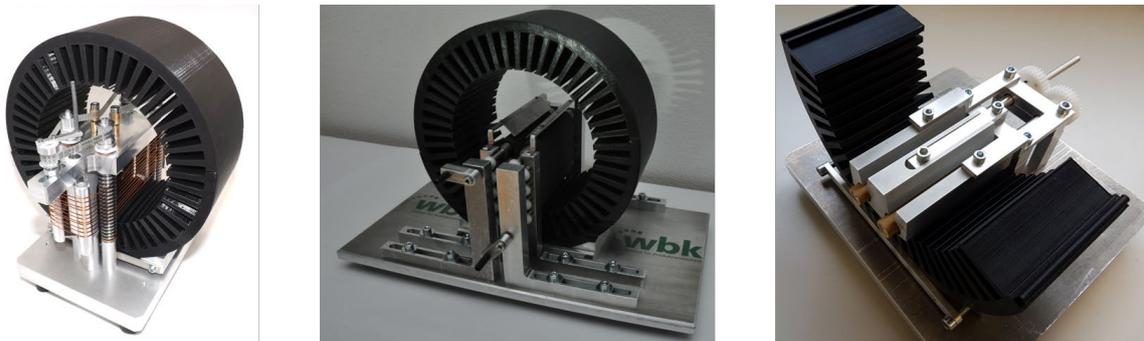


Abbildung 50: Prototypen verschiedener Einbringkonzepte: (links) Schnecke (Konzept C), (Mitte) Peristaltik (Konzept D), (rechts) Trichter/Zahnrad (Konzept E)

6.2.1 Automated Trickle Winding-Prozess

Umsetzung in Vorversuchen

Um eine generelle Machbarkeit der Wirkstrukturen zu untersuchen, wurden für die gebildeten Gesamtwirkstrukturen Vorversuche geplant. Nachfolgend wird kurz auf jeden Vorversuch eingegangen.

Montageschritt:

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Ablauf mit einem ersten Labormuster. Der Fokus des Versuches lag auf der Ermittlung der grundlegenden Montageeigenschaften von Spulenbündeln. Dafür wurde eine händisch gewickelte Spule mittels einer auf Schiebern basierenden Montagemechanik eingebracht.

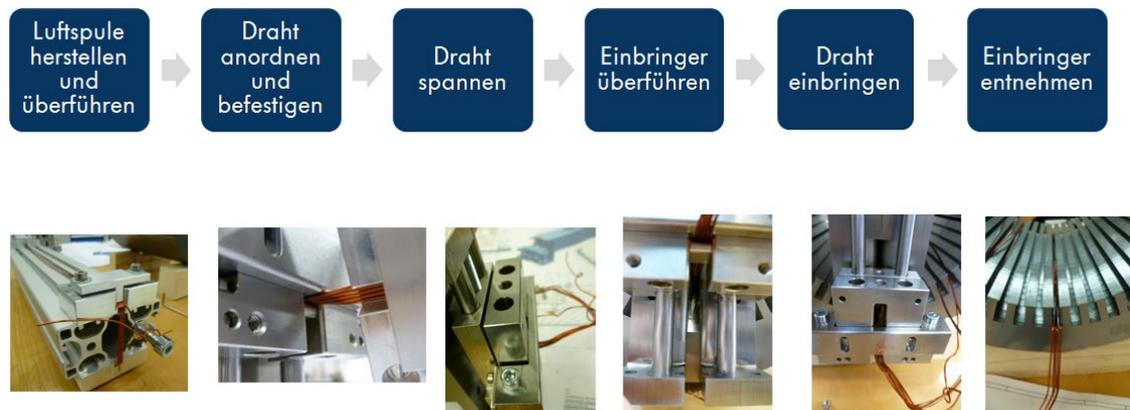


Abbildung 51: Ablauf des Labormusters zur Drahtlagenmontage

Beginnend mit der Montage einer Drahtlage wurde sowohl die Anzahl der Drähte als auch deren Ausgangsorientierung variiert, um die resultierenden Anforderungen an die Montage und die Grenzen zur exakten Positionierung innerhalb der Nut zu bestimmen.

Die erste zentrale Erkenntnis aus den Versuchen ist, dass das Einbringen mittels einer Schiebermontage sowohl für einzelne Drähte pro Lage als auch für größere Drahtbündel funktioniert. Allerdings besteht aufgrund der Montagetoleranz der Vorrichtung eine untere Grenze von 0,3 mm für den Drahtdurchmesser, weil sonst eine Klemmung im Spalt zwischen Schieber und Aufnahme riskiert wird. Generell ist es für den Prozess günstig, wenn eine möglichst kleine Passung gewählt wird, wobei für verteilte Wicklungen elektrischer Maschinen größerer Leistung (>1 kW) eher Drahtdurchmesser über 0,5 mm zum Einsatz kommen. Der für die Wickeltechnik zentrale Prozessparameter der Drahtspannung kann bei einer Bündelmontage nur bedingt beeinflusst werden. Ein Einbringen der Drahtzugkräfte kann nur mittig zum Drahtbündelquerschnitt erfolgen. Allerdings besteht das Problem, dass in der Regel nur einzelne Drähte gespannt werden, während andere Drähte nahezu spannungsfrei in der Vorrichtung liegen. Selbst bei einem gespannten Drahtbündel können Drahtkreuzungen innerhalb der Anordnung nicht vermieden werden. Durch die fehlende Drahtspannung wurde ebenfalls das Einbringen von Spulen gemeinsam mit einer Spulenisolation oder einem Deckschieber erfolgreich mit dem Labormuster erprobt. Dies hat den Vorteil, dass die Drähte nach der Montage aus der Nut nicht mehr herausbeulen können. Bzgl. des Montageergebnisses konnte festgestellt werden, dass Zonen innerhalb der Drahtbündel während der Montage beibehalten werden konnten. Eine definierte Positionierung von einzelnen Drähten war mit der Drahtbündelmontage jedoch nicht möglich.

In den Vorversuchen wurde gezeigt, dass die Montage von Einzelspulen funktioniert. Im Arbeitspaket der Prozessparallelisierung wurde mittels dem Konzept Drahtbündelmontage eine Prozessoptimierung durchgeführt. Hierfür wurde lösungsneutral hinterfragt, wie

es möglich ist, eine automatisierte Prozesskette zu erstellen, um ein Einbringen der Spulen zu ermöglichen. In dieser Phase entstand ein Automationskonzept, welches nachfolgend detailliert dargestellt wird.

Konzeptdetaillierung

Im Rahmen eines Expertenworkshops wurde auf Grundlage der vorhandenen Teillösungen durch den Projektpartner Aumann ein Konzept entwickelt, welches sich auch für die Anwendung in einer Großserienproduktion eignet. Grundlegend wurde die nachfolgend aufgeführte Prozesskette in vier Module aufgeteilt:

- Modul 1 Wickeln der Spulen (Abbildung 52)
- Modul 2 Spulenübergabe an die Übergabekette (Abbildung 52)
- Modul 3 Spulenübergabe an das Innenwerkzeug (Abbildung 53)
- Modul 4 Einbringen der Spulen in den Stator (Abbildung 54)

Modul 1:

Auf diesem Modul sollen die Spulen mit der Linearwickeltechnik hergestellt werden. Bei diesem indirekten Wickelverfahren, sprich die Spulen werden nicht am Funktionsort erzeugt, werden ein Wickelkern (Abbildung 52 - gräulich dargestellt) und eine Vielzahl an Abstandshalter (gelb dargestellt) benötigt. Die Abstandshalter werden auf dem Wickelkern positionsgenau angeordnet. In den entstehenden Lücken soll der Kupferlackdraht gewickelt werden.

Modul 2:

Das zweite Modul sieht vor, dass das Wickelwerkzeug aufgenommen wird. Anschließend wird der Wickelkern entnommen. Die Übergabekette, welches ein Übertragungswerkzeug darstellt, muss zu den Abstandshalter positioniert werden. Danach können die Spulen durch eine translatorische Bewegung in die Übergabekette transportiert werden.

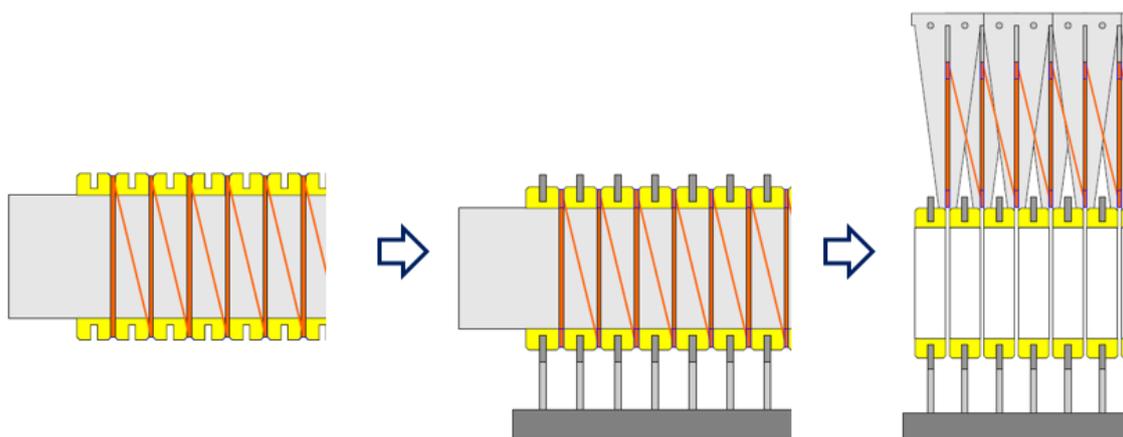


Abbildung 52: Modul 1&2: Wickeln der Spulen & Spulenübergabe an die Übergabekette

Modul 3:

Wenn die entsprechende Anzahl der Spulen in der Übergabekette vorhanden ist, können diese um das Innenwerkzeug bewegt werden. Das Innenwerkzeug stellt ein weiteres Übertragungswerkzeug dar. Dieses besitzt Öffnungen, um die Spulen aufzunehmen. Nach dem die Übergabekette komplett um das Innenwerkzeug rotiert ist, können die ersten Teile der Spule in das Innenwerkzeug übergeben werden. Um das gewünschte Wickelschema herzustellen, müssen das Innenwerkzeug oder die Übergabekette verdreht werden. Die Spulenweite entscheidet, welchen Rotationswinkel für das Verdrehen eingehalten werden muss. Nachdem das Innenwerkzeug oder die Übergabekette richtig zueinander positioniert sind, kann der zweite Teil der Spule in das Innenwerkzeug übergeben werden.

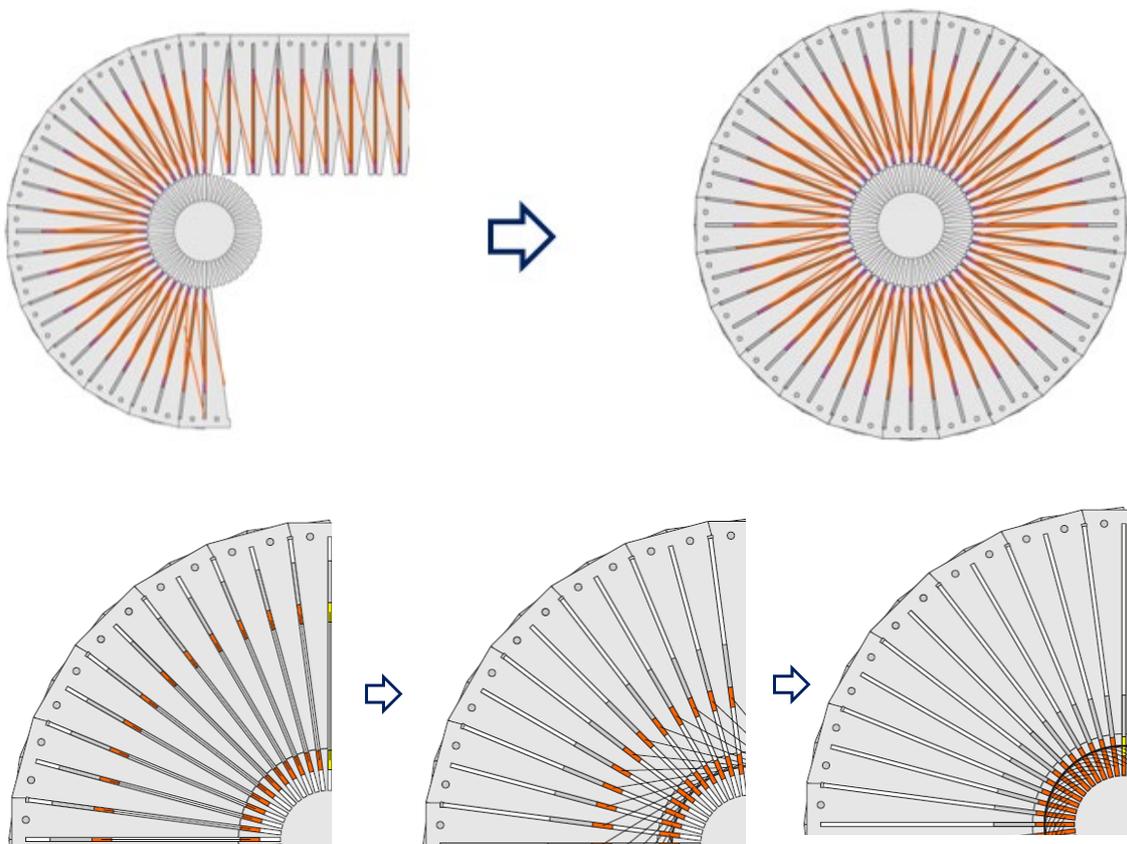


Abbildung 53: Modul 3: Spulenübergabe ans Innenwerkzeug

Modul 4:

Das letzte Modul setzt die Einbringmechanik aus der Konzeptfindung um. Hier werden das Innenwerkzeug, das Übertragungswerkzeug, welches auf Modul 3 bestückt wurde, und der Stator zusammengeführt. Danach muss sichergestellt sein, dass die Nutöffnungen des Stators mit den Öffnungen im Innenwerkzeug zueinander ausgerichtet sind. Mittels der Einbringmechanik werden nun die Spulen in radiale Richtung in den Stator übertragen.

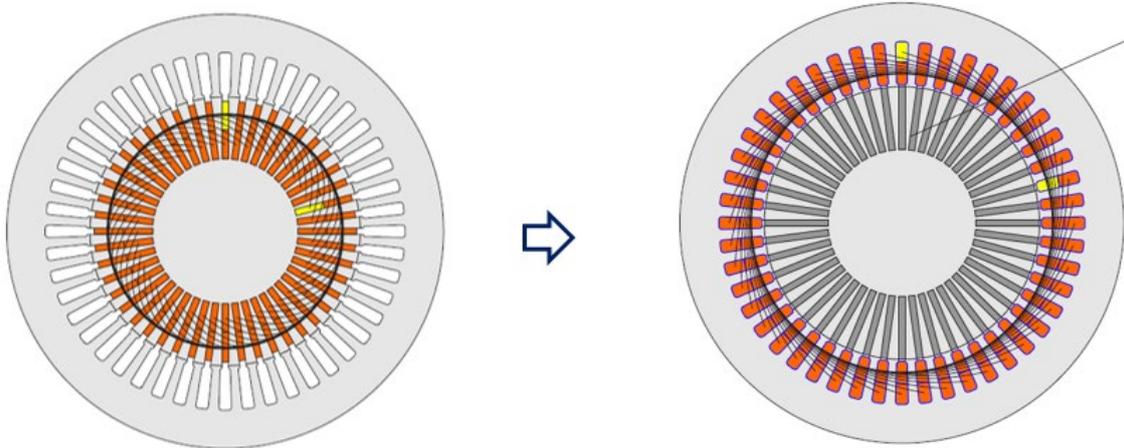


Abbildung 54: Modul 4: Einbringen der Spulen in den Stator

6.2.2 Kompaktwickelprozess

Theoretische Betrachtungen des Nutaufbaus

Um den angestrebten Lagenaufbau des Kompaktwickelprozesses genauer beschreiben zu können, ist es notwendig, theoretische Betrachtungen der möglichen Anordnungen vorzunehmen. Generell soll an dieser Stelle zwischen drei Anordnungen unterschieden werden: der wilden Wicklung, der lagengenauen Wicklung und der orthozyklischen Wicklung. Die wilde Wicklung beschreibt hierbei eine ungeordnete Struktur, die weiterhin keine Wiederholbarkeit aufweist. Laut Literatur ist der theoretische mechanische Füllfaktor von wilden Wicklungen auf 60 % zu schätzen. Lagengenaue Wicklungen beschreiben Drahtanordnungen, bei welchen die Drahtmittelpunkte von vier benachbarten Drähten jeweils ein Quadrat mit der Seitenlänge des Drahtdurchmessers aufspannen. Der theoretische mechanische Füllfaktor innerhalb einer lagengenauen Wicklung beträgt 78,53 %. Bei einer orthozyklischen Wicklung legen sich die Drähte einer Lage in den Tälern der darunter befindlichen Lage ab, sodass die Drahtmittelpunkte ein gleichseitiges Dreieck mit der Seitenlänge des Drahtdurchmessers aufspannen. Es berechnet sich der theoretische mechanische Füllfaktor zu 90,7 %. Die beschriebenen Anordnungen sind in Abbildung 55 dargestellt. [Hag-16]

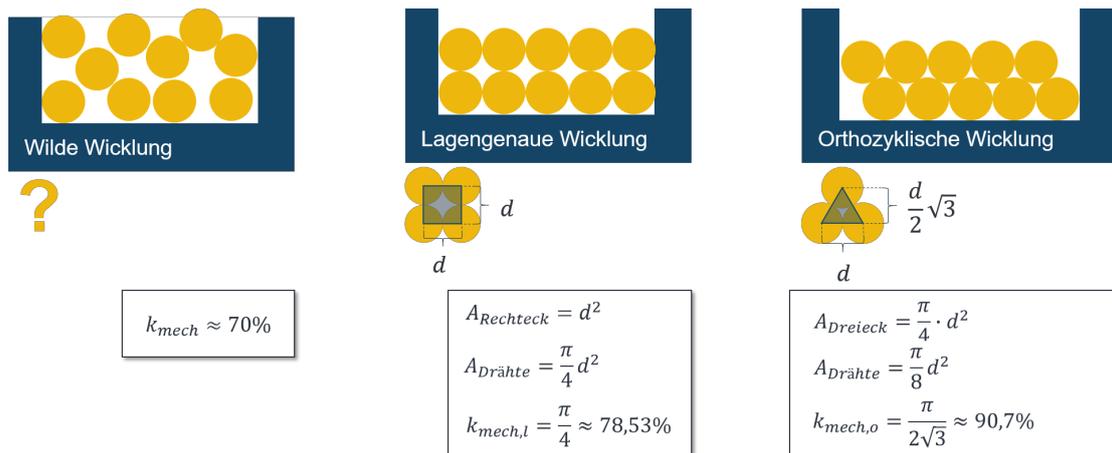


Abbildung 55: Darstellung der wilden (links), lagengenauen (Mitte) und orthozyklischen (rechts) Wicklung und die Berechnung der theoretischen mechanischen Füllfaktoren. Es gilt die Annahme einer unendlich ausgedehnten Wicklung ohne Randbereiche der Nut und Toleranzen. Eigene Darstellung nach [Hal-20]

Es gilt zu beachten, dass die berechneten Füllfaktoren für reale Anwendungen in einer Nut nicht zutreffend sind. Eine reale Betrachtungsweise ist in Abbildung 56 dargestellt. Es sind Nuten mit parallelen Nutflanken, zwei Schichten, 40 Drähten pro Schicht und 5 Drähten pro Drahtlage dargestellt. Die Grundfläche der Nut wurde so ausgelegt, dass diese dem Platzbedarf der beiden Drahtanordnungen entspricht.

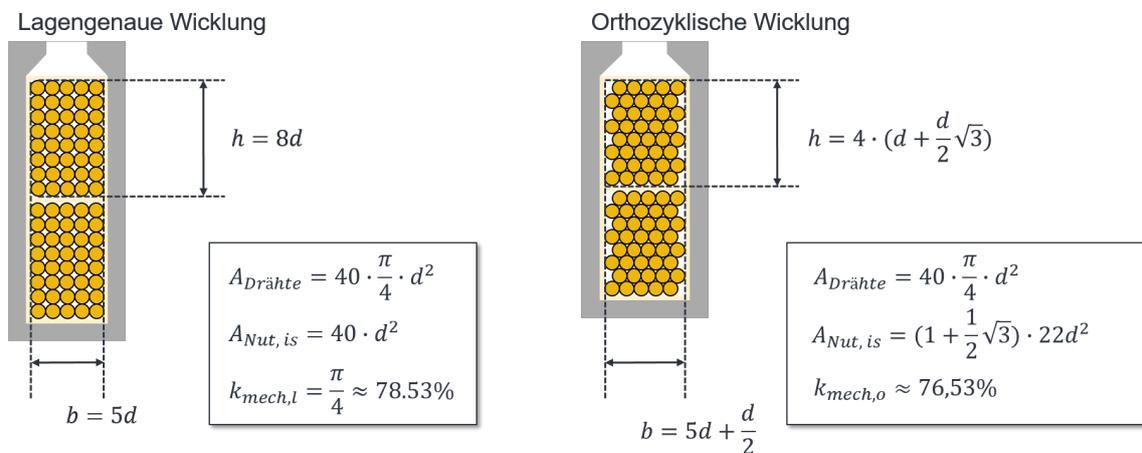


Abbildung 56: Darstellung der lagengenauen Wicklung (links) und einer orthozyklischen Wicklung (rechts) in einer Nut mit parallelen Zahnflanken, 40 Drähten pro Teilspule und den dafür berechneten Füllfaktoren

Aus diesen Betrachtungen ergeben sich ein realistischer Füllfaktor von 78,53 % für die unkomprimierte lagengenau Wicklung und ein Wert von 76,53 % für die orthozyklische Wicklung. Somit ist unter Einbezug der Nutbegrenzung die lagengenau Wicklung zu bevorzugen, da die orthozyklische Wicklung große Fehlstellen an den Nutflanken aufweist und deshalb schlechtere Füllfaktoren resultieren.

Im nächsten Schritt wird eine Kompaktierung der lagengenauen Wicklung betrachtet (siehe Abbildung 57). Diese weist aufgrund der homogenen Drahtanordnung – im Vergleich

zur orthozyklischen Anordnung besonders an den Randbereichen – eine gute Voraussetzung zur Wicklungskompaktierung auf. Theoretisch angestrebt wird die Umformung der Runddrähte in eine rechteckige (dargestellt in Abbildung 57) Querschnittsform, wahrscheinlich werden sich in der praktischen Umsetzung aber auch hexagonale Formen mit vergleichbarer Raumdichte ergeben.

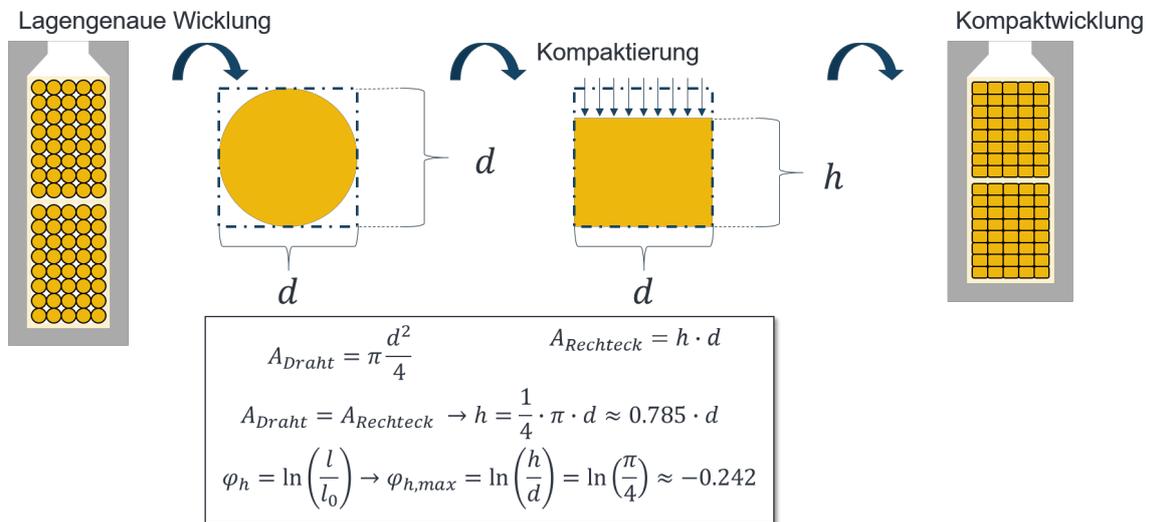


Abbildung 57: Beschreibung des benötigten Umformgrades von 0,242 in negativer Richtung (Druckkraft), bei Erhalt der Nutbreite. Die erzielte Höhenverhältnis liegt bei 0,785 der Ausgangshöhe.

Konzeptdetaillierung

Nach den theoretischen Betrachtungen zum angestrebten Lagenaufbau des Kompaktwickelprozesses können die drei Hauptmerkmale des Kompaktwickelprozesses beschrieben werden:

1. Geordneter Lagenaufbau der Spulen im Bereich der aktiven Länge
2. Kompaktierte Runddraht-Wicklung der Spulen im Bereich der aktiven Länge
3. Freier und flexibler Wickelkopf mit Möglichkeit zur Verdrillung der Drähte

Das Vorgehen zur Herstellung einer Kompaktwicklung mit den drei Hauptmerkmalen ist unter der Abbildung 58 schematisch dargestellt. Im ersten Schritt werden Teilspulen mit lagengenauem Aufbau erzeugt. Hierbei enthält eine Teilspule 4 Windungen mit 10 Drähten, wobei die 10 Drähte in 2 Drahtlagen aufgeteilt sind. Diese Windungen werden dann einzeln in die gewünschte Form gepresst. Dies wird durch ein geeignetes Werkzeug außerhalb des Statorblechpakets vorgenommen. Zu beachten ist, dass die Kompaktierung nur innerhalb der aktiven Länge einer Spule durchgeführt wird, sodass der Wickelkopf flexibel und formbar bleibt. Im nächsten Schritt werden die Windungen der Teilspulen in den Stator eingelegt und es ergibt sich die Anordnung der Kompaktwicklung.

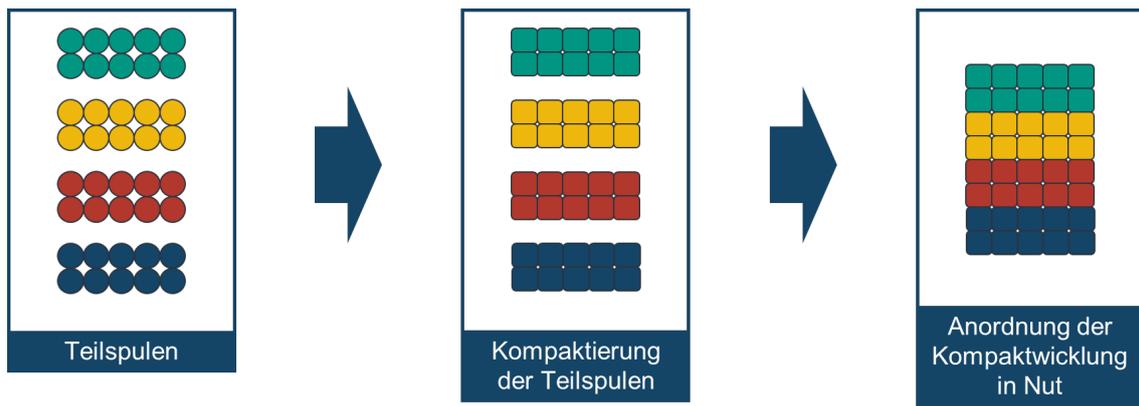


Abbildung 58: Schematische Darstellung der Schritte zur Herstellung einer Kompaktwicklung: Erzeugung der lagengenauen Teilspulen (links), Kompaktierung der Windungen der Teilspulen (Mitte) und Montage der Wicklung in der Nut (rechts)

Zur Umsetzung des beschriebenen Konzepts wird ein Spulenhandlingssystem benötigt, das zugleich die Wickelschablone darstellt und in Abbildung 59 in der jeweils oberen Bildhälfte dargestellt ist. Zusätzlich wird zum Einlegen der Teilspulenwindungen ein Greifersystem benötigt, welches um 90° drehbar gelagert sein muss, um die Montage durch den engeren Nutschlitz zu ermöglichen.

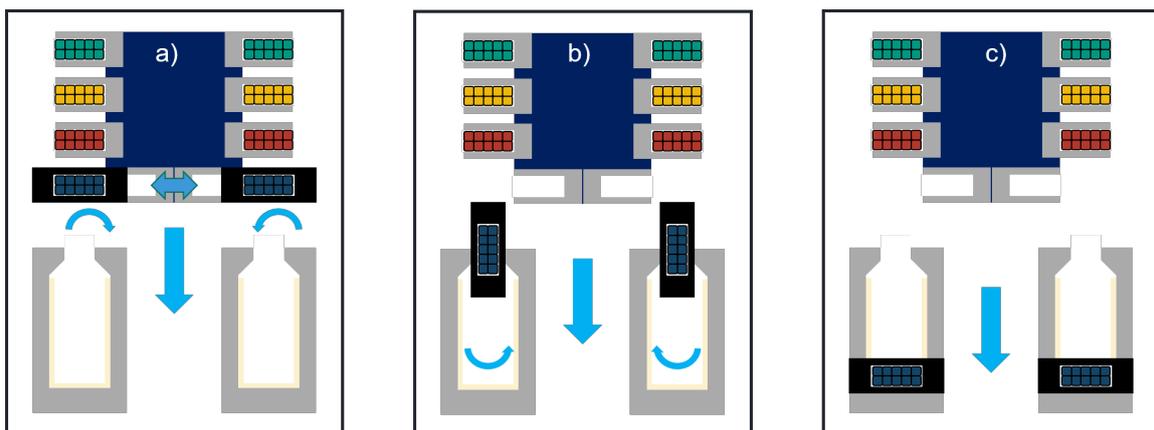


Abbildung 59: Querschnitt durch das schematische Spulenhandlingssystem: a) Gegenläufig bewegliche Führungsschienen für je eine Ebene der Windungen einer Teilspule und Umschließen der schwarz gekennzeichneten Greifer. b) Alle Windungen einer Teilspule werden um 90° gedreht durch den Nutschlitz in die Nut eingeführt. c) Ablegen der Windung einer Teilspule am Nutgrund. Der Ablauf a)-c) wird pro Teilspule vier Mal wiederholt

6.3 VERPRESSEN VON WICKLUNGEN IN DER NUT

Im weiteren Verlauf des Projektes wurde das Pressen von Drähten immer wieder erörtert und diskutiert, um hierdurch den Nutfüllfaktor zu erhöhen. Daraus ergab sich ein weiterer Themenschwerpunkt für das Projekt in Richtung Essex Germany GmbH. Bei dem Thema Pressen lag der Schwerpunkt von Essex Germany GmbH darauf, wie sich die Verformung auf den Lackdraht auswirkt. Um dieses Verhalten genau zu analysieren, wurde eine Versuchsreihe am Einzelleiter aufgebaut.

In den Pressversuchen von Einzelleitern wurde ein 0,75 mm Polyesterimid- und Polyamidimid-beschichteter Lackdraht, Isolationszunahme Grad 2, zwischen zwei Stahlblöcken umgeformt.

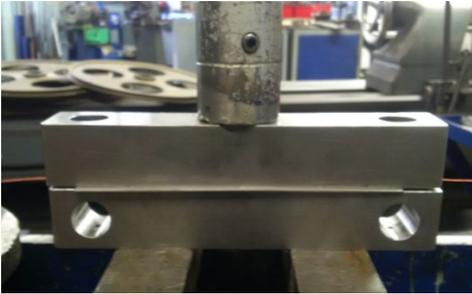


Abbildung 60: Pressen von Einzelleiter Abbildung 61: Schliffbild nach dem Pressen (125kN)

Ermittelt wurden die Maße, die Isolationszunahme und die Durchschlagsspannung vor und nach dem Verpressen.

Aus der Versuchsserie ergibt sich, dass das Verpressen von Einzelleitern bis zu einer maximalen Verformung des Außendurchmessers (Höhe) von 48 % möglich ist. Der ermittelte Spannungsabfall zum Basis Lackdraht beträgt lediglich 8 %. Bei diesen maximalen Verformungen wurden keine Drahtbeschädigungen visuell festgestellt.

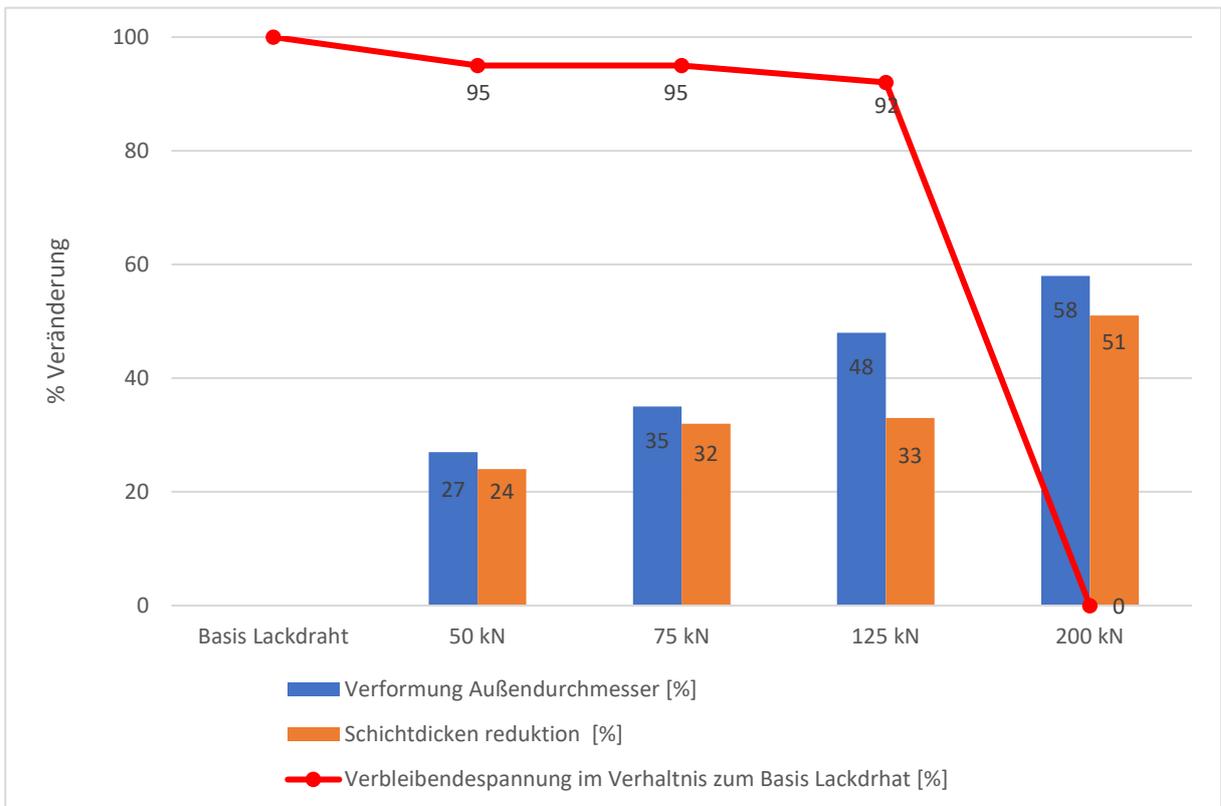


Abbildung 62: Ergebnisse nach dem Pressen von Einzelleitern

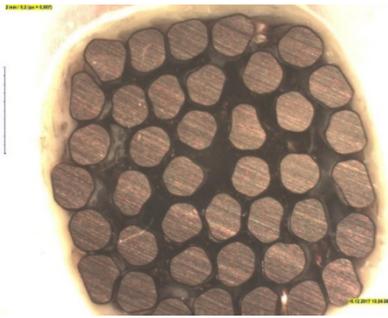


Abbildung 63: Schliff nach dem Pressen (Einzelleiter Bündel)

Die Weiterführung der Pressversuche wurde gemeinsam mit der Firma Aumann GmbH durchgeführt. Bei den Pressversuchen wurden 40 Einzeldrähte 0,90mm CA-200 Grad 2 und anschließend 40 Einzeldrähte 0,90mm CA-200 Grad 3 mit unterschiedlichem Drücken in einer Nut gepresst. Es wurde die Höhe, der Leiterwiderstand vor und nach dem Verpressen und die Durchschlagsspannung ermittelt. Dabei hat sich gezeigt, dass der Isolationsgrad einen deutlichen Einfluss hat. Der Isolationsgrad 2 hatte eine Ausfallrate von 25 %. Bei dem Isolationsgrad 3 wurde eine Ausfallrate von 6,25 % festgestellt.

7 Umsetzung des Fertigungsverfahrens



7.1 DETAILUNTERSUCHUNG & VORVERSUCHE

7.1.1 Automated Trickle Winding-Prozess

Wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, konnte mit der Umsetzung in Form eines Labormusters eine erste Prozesskette der Drahtbündelmontage erprobt werden. Das Montageergebnis in den Vorversuchen war sehr positiv. Die Drähte ließen sich mit der Vorrichtung und einem zusätzlichen Schieber sehr gut von einer Bevorratung in den Stator einbringen.

Aufbauend auf den Vorversuchen wurden Funktionsmuster für die entscheidenden Prozessschritte erstellt. Es handelte sich dabei um vier zentrale Prozessschritte:

1. Wickeln einer Spulengruppe
2. Übergeben der Spulengruppe in ein Übertragungswerkzeug
3. Übergeben und Schränken der Spulengruppe in einem Innenwerkzeug
4. Einbringen der geschränkten Spulengruppe vom Innenwerkzeug in den Stator

Die nachfolgenden Abbildung 64 bis Abbildung 67 zeigen die Funktionsmuster für den Prinzipnachweis dieser Prozessschritte in der Abfolge der Versuchsdurchführung. Die hier gezeigten Funktionsmuster wurden in einem iterativen Verfahren für ihre jeweiligen Funktionen angepasst und verbessert. Dafür wurden Materialien aus dem Rapid Prototyping Bereich verwendet, um den Aufwand an Materialkosten zu minimieren.



Abbildung 64: Wickeln einer Spulengruppe

Für das Wickeln wurde als Basis ein Schablonenwerkzeug projektiert und für die Linearwickeltechnik angepasst, mit dem Ziel einen strukturierten Lagenaufbau zu erzeugen. Dabei wurde bereits entsprechender Bauraum für die umhüllenden Papiere der Spulenisolation vorgesehen.

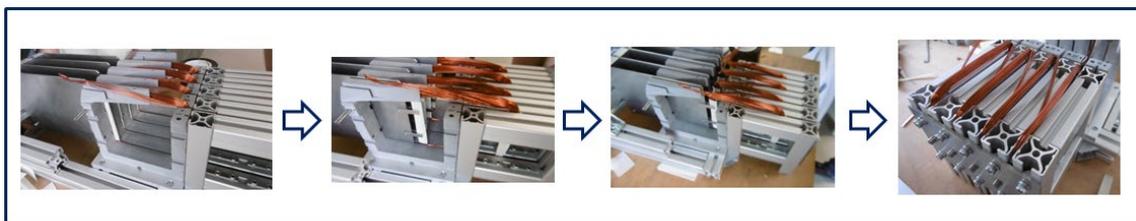


Abbildung 65: Übergeben der Spulengruppe in ein Übertragungswerkzeug (Übergabekette)

Um die Demontage der Spulen automatisieren zu können, wurde ein Konzept für die Übergabe in ein Übertragungswerkzeug entwickelt. Dabei lag der Fokus auf einer formtreuen Montage der Spule ohne Beschädigung der Spule oder ihrer Papierisolation.



Abbildung 66: Übergeben und Schränken der Spulengruppe in einem Innenwerkzeug

Sowohl zur Erzeugung des Wickelschemas als auch zur Montage der gesamten Wicklung in einem Prozessschritt wurde das Innenwerkzeug mit entsprechenden Halteschlitzen konzipiert.



Abbildung 67: Einbringen der geschränkten Spulengruppe vom Innenwerkzeug in den Stator

Um die vorhandenen Bauräume zur Montage der gesamten Wicklung abschätzen zu können, wurde auch der letzte Schritt zur Expansion der Wicklung in den Stator mittels Schiebern als Funktionsmuster konzipiert.

Mit durchgeführten Versuchen wurden zentrale kritische Prozessparameter näher untersucht, funktionsrelevante Merkmale an den Werkzeugen erprobt und alternative Verfahrensvarianten konzipiert. Neben den Versuchen auf den genannten vier Modulen wurden noch weitere Detailuntersuchungen vorgenommen. Dafür können die folgenden Punkte genannt werden:

- Untersuchungen der notwendigen Prozesskräfte beim Schränken der Spulengruppen im Innenwerkzeug
- Vorversuche zur Montage von Wickelkopfisolationspapieren
- Montageversuche eines freien Wickelkopfes ohne Abstandshalter
- Funktionstest der Idee „3-eckiger Wickelkopf“
- Versuche zum Falten der Spulenisolation
- Erprobung einer Spulenfixierung ohne Auflage am Grund der Übergabekette
- Erprobung einer Spulenübergabe ohne Spulenisolation
- Variation der Spulenisulationsgeometrie
- Ermittlung der richtigen Haltezeit und Temperatur für den Klebprozess für das Verschließen der Isolationspapiere um die Spulen

Als ein Beispiel für die Detailuntersuchungen soll der zuletzt genannte Punkt genauer beschrieben werden. Ziel war es, die richtige Haltezeit und die richtige Temperatur für den Klebprozess zum Verschließen der Papiere herauszufinden. Die Papierschenkel werden nach dem Wickelprozess durch Faltschwerter um die Spule geschlossen und anschließend wird der auf dem Papier beschichtete Kleber thermisch aktiviert. In der Prozessuntersuchung sollte das Hauptaugenmerk auf einer geringen Haltezeit liegen, um den Prozess zu beschleunigen und die Taktzeit gering zu halten. Dafür wurden ein Zug- und ein Schälversuch (Abbildung 68 und Abbildung 69) initiiert.



Abbildung 68: Zugversuch für den Klebprozess

Zu Beginn wurden Klebproben erstellt. Nach definierten Vorgaben wurden anschließend die Proben einer Kraft ausgesetzt. Diese Kraft wurde mittels einer Federwaage aufgebracht und gemessen. Es wurden hier die höchsten Kräfte für die Auswertung berücksichtigt.



Abbildung 69: Schälversuch für den Klebprozess

Im Laufe der Auswertung wurde festgestellt, dass die verwendeten Proben keine signifikanten Unterschiede bei den Schälversuchen erbrachten, weil die aufgebrachte Kraft zu gering ausfiel, um eine Aussage der unterschiedlichen Klebproben zu treffen. Aus diesem Grund wurde lediglich der Zugversuch für eine Qualifizierung der Klebeverbindung verwendet.

In Abbildung 70 ist die Zugkraft über die Einwirkdauer dargestellt. Auf der Ordinate ist die Kraft in Newton abzulesen und auf der Abszisse die Einwirkdauer in Sekunden. Das Punktdiagramm zeigt die definierten Prozessfenster, welche aus Klebetemperatur und Einwirkdauer bestehen.

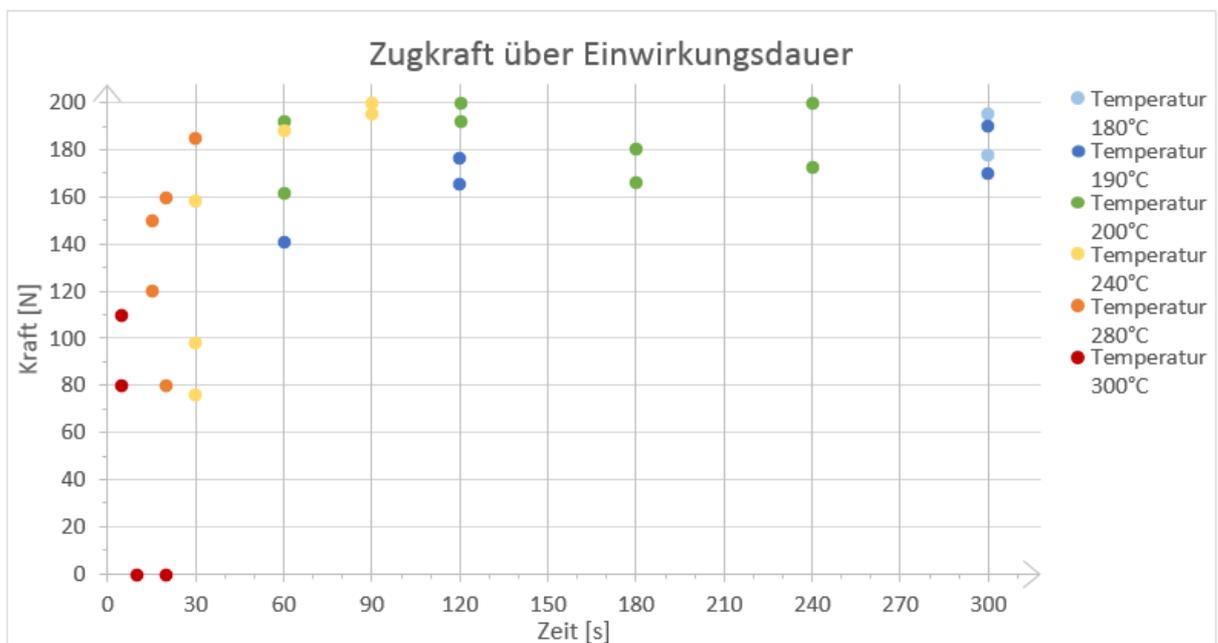


Abbildung 70: Ergebnis aus dem Zugversuch

Das Diagramm zeigt, dass eine sehr hohe Temperatur von 300 °C nicht förderlich für die erreichbare Zugkraft der Probe ist. Es ist zu erkennen, dass mit Abnahme der Temperatur und Erhöhung der Haltezeit gute Ergebnisse erzielt werden können.

Es wurde eine Vergleichsprobe, welche nach den Vorgaben des Herstellers geklebt wurde, erstellt. Entsprechend dieser Probe sind ähnliche Ergebnisse mit geringeren Haltezeit erzielt worden. Als vorläufiges Wertepaar sind eine Temperatur von 280 °C und eine Haltezeit von 60 Sekunden definiert worden.

7.1.2 Kompaktwickelprozess

Um die Teilspulenherstellung genauer zu analysieren, wurden Versuchsreihen zu deren Herstellung durchgeführt. Hierfür wurde ein Aluminiumwerkzeug hergestellt, um die Verpressung und das anschließende Verbacken mit Backlack darstellen zu können. Durch Variation der Pressdrücke und der Energieeinträge in die Wicklung sowie der Stromstärke und Dauer der Erwärmung konnten die Prozessparameter bestimmt werden. Somit konnte die Machbarkeit der Herstellung von Formspulen, die im Bereich der aktiven Länge der Nut kompaktiert sind, außerhalb des Blechpakets experimentell nachgewiesen werden (siehe Abbildung 71).



Abbildung 71: Modellwerkzeug zur Herstellung von Kompaktwicklungen (links), erzeugte Spulen der Kompaktwicklung mit lagengenauer und kompaktierter Anordnung in aktiver Länge der Spulen in der Nut (rechts)

7.2 UNTERSUCHUNG SCHNITTSTELLEN ZU VOR- UND NACHGELAGERTEN PROZESSEN

7.2.1 Design Spulenwickelkopf

Eines der Ziele in diesem Projekt ist es, durch die simultane Entwicklung von Produkt und Prozess einen möglichst bauraumoptimalen Stator zu designen. Axiale Bauraumreduktion lässt sich im Wesentlichen durch ein optimales Design des Spulenwickelkopfes zurückführen. Aus diesem Grund wurden parallel zur Fertigungsprozessentwicklung verschiedene Wickelkopfdesigns durch Volkswagen entworfen, untersucht und bewertet (siehe Abbildung 73).

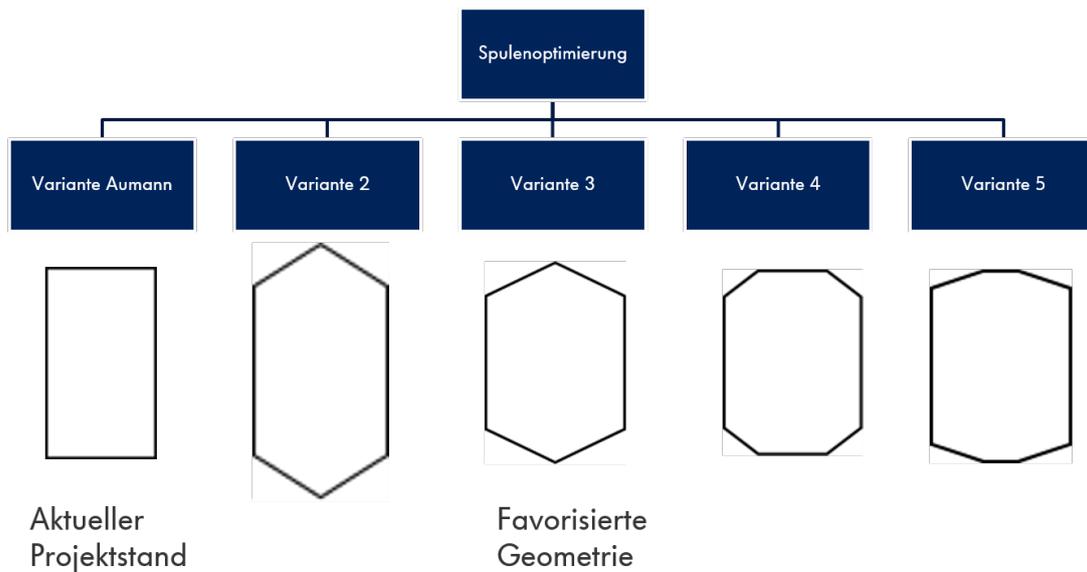


Abbildung 72: Konzepte Spulengeometrie

Bei den ersten Versuchen mit der Variante 1 (rechteckige Spule) wurde erkannt, dass es bei dem Fertigungsschritt „Einbringen in das Innenwerkzeug“ (6.2.1 – Modul 3) zu Komplikationen kommen kann. Sobald man das Innenwerkzeug mit den Spulen füllt, dehnen sich die Wickelköpfe radial aus und stehen über dem Außendurchmesser des Werkzeuges. Diese Position der Wickelköpfe verhindert das danach folgende Einbringen des Innenwerkzeugs in den Stator. Es müsste ein weiterer Umformprozess integriert werden. Untersuchungen mit den Varianten 2 und 3 haben gezeigt, dass das radiale Ausdehnen des Wickelkopfes beim Einbringen in das Innenwerkzeug bei einer dreieckigen Wickelkopfform nicht so stark ausgeprägt ist. Hier haben die Variante 2 und 3 deutliche Vorteile gegenüber Variante 1. Dies Lage Spulenvariante 3 im Innenwerkzeug kann man in Abbildung 73 erkennen.



Abbildung 73: Mit Spulen gefülltes Innenwerkzeug

Aufgrund dieser Erkenntnis wurde der Fokus auf drei- bzw. mehreckige Spulengeometrien gelegt. Es wurden mehrere Optimierungsschleifen durchgeführt (siehe Abbildung 75) und sämtliche Wickelschablonen mittels Rapid Prototyping gefertigt.

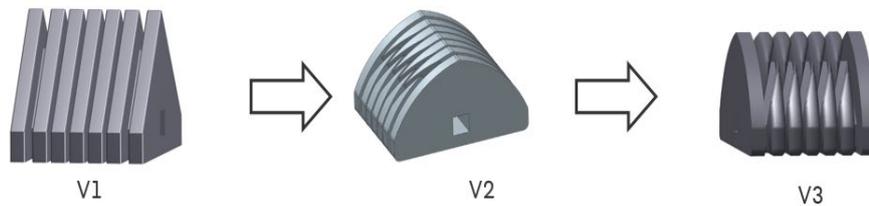


Abbildung 74: Optimierungsschleifen Wickelschablone

In der V₁ wurde die Wickelschablone gemäß eines dreieckigen Wickelkopfes hergestellt und die Spulen gewickelt. Ein Nachteil bei dieser Form war die sehr stark ausgeprägte Spitze des Wickelkopfes. Dieser starke „Knick“ in den Kupferlackdrähten führt zu Problemen bei der endgültigen Ausgestaltung des Wickelkopfes im Stator. Außerdem war das Lösen der Spule vom Werkzeug mit einem erhöhten Aufwand verbunden. Diese Schwachstellen wurden mit Version 2 behoben, sodass sowohl der Wickelprozess als auch die Produktgeometrie den Zielen gerecht werden kann. In der Version drei wurde die Schablone in der Geometrie final angepasst, so dass händisch eine axiale Wickelkopfhöhe von ca. 30 mm erreicht werden konnte.

Die Ergebnisse der Spulenoptimierung sollen dazu dienen, das Optimum für den weiteren Projektverlauf zu bestimmen.

7.2.2 Isolation zum Blechpaket

Bezüglich der Isolation zum Blechpaket wurde ein optimales Konzept für Produkt und Prozess gesucht. Für den in Kapitel 6.2.1 beschriebenen Automated Trickle Winding – Prozess ist ein geteiltes Isolationskonzept sinnvoll (siehe Abbildung 75). Dieses besteht zum einen aus der Nutiso Teil 2 (fortan Nutisolation genannt) und zum anderen aus der Nutiso Teil 1 (fortan Spulenisolation genannt).

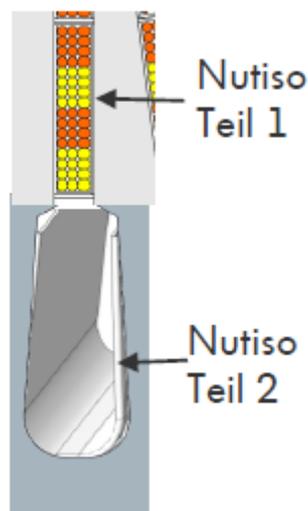


Abbildung 75: Isolationskonzept NeWire

Die Spulenisolation wird zum einen als Phasenisolierung der Zweischichtwicklung und zum anderen als Prozesshilfe zur Spulenfixierung benutzt. Die Spulenisolation ist bereits im Wickelwerkzeug integriert und dient somit auch dem Schutz der Drähte. Die Nutisolation kann der klassischen Nutisolation gleichgesetzt werden. Einziger Unterschied ist hier, dass sich die Papierstärke unterscheidet. In der Abbildung 76 ist die Zusammensetzung zu erkennen. Das dunklere Papier ist die Spulenisolation. Das hellere Papier, welches an der Nutflanke entlang verläuft, ist die Nutisolation in einer dünneren Variante als üblicherweise verwendet.



Abbildung 76: Querschnitt einer befüllten Statornut

Über das beschriebene Isolationssystem hinaus wurden seitens Volkswagen weitere Nutisolutionskonzepte entworfen und mithilfe von Motoretten thermisch, elektrisch sowie in Hinblick auf den Fertigungsprozess untersucht. Abbildung 77 zeigt die 4 betrachteten Varianten. Mittels einer Bestromung wurden u. a. die Temperaturunterschiede der Varianten identifiziert.

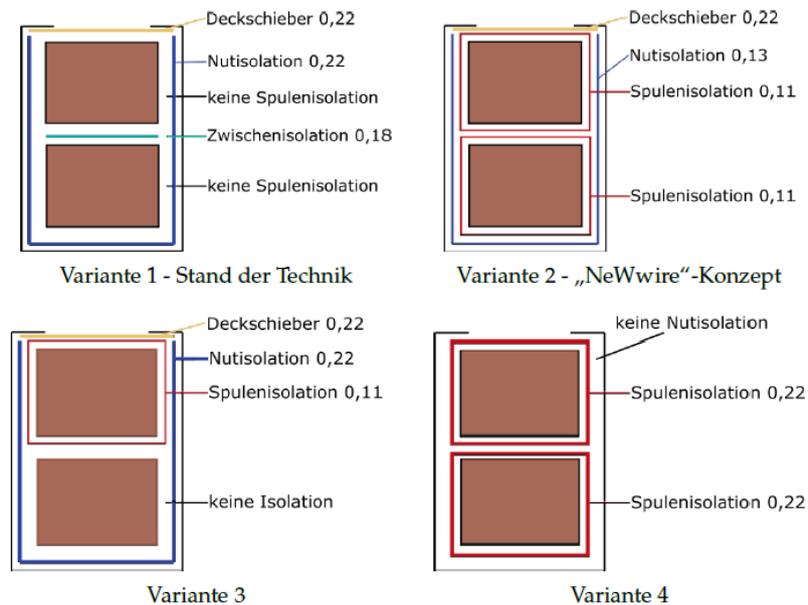


Abbildung 77: Varianten der Isolutionskonzepte in der Statornut

Für die Aufnahme der Temperaturen in der Nut wurden Sensoren platziert, deren Positionen in Abbildung 78 dargestellt sind. Die Motoretten wurden bei 30 A für 90 Minuten bestromt und die daraus resultierenden Endtemperaturen aufgenommen.

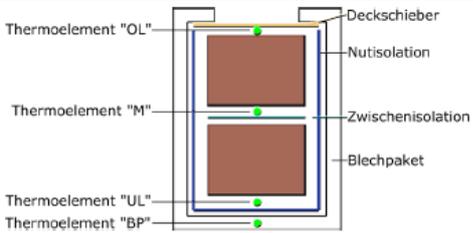
	V1M	V2M	V3M	V4M	
θ_{OL} [°C]	168,8	164,6	169,1	168,6	
θ_M [°C]	170,5	169,1	173,0	173,0	
θ_{UL} [°C]	165,9	161,0	164,8	165,5	
θ_{BP} [°C]	157,5	154,5	153,9	156,6	

Abbildung 78: Temperaturaufnahme der Thermoelemente

Anhand der Versuche wurde die Erkenntnis gewonnen, dass die verschiedenen Isolationskonzepte keine relevanten Auswirkungen auf das Temperaturverhalten aufzeigen.

Elektrisch erfüllten alle Konzepte die zuvor gesetzten Anforderungen.

Aus fertigungsprozessualer Sicht waren die Varianten 1 und 2 deutlich im Vorteil. Der erhöhte Platzbedarf bei Variante 3 (0,11mm Spulenisolation + 0,22mm Nutisolation) sowie die sehr dicke Spulenisolation bei Variante 4 zeigten beim Aufbau der Motoretten und bei der Bewertung für einen Serieneinsatz Nachteile.

7.2.3 Wickelkopfisolation

Um eine geeignete Wickelkopfisolation für den Automated Trickle Winding – Prozess zu wählen, wurden verschiedene Möglichkeiten in einem Workshop ausgearbeitet. Die Varianten sind schematisch in der Abbildung 79 dargestellt.

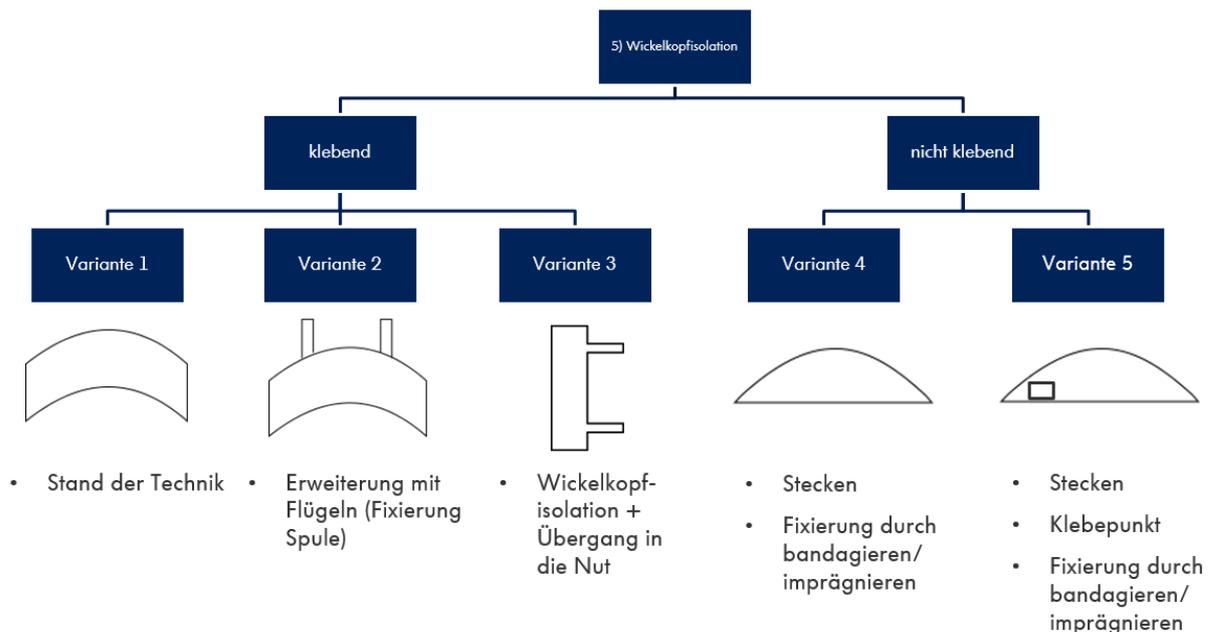


Abbildung 79: Wickelkopfisolutionskonzepte

Nach der Konzeptentwicklung wurden die Konzepte mittels einer Nutzwertanalyse bewertet. Folgende Schwerpunkte wurden bei der Bewertung des Wickelkopfkonzeptes sehr hoch gewichtet: Automatisierbarkeit, Prozesstauglichkeit und Positionsgenauigkeit. Die Bewertungen wurden auf Basis von Versuchsaufbauten, die in der

Abbildung 80 dargestellt sind, durchgeführt. Variante 5 erhielt hierbei die beste Bewertung.



Abbildung 80: Isolationskonzepte (Vorversuche)

Im Nachgang galt es nun, die Tauglichkeit des Konzeptes mit einem Klebepunkt auf der Wickelkopfisolation nachzuweisen, und zum anderen, eine vorläufige Geometrie abzuleiten. Die Abbildung 81 zeigt einen geformten Wickelkopf mit der Variante 5 als Phasenisolierung.



Abbildung 81: Wickelkopfisolation zwischen den Phasen

Die Fixierung der Wickelkopfisolation mittels der Klebepunkte hält der Verformung des Wickelkopfes stand, sodass die Positionierung und die damit einhergehende Phasenisolierung gewährleistet sind. Die Abbildung 82 zeigt eine Geometrie, die anhand der Aufbauten abgeleitet wurde.

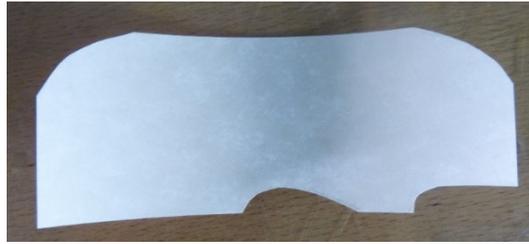


Abbildung 82: Geometrie Wickelkopfisolation Variante 5

7.2.4 Mechanische Fixierung der Spulenisololation

Für die mechanische Fixierung der Spulenisololation wurden Versuche an beschichteten Isolationspapieren durchgeführt. Dieses beschichtete Isolationspapier dient als Spulenisololation und soll mit Hilfe eines heißen Stempels verschlossen werden. Die Abbildung 83 zeigt ein Wickelwerkzeug, in dem die Spulenisololation verschlossen wurden. Die Stempelabdrücke sind deutlich zu erkennen. Der Einsatz dieses Verfahrens zum Verschließen der Spulenisololation wurde im Projektkonsortium festgelegt und ist als Alternative zu einem herkömmlichen Klebprozess zu verstehen. Ein wesentlicher Vorteil des Verschließens der beschichteten Papiere mittels Hitze anstelle von Kleber liegt darin begründet, dass der zu erwartende Serienprozess wesentlich einfacher und robuster und somit auch günstiger gestaltet werden kann. Voraussetzung dafür ist die richtige Wahl der Prozessparameter.

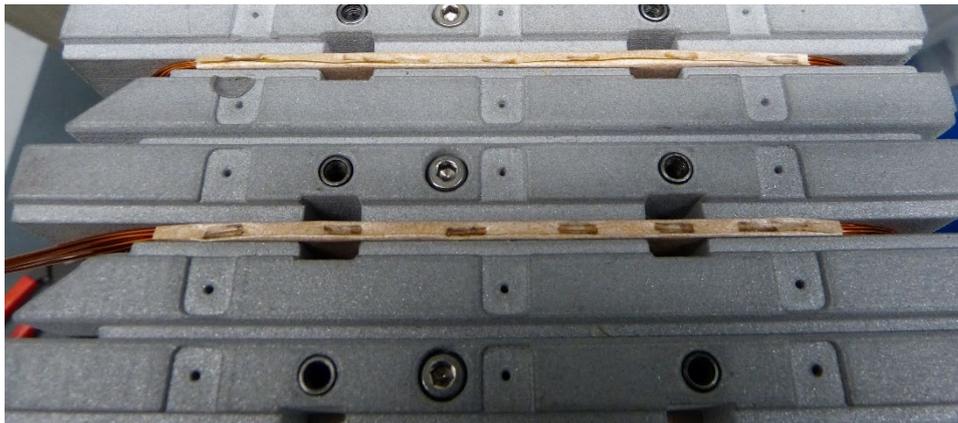


Abbildung 83: Wickelwerkzeug mit verschlossenen Spulen

Im Rahmen von Vorversuchen wurde der Stempel auf verschiedene Temperaturen erhitzt und die Isolationspapiere anschließend verschlossen. Es sind unterschiedliche Prägungen an den Kontaktflächen zu erkennen gewesen. Anschließend wurden die Spulen aus dem Wickelwerkzeug entnommen und die Festigkeit der Verbindung geprüft. Die Ergebnisse dieser praktischen Vorversuche deckten sich gut mit den Parameteruntersuchungen aus Kapitel 7.1.1.

7.2.5 Kontaktierverfahren Spulenenden

Für das Kontaktierverfahren wurden Versuche mit den finalen Bauteilen des Designfreezes durchgeführt und Prozessparameter ausgearbeitet. In der Abbildung 84 ist das Ergebnis der Untersuchung dargestellt. Im linken Bild ist der Kabelschuh mit dem Elektrodenabdruck zu sehen, rechts ist ein Querschliff von der Kontaktfläche dargestellt. Die Position des Querschliffes ist im linken Bild mit einer gestrichelten Linie (rot) dargestellt.

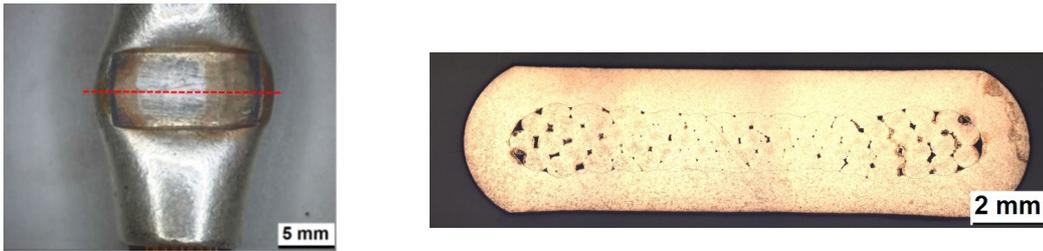


Abbildung 84: Untersuchung Kontaktierverfahren

Anhand der guten Ergebnisse wurde die Prinzip- und Konzepttauglichkeit nachgewiesen. Für eine Serientauglichkeit müssen jedoch weitere Prozessversuche in einer größeren Stückzahl durchgeführt und ausgewertet werden.

7.2.6 Imprägnierverfahren

Des Weiteren wurde das Imprägnierverfahren „Strom-Tauchen“ näher beleuchtet. Der Stator wird in einer Vorwärmphase mittels Bestromung erwärmt und anschließend in der Imprägnierphase in ein Harzbecken getaucht. Durch den Wärmeeintrag wird das Harz nahe der Wicklung geliert und läuft nach dem Auftauchen nicht mehr aus dem Bauteil. Daraufhin folgen die Abtropfphase sowie die Vorhärt- und Reinigungsphase, in der das Objekt vorgehärtet und parallel mittels Druckluft gereinigt wird. Abschließend wird das Objekt in einem Umluftofen oder mit UV-Lampen final ausgehärtet.

Die NeWire-Statoren wurden anhand dieser Prozesse mit einhergehenden Parametern imprägniert und das Ergebnis des Verfahrens anhand von elektrischen Kenngrößen, Messungen vor und nach Imprägnierung, optischer Prüfung und Gewichtszunahme positiv bewertet.

7.3 MODULINTEGRATION UND PROZESSPARALLELISIERUNG

7.3.1 Automated Trickle Winding-Prozess

Nach Abschluss der Vorversuche wurden die vier in Kapitel 6.2.1 beschriebenen Prozessschritte zu vier Prototypenmodulen ausgearbeitet. Dabei ist es das Ziel, die einzelnen Module so zu verknüpfen, dass ein fertiger Demonstrator bzw. Statorprototyp produziert werden kann. Hierbei wurde berücksichtigt, dass vor- und nachgelagerte Prozesse möglichst integrierbar sind (siehe nachfolgendes Kapitel) und dass der Prozess parallelisiert werden kann. Als Beispiel ist hier das Einbringen in den Stator hervorzuheben. Ziel der Vorversuche war es, zunächst eine Spulengruppe (bestehend aus vier einzelnen Spulen) einzubringen.

Abbildung 85 zeigt eine Umsetzung des Expansionsprozesses für die Wicklung in Modul 4, wobei die Expansionsschieber zum Einbringen mittels Sonnenrad betätigt werden. Dafür werden, entsprechend der Anzahl der Statornuten, Schieber eingesetzt die mittels einer Platte (Sonnenrad) in radiale Richtung bewegt werden können. So können alle Spulen des Stators gleichzeitig über die parallele Bewegung der Schieber in den Stator eingebracht werden.

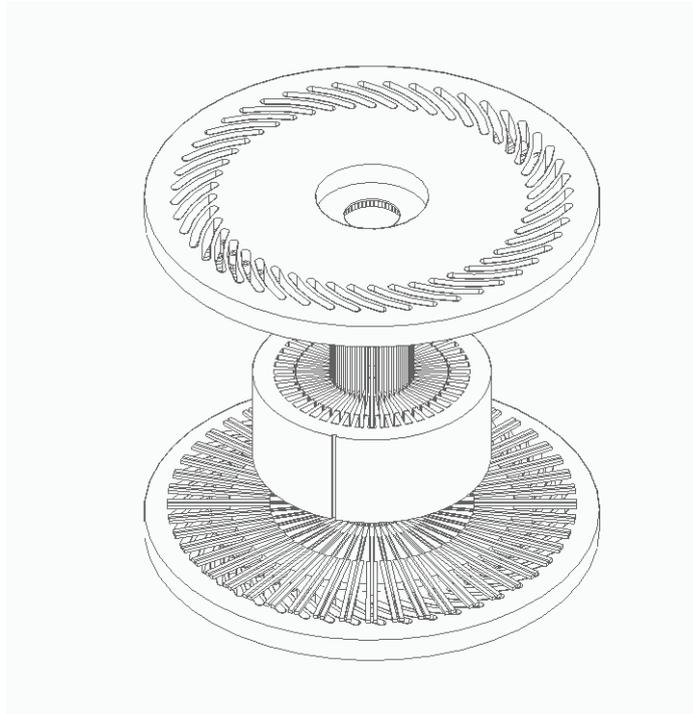


Abbildung 85: Konzept zum Einbringen einer vollständigen Wicklung mittels Sonnenrad

Für jeden Prozessschritt wird nachfolgend die Konstruktion des jeweiligen Moduls vorgestellt. Die Grundprinzipien / Grundfunktionen der in Kapitel 7.1.1 entwickelten Werkzeuge für das Wickelwerkzeug, das Übertragungswerkzeug, das Innenwerkzeug und die Montagewerkzeuge wurden beibehalten. Lediglich die Betätigung der einzelnen Prozesskinematiken wurde in dem Modul mechanisiert und teilweise automatisiert. Die Verwendung von Rapid Prototyping Materialien war durch die geplante Verwendung der Module für die Musterfertigung der Statoren nicht mehr möglich. Generell wird für die Module die erarbeitete Prozessfolge aus den Vorversuchen beibehalten:

1. Modul 1: Erstellen / Wickeln der Spulen (Abbildung 64)
2. Modul 2: Übergeben in ein Übertragungswerkzeug (Abbildung 65)
3. Modul 3: Übergeben und Schränken in einem Innenwerkzeug (Abbildung 66)
4. Modul 4: Einbringen vom Innenwerkzeug in den Stator (Abbildung 67)

Für das Modul 1 war es möglich, eine bestehende Linearwickelmaschine vom Typ LWS für diese Aufgabe umzurüsten. Für das parallele Wickeln von mehreren Drähten ist es notwendig, das Modul durch entsprechenden Drahtführer und durch ein passendes Drahtzugregelsystem auf die Verarbeitung von 9 Drähten gleichzeitig anzupassen. Die verwendeten Drahtdurchmesser und der gezielte Lagenaufbau im Wickelwerkzeug wurden mit den Projektpartnern entwickelt und abgestimmt.

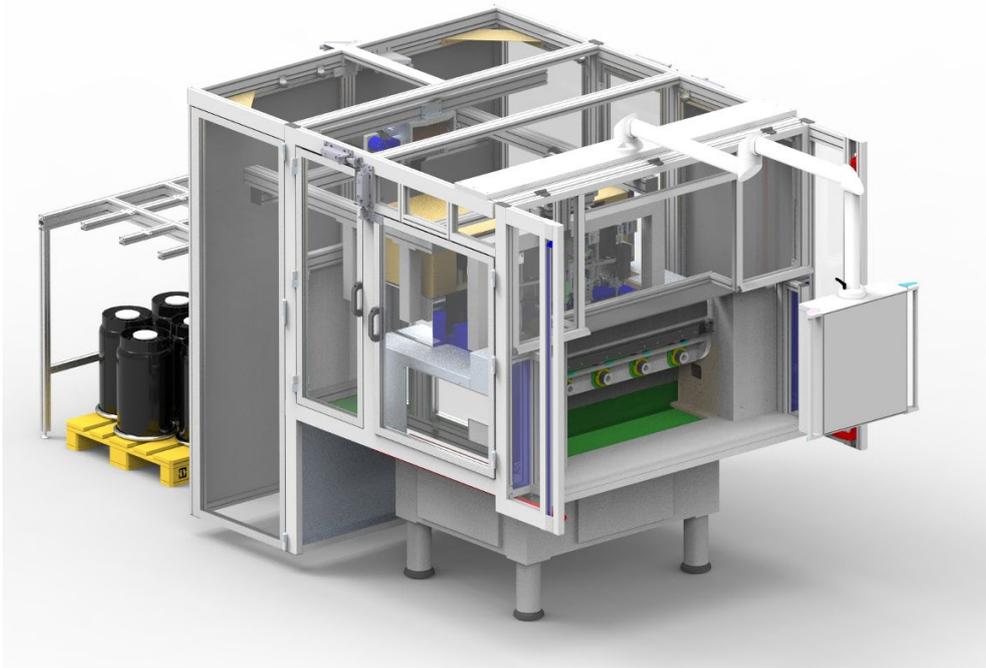


Abbildung 86: Modul 1 - Wickeln der Spulen

Durch das sequentielle Wickeln der Spulengruppen im Modul 1 ist es notwendig diese nacheinander in das geplante Übertragungswerkzeug zu bringen. Dafür wurde das Modul 2 konzipiert und konstruiert.

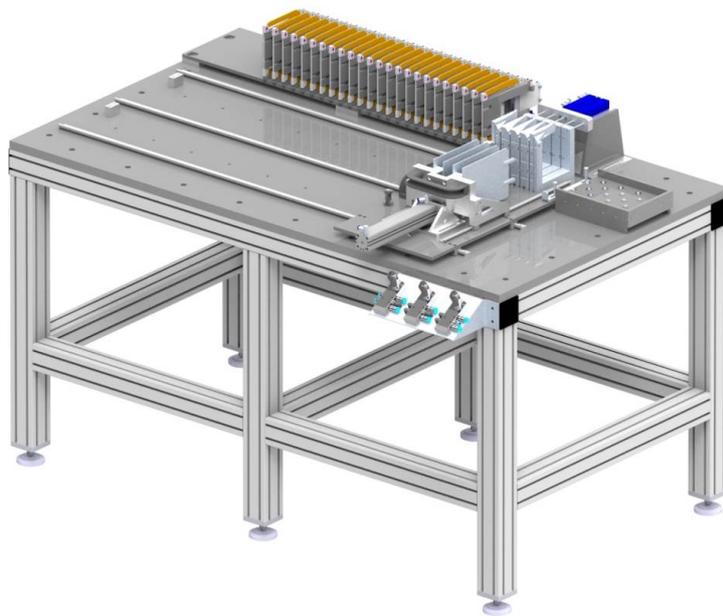


Abbildung 87: Modul 2 - Übergeben in ein Übertragungswerkzeug

Zentral für die Erstellung der gesamten Wicklung ist die Montage aller Spulengruppen aus dem Übertragungswerkzeug in ein Innenwerkzeug. Dieses Innenwerkzeug ermöglicht aufgrund seiner kompakten Maße den Transfer aller Spulen in den Innenbereich des Stators

für die radiale Montage in dessen Nuten. Um die Spulen aus der radial um das Innenwerkzeug geschlossenen Übertragungskette zu übergeben, wird für jede Spule eine mechanische Betätigung mittels Schieber vorgesehen, welche durch einen Pneumatikzylinder aktuiert wird.

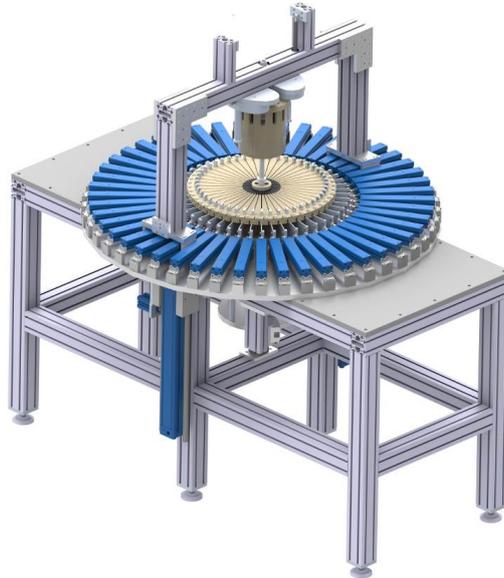


Abbildung 88: Modul 3 - Übergeben und Schränken in einem Innenwerkzeug

Neben der primären Funktion der Übergabe der Spulen aus dem linearen Übertragungswerkzeug in das Innenwerkzeug ermöglicht dieses Modul den zentralen Schritt für die Erzeugung des gewünschten Wickelschemas.

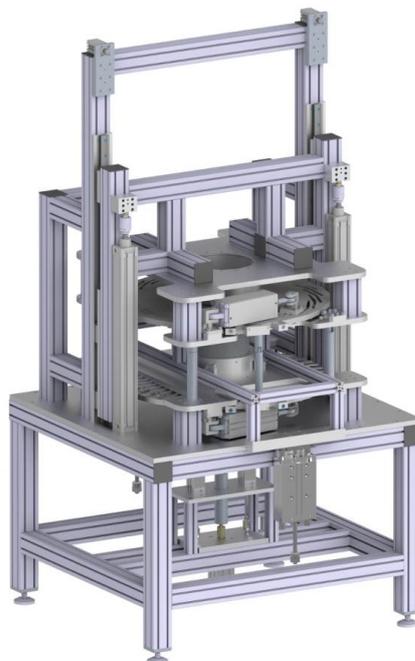


Abbildung 89: Modul 4 - Einbringen vom Innenwerkzeug in den Stator

Durch das Schränken der Spulen, während der innere Spulenschenkel bereits im Innenwerkzeug montiert ist und der äußere Spulenschenkel noch in der Übergabekette steckt, kann die kontinuierliche Schräglagenwicklung erzeugt werden. Für die Montage der Wicklung aus dem Innenwerkzeug in den Stator ist der gewählte Ansatz mit einem Sonnenrad und den genannten Schieber konstruktiv weiterentwickelt worden.

Durch das Gesamtkonzept wurden mögliche Prozessparallelisierungen bereits berücksichtigt. Diese wurden in den vier Modulen erfolgreich umgesetzt. Im Laufe der Entwicklung dieser Prozesse sind weitere Integrationen besprochen worden. In die konkrete Umsetzung sind unter anderem, wie beim Nadelwickeln, die 180°-Drehung der Düse als auch das automatisierte Isolieren des Wickelkopfs gekommen.

In folgender Abbildung 90 ist der Drahtführer, welcher auf der Linearwickelmaschine für Starkdrähte (LWS/S) montiert ist, dargestellt. Erkennlich sind zwei pneumatische Zylinder (blau), beide sind nötig, um das Schwenken der Düse um 180° zu ermöglichen. Die Führungen der Drähte sind in Gelb dargestellt. Zum einen werden die Drähte durch Keramikösen und zum anderen durch die Düse geführt. Durch den Schwenkzylinder ist es möglich, die Düse um +180° zu verdrehen und nach dem Bewickeln einer Spule um -180° zurück zu drehen. So wird vermieden, dass die Drähte sich bei mehreren Drehungen aufwinden.



Abbildung 90: Drahtführer der LWS/S

Die Wickelkopfisolationsstation ist einfach auf dem Modul 2 integrierbar und stellt sicher, dass der Wickelkopf mit einem Isolationspapier bestückt wird. Durch Volkswagen wurde das geeignete Material und auch der Kleber ermittelt (siehe Kapitel 7.2.3). Aufbauend auf diesen Materialien wurde die Station entwickelt. Für den Prototyp ist der einzige manuelle Prozess das Einlegen der Isolation in den dafür vorgesehen Speicher.

7.3.2 Kompaktwickelprozess

Zur experimentellen Umsetzung des Verfahrens auf einem geeigneten Versuchsträger wurde am wbk Institut für Produktionstechnik ein Demonstrator-Versuchsstand im CAD erstellt. Dieses virtuelle Modell ist unter Abbildung 91 dargestellt. In diesem kann das Spulenhandlingsystem in den Stator ein- und ausgefahren werden und dient gleichzeitig als Wickelschablone. Der Stator kann verschoben und gedreht werden. Hauptfokus im Projekt ist das Einbringen der Kompaktwicklung in den Stator. Der Versuchsstand ist so aufgebaut, dass zusätzliche Module, wie die Nutgrundisolation als vorgelagerter Prozess oder die Imprägnierung als nachgelagerter Prozess, in den Versuchsstand integriert werden können.

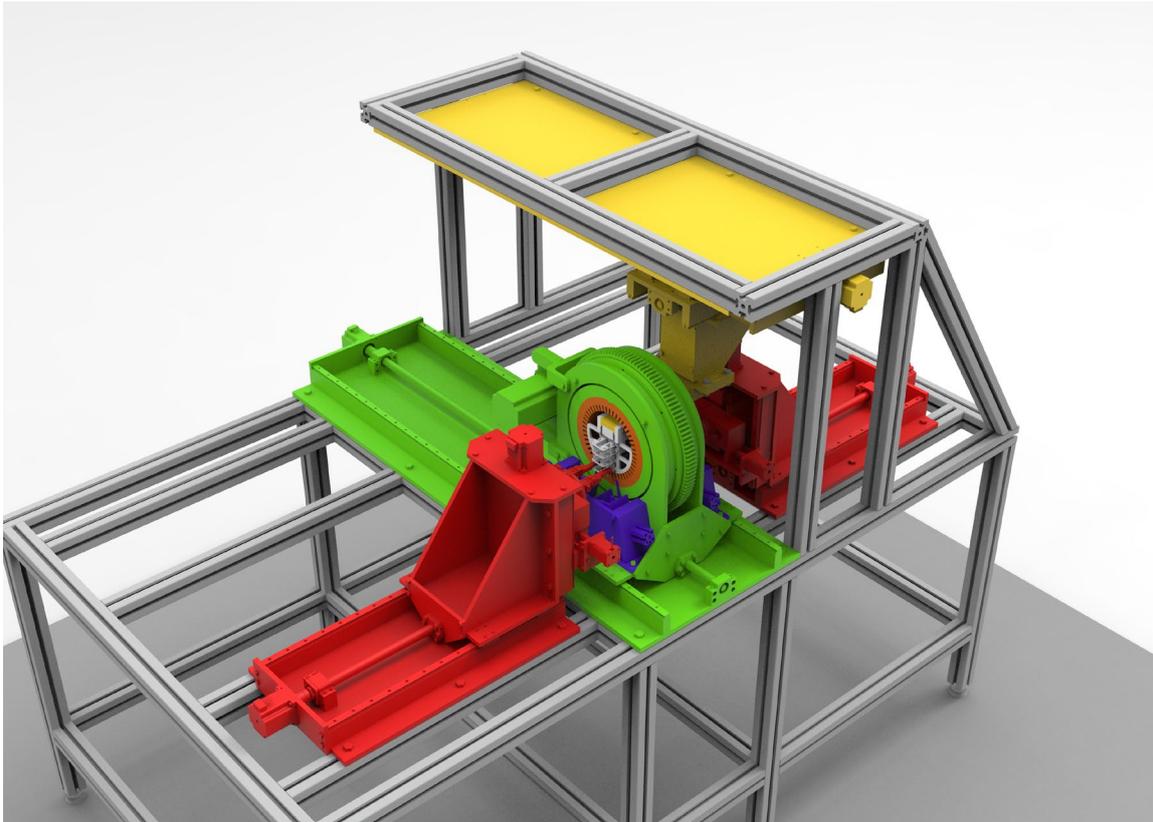


Abbildung 91: Entwurf des Versuchstandes zur Erprobung des Kompaktwickelprozesses: rot: Greifereinheit, grün: Statoreinheit, gelb: Portal zur Bewegung des Spulenhandlingsystems, weiß: Spulenhandlingsystem, grau: Grundgerüst

Da der geplante Versuchsstand nach dem Projekt NeWire, aber auch währenddessen, zur Heranführung von Studierenden an die Steuerungs- und Produktionstechnik genutzt werden und zu Lehrzwecken dienen soll, wurde eine umfangreiche Steuerung projektiert. Dementsprechend wurde das Steuerungskonzept modular und studentenfreundlich aufgebaut. Die Struktur ist unter Abbildung 92 dargestellt. Für die Steuerung der verschiedenen Bewegungen des realisierten Prüfstands wurde eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) für die höchste Steuerungsebene gewählt. Eine SPS bietet den bestmöglichen Freiheitsgrad für alle Arten von Automatisierungsaufgaben. Die Wahl fiel auf die BOSCH embedded control XM 21, mit einer OPC-UA-Schnittstelle für weitere Vernetzungen. Die SPS kann über die Software IndraWorks auf einem Personal Computer mit einer herkömmlichen Ablaufsteuerung programmiert werden. Die benötigten Aktoren und Sensoren wer-

den über SERCOS III-Feldbuskoppler an die SPS angeschlossen. Die Ein- und Ausgangsmodule vom Typ S67 ermöglichen einen einfachen Anschluss über dreipolige M8-Stecker. Dieses System ermöglicht eine hohe Flexibilität bei der Integration neuer Sensoren oder Aktoren. Die neun Linearachsen und der Motor für die Statorrotation werden von Schrittmotoren in den Klassen NEMA 17 bis NEMA 23XL angetrieben. Die Linearmotoren werden kundenspezifisch für die benötigten Längen- und Last einschränkungen gebaut. Die Motoren sind direkt mit einer Motorsteuerung des Typs IGUS Dryve D1 verdrahtet. Die logische Hardware-Verbindung zur SPS ist in fünf Bits realisiert, was die Nutzung von 32 Fahrbefehlen ermöglicht. Weitere Bits werden für Befehle wie Endlagen oder Freiräume genutzt. Die browserbasierte Programmierung und Inbetriebnahme macht den Einsatz besonders im experimentellen Umfeld und in der Ausbildungsarbeit mit Studenten einfach. Darüber hinaus ist das vorgestellte Steuerungstechnikkonzept bewusst in diesem modularen Aufbau konzipiert, was eine einfache Integration neuer Module ermöglicht.

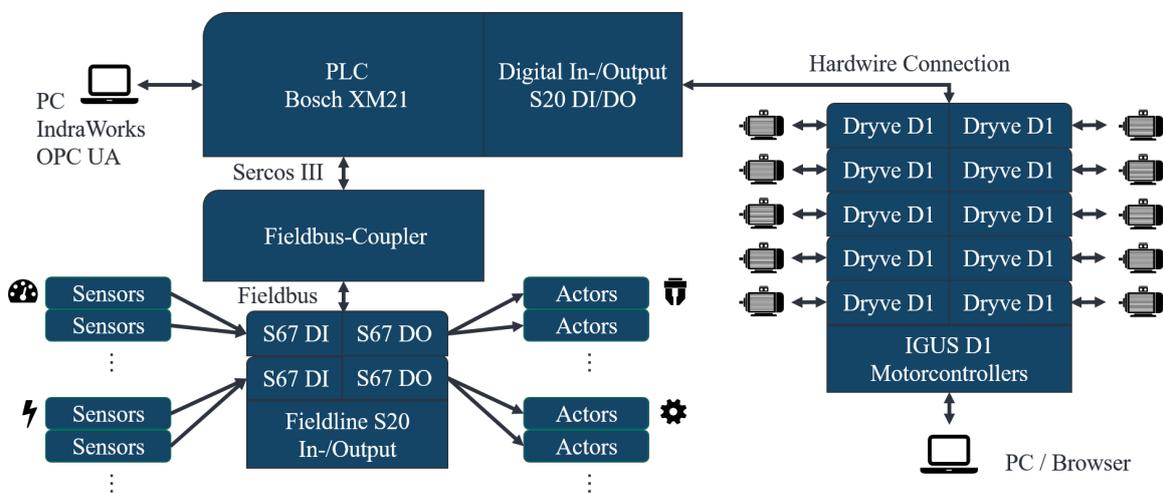


Abbildung 92: Darstellung des geplanten Steuerungskonzepts für den Demonstrator-Versuchsstand des Kompaktwickelverfahrens

7.4 INBETRIEBNAHME UND VALIDIERUNG ANLAGENTECHNIK



7.4.1 Automated Trickle Winding-Prozess

Der Aufbau, die Inbetriebnahme und die Erprobung der bereits vorgestellten Module folgen in diesem Abschnitt. Die nachfolgenden Bilder zeigen

- Modul 1 – Wickeln der Spulen (Abbildung 93),
- Modul 2 – Übergabe der Spulen an die Übergabekette (Abbildung 94),
- Modul 3 – Übergabe der Spulen an das Innenwerkzeug
- Modul 4 – Einbringen der Spulen in das Blechpaket (Abbildung 95).

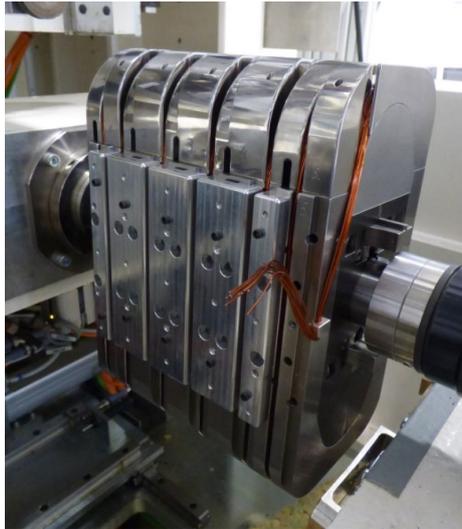
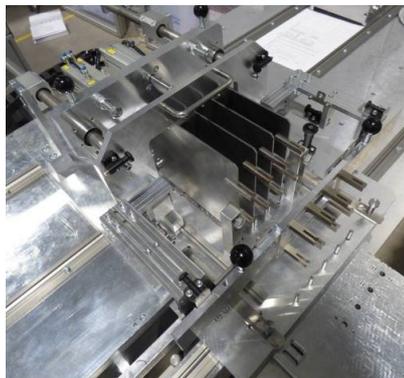


Abbildung 93: Wickelwerkzeug mit 3-eckigem Wickelkopf, eingespannt in die LWS/S

Das Wickeln mit einem Aufbau aus Stahl wurde im Vergleich zum Funktionsmuster aus Rapid Prototyping Material um einige Funktionen erweitert. Diese betreffen neben einer angepassten Klemmung für die Papiere in den Nuten und eine Fixiervorrichtung für die Startdrähte auch eine Verriegelung des Wickelkopfelementes, sodass dieses während des Wickelprozesses stabil am Rumpfkörper verbleibt. Die Dimension des Wickelwerkzeugs und die Kosten waren Anlass dafür, nur eine Spulengruppe auf der LWS/S zu wickeln und auf einen parallelen Betrieb mehrerer Wickelwerkzeuge zu verzichten. Auch die nachfolgenden Module 1.5 zum Falten und Kleben der Isolation sowie das Modul 2 zur Spulenübergabe wurden daher nur in einfacher Ausfertigung benötigt. Die in Kapitel 7.3.1 vorgestellte Drahtrotation wurde in dem Wickelprozess vollautomatisch zwischen den einzelnen Spulen integriert. Der dargestellte Aufbau in Abbildung 94 (links) wurde zunächst nicht in Modul 2 integriert. Mit jedem bewickelten Werkzeug konnte die Übergabe in Modul 2 neu erprobt werden, wodurch ein schnelles Einstellen des Übergabeprozesses möglich war. Für die Übergabe ins Innenwerkzeug für Modul 3 wurden jedoch 48 Spulen benötigt, weswegen das Einstellen und in Betrieb nehmen dieses Moduls entsprechend länger dauerte.



Modul 2: 2-Stufen-Schieber zur Übergabe der Spulen in die Übergabekette



Modul 3: Im Umbau für die Übergabe der Spulen mit 3-eckigem Wickelkopf

Abbildung 94: Baustände für das Modul 2 und Modul 3 vor der Erprobung

Analog zum Modul 3 konnte die Wicklungsmontage durch Expandieren auf Modul 4 zunächst nur mit einer erfolgreich eingebrachten Teilwicklung erfolgen, sodass dieses Modul als letztes erprobt werden konnte. Abbildung 95 zeigt die Adaptierung der Schieber mit den Auslegern vom Sonnenrad ohne montierten Stator und ohne Wicklung im Innenwerkzeug.



Abbildung 95: Trapezschieber im Innenwerkzeug, montiert auf Modul 4

Zur Herstellung von Statormustern wurden noch einige Anpassungen an den Modulen vorgenommen. So wurde zum Beispiel das Wickelprogramm zur Herstellung der Spulen auf dem Modul 1 bzgl. der Wickelgeschwindigkeit und des Lagenaufbaus optimiert. Abbildung 96 zeigt den finalen Stand des Wickelprozesses in der Linearwickelmaschine LWS/S.

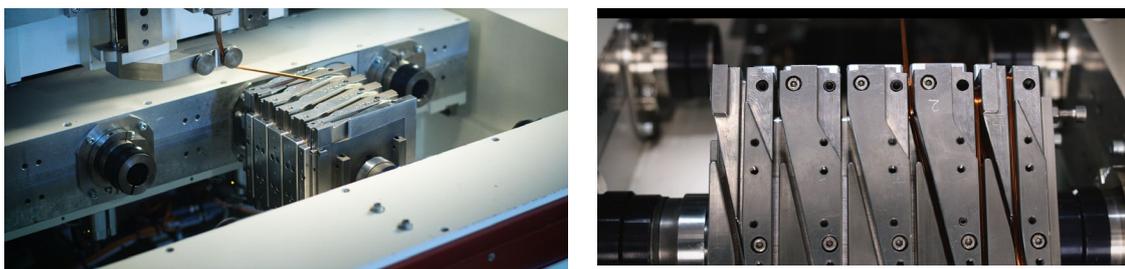


Abbildung 96: Optimierter Wickelprozess auf Modul 1

Um die Spulenisolation umlaufend um den Spulenschenkel zu schließen, hat sich die Anwendung einer weiteren Vorrichtung bewährt. Dieses Modul 1.5 nimmt das fertig bewickelte Werkzeug auf, schließt die Spulenisolationspapiere und verbindet die Papierenden mittels einer thermisch aktivierten Beschichtung wie in Abbildung 97 ersichtlich.

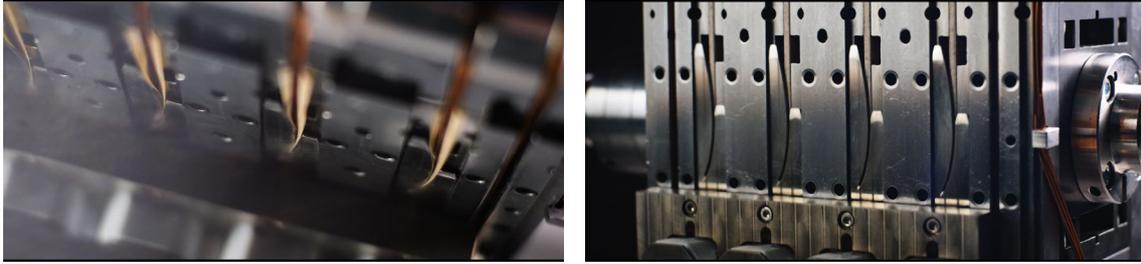


Abbildung 97: Schließen und Verkleben der Papiere auf Modul 1

Die Übergabe der Spulen in die Übergabeketten auf Modul 2 wurde durch mehrere Optimierungsschleifen bzgl. der Bauteil- und Haltertoleranzen optimiert, um eine reibungsfreie Übergabe der Spulenschenkel zu ermöglichen. Auch eine Isolation des Wickelkopfes wurde nachträglich noch in dieses Modul integriert, die jedoch in Abbildung 98 nicht zu sehen ist.

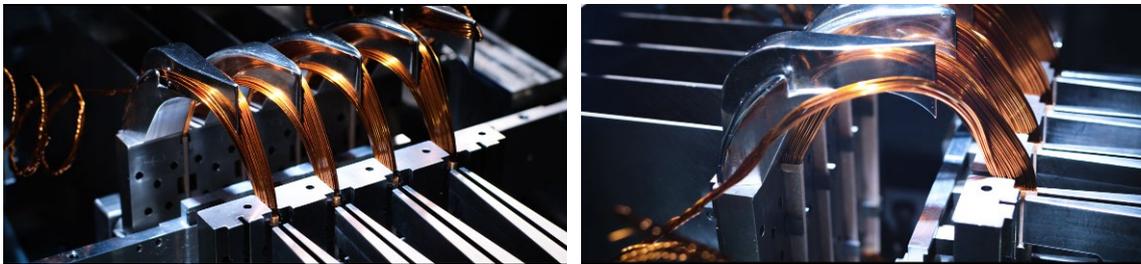


Abbildung 98: Übergabe der Spulen auf Modul 2

Nach der Bestückung aller Übergabekettenglieder können diese um das Innenwerkzeug positioniert werden. Dafür wurde das Modul 3 konzipiert. In Abbildung 99 (links) ist der erste Montageschritt bereits erfolgt und der erste Spulenschenkel wurde bereits ins Innenwerkzeug übertragen. Auf der rechten Seite wurde die Rotation durchgeführt, um die passende Spulenweite zu erzeugen. Nach der Montage des zweiten Spulenschenkels ins Innenwerkzeug ist die Montagereihenfolge auf diesem Modul abgeschlossen.

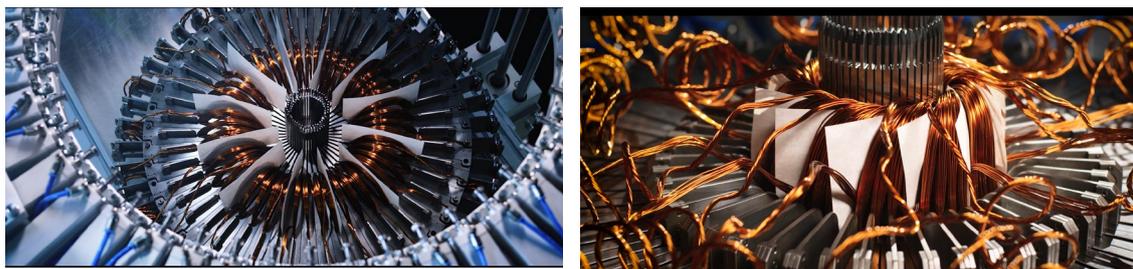


Abbildung 99: Montage der Spulen ins Innenwerkzeug auf Modul 3

Die finale Montage der Spulen aus dem Innenwerkzeug in den Stator erfolgt auf Modul 4. Dafür wurde das Innenwerkzeug mit Montageschieber versehen (vgl. Abbildung 99), die im Modul 4 extern über ein Sonnenrad adaptiert werden können. Wenn die Schieber ihren Montagehub bis zum Innendurchmesser des Stators durchgeführt haben, ist die komplette Wicklung im Stator montiert. Nun erfolgt noch die Formung des Wickelkopfes wie in Abbildung 100 rechts zu sehen.

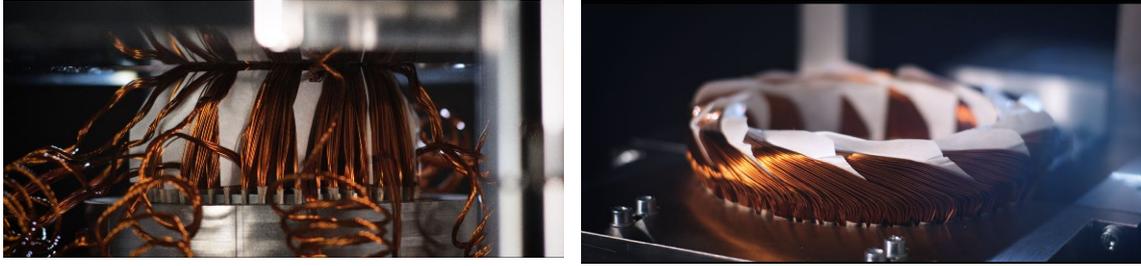


Abbildung 100: Expansionsprozess der Spulen in den Stator auf Modul 4

Zusätzliche Schritte wie die Verschaltung der Spulengruppen in Reihe sowie die Verschaltung der Phasen und die Isolation der Verschaltedrähte wurden manuell durchgeführt.

7.4.2 Kompaktwickelprozess

Nach dem vorherigen CAD-Entwurf wird in diesem Abschnitt der Aufbau des Demonstrator-Versuchsstandes des Kompaktwickelprozesses vorgestellt. Die Hauptkomponenten, wie das Spulenhandlingsystem (siehe Abbildung 101), die Greifer und weitere Funktionsbaugruppen, wurden im 3D-Druckverfahren (bekannt als FDM) gefertigt. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, weil das Rapid Prototyping eine schnelle Herstellung der Wickelwerkzeuge für den Prüfstand und erste Testläufe mit dem neuen Prozess ermöglicht. Aufgrund der fehlenden Erfahrung mit den geforderten Toleranzfeldern, Formen und der allgemeinen Funktionalität ist der erste CAD-Entwurf, der mit Kunststoffteilen ausgeführt wird, noch eine kostengünstige Alternative, da die Notwendigkeit von Optimierungen zu erwarten ist. In der weiteren Nutzung des Versuchsstandes werden diese in der zweiten Iterationsschleife aus Metall hergestellt. Der Prüfstand ist zu Forschungszwecken im Einsatz, daher werden sechs weitere Module um die Statorbefestigungsachse vorgehalten. Eine Papiereinlege-, Imprägnier- oder Kompressionsbaugruppe könnten bedarfsgerecht ergänzt werden. Der aufgebaute Demonstrator-Versuchsstand ist unter Abbildung 102 dargestellt.

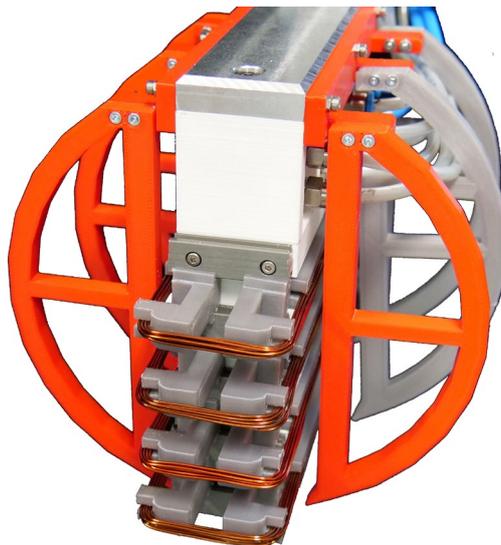


Abbildung 101: Spulenhandlingsystem mit aufgewickelten Formspulen

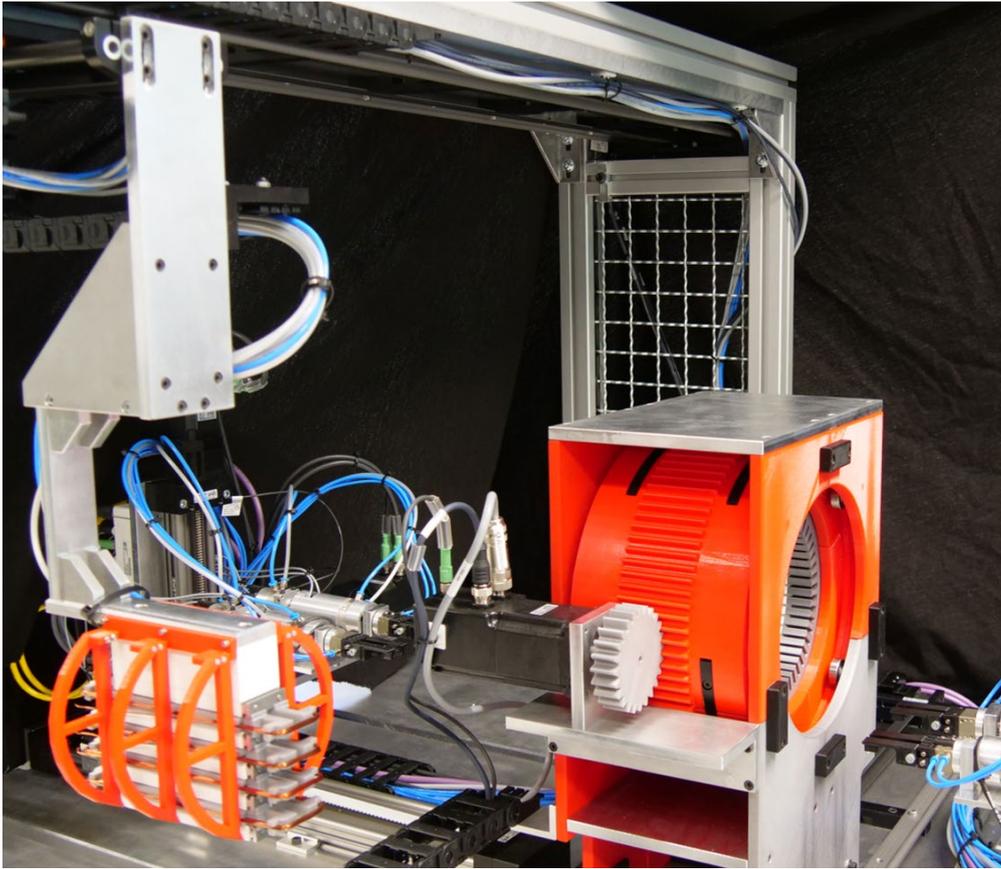


Abbildung 102: Umsetzung des Demonstrator-Versuchsstandes

Der Prozessablauf zum radialen Einbringen der Windungen der Teilspulen auf dem Demonstrator-Versuchsstand – angelehnt an das manuelle Träufelwickeln – ist in Abbildung 103 dargestellt.

Um dieses Wickelbild herstellen zu können, wurde eine Düsenanordnung gewählt, die es ermöglicht, die 2x5 Drähte pro Windung (bei zehn parallelen Teilleitern) zueinander zu verdrillen. Dies wurde durch die Anordnung in einem Planetenradgetriebe realisiert (siehe Abbildung 105).

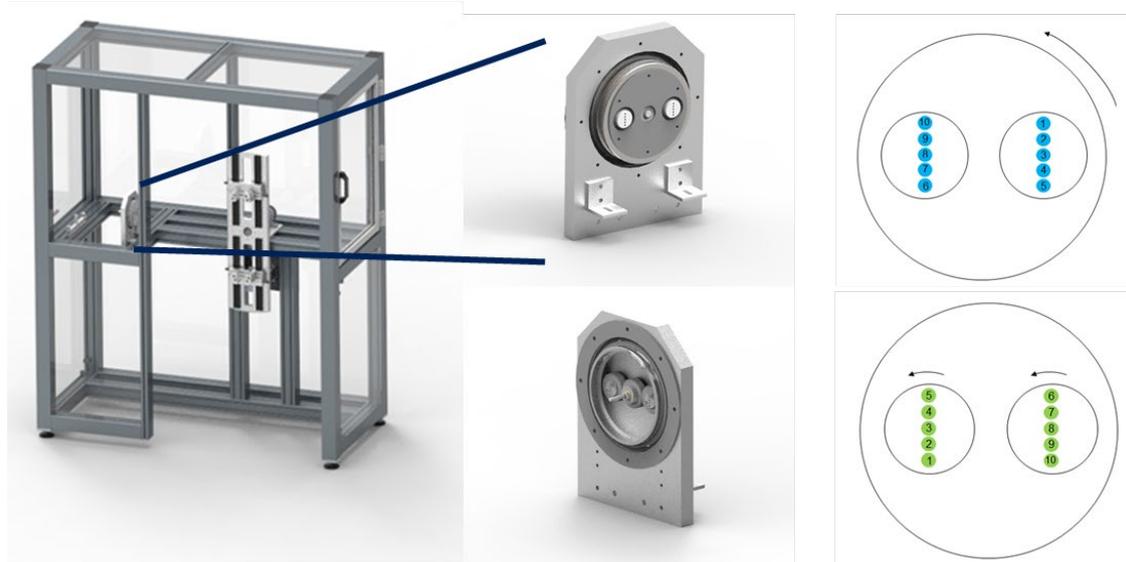


Abbildung 105: Schablonenwickler zur Herstellung von Spulen mit Verdrillungen im Wickelkopf (links), verdrehbare Düsen zur Realisierung der Lagenspiegelung (rechts)

7.6 UNTERSUCHUNG REFERENZTECHNIK NADELWICKELN

Mit den Untersuchungen der Nadelwickeltechnik an der konkreten NeWire-Geometrie konnte erst verzögert begonnen werden. Daher wurden die theoretischen Vorarbeiten an einer ähnlichen Geometrie aus einem vorangegangenen Projekt (ProLemo¹) durchgeführt, um eine schnelle und systematische Übertragbarkeit nach der Konstruktion der Werkzeuge und des Stators sowie der Auslegung des Wickelschemas zu gewährleisten.

7.6.1 Voruntersuchungen

Zur systematischen Untersuchung des Referenzprozesses Nadelwickeln wurde der Prozess zunächst in Teilprozessschritte unterteilt. Dabei lässt sich wie in Abbildung 106 dargestellt der Prozess zum Bewickeln einer Spule stets in 16 Schritte unterteilen. Diese Analyse bietet die Grundlage dafür, die Referenzprozesszeiten und notwendigen Wickelparameter für jede Spule jeder Phase systematisch aufzuzeichnen.

¹ ProLemo „Produktionstechnologien für effiziente Leichtbaumotoren für Elektrofahrzeuge“ FKZ: 01MX12053A

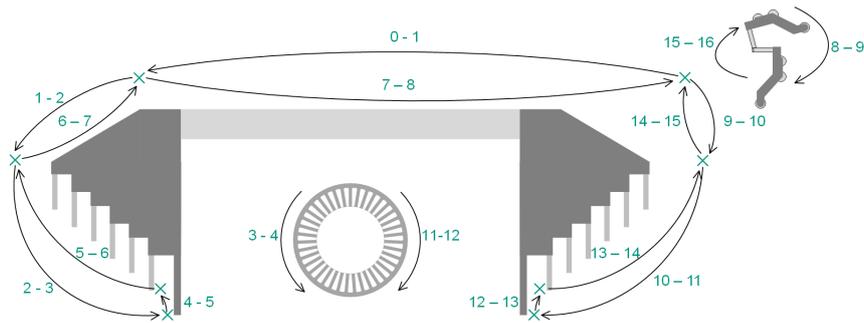


Abbildung 106: Systematischer Aufbau des Wickelprozesses einer Spule

Außerdem wurde eine Parametrierung der geometrischen Elemente vorgenommen, so dass die Wickelmaschine im Gesamten modelliert werden kann (vgl. Abbildung 107).

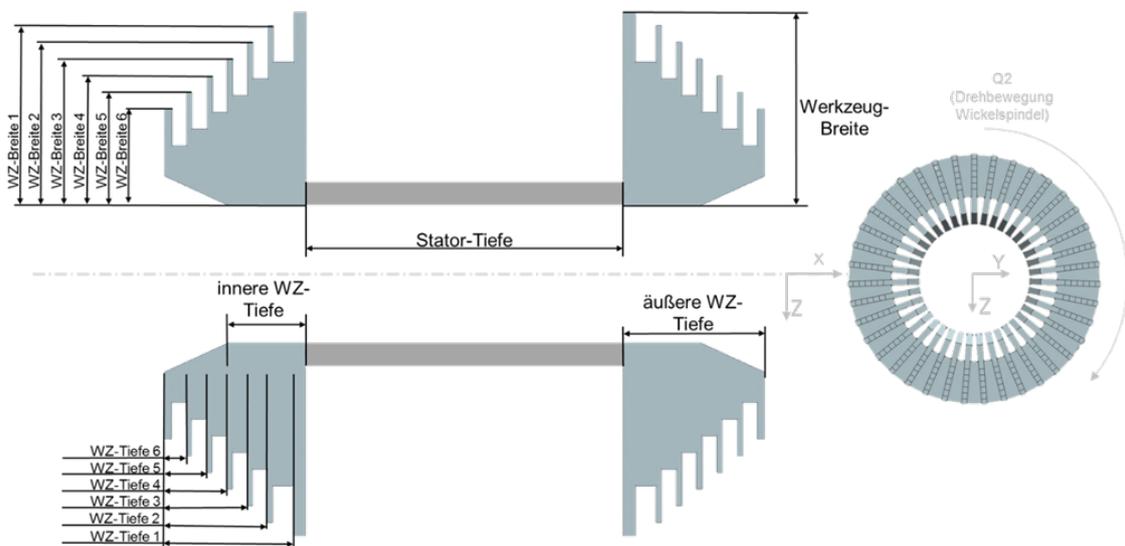


Abbildung 107: Parametrisierung des Werkzeugs

Um eine schnelle Inbetriebnahme zu ermöglichen, wurde zudem eine CAD/CAM-Schnittstelle entwickelt, die es ermöglicht die CAD-Daten sowie das Wickelschema einzulesen und einen Wickelcode zu generieren. Dieser sorgt für eine Vergleichbarkeit, da Fehler durch den Inbetriebnehmer vermieden werden. Die Funktion sowie der Aufbau dieser Schnittstelle werden im Folgenden dargestellt und validiert.

7.6.2 Umbau der Maschine NWSS am wbk

Um den Umbau der Maschine NWSS der Firma Aumann GmbH am wbk aufzuzeigen, sollen zunächst die Unterschiede zwischen dem ursprünglichen Aufbau aus ProLemo und dem neuen Aufbau aus NeWire darstellen.

Das Wickelwerkzeug für die NeWire-Geometrie hat, wie in Abbildung 108 dargestellt, im Gegensatz zum ProLemo-Werkzeug nur drei Wickelebenen (im Vergleich zu sechs Ebenen bei ProLemo).

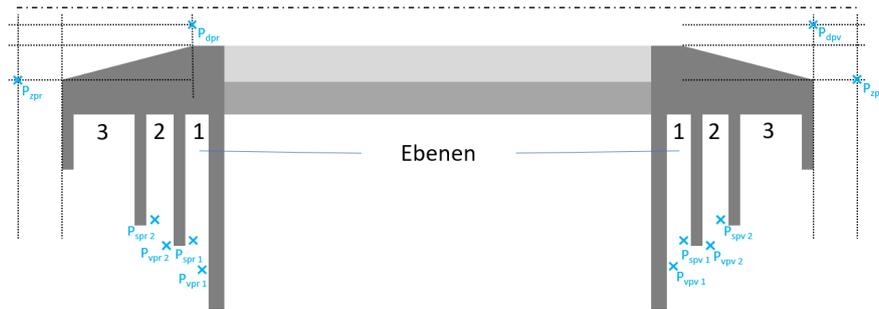


Abbildung 108: Aufbau Wickelwerkzeug NeWire Geometrie

Das Rollensystem musste aufgrund der geometrischen Rahmenbedingungen im Vergleich zum ProLemo-System teilweise sehr stark verändert. Wie in Abbildung 109 und Tabelle 9 dargestellt, ist insbesondere der Unterschied im Durchmesser von Rolle 1 signifikant; Rolle 2 existiert in der NeWire-Geometrie nicht mehr.

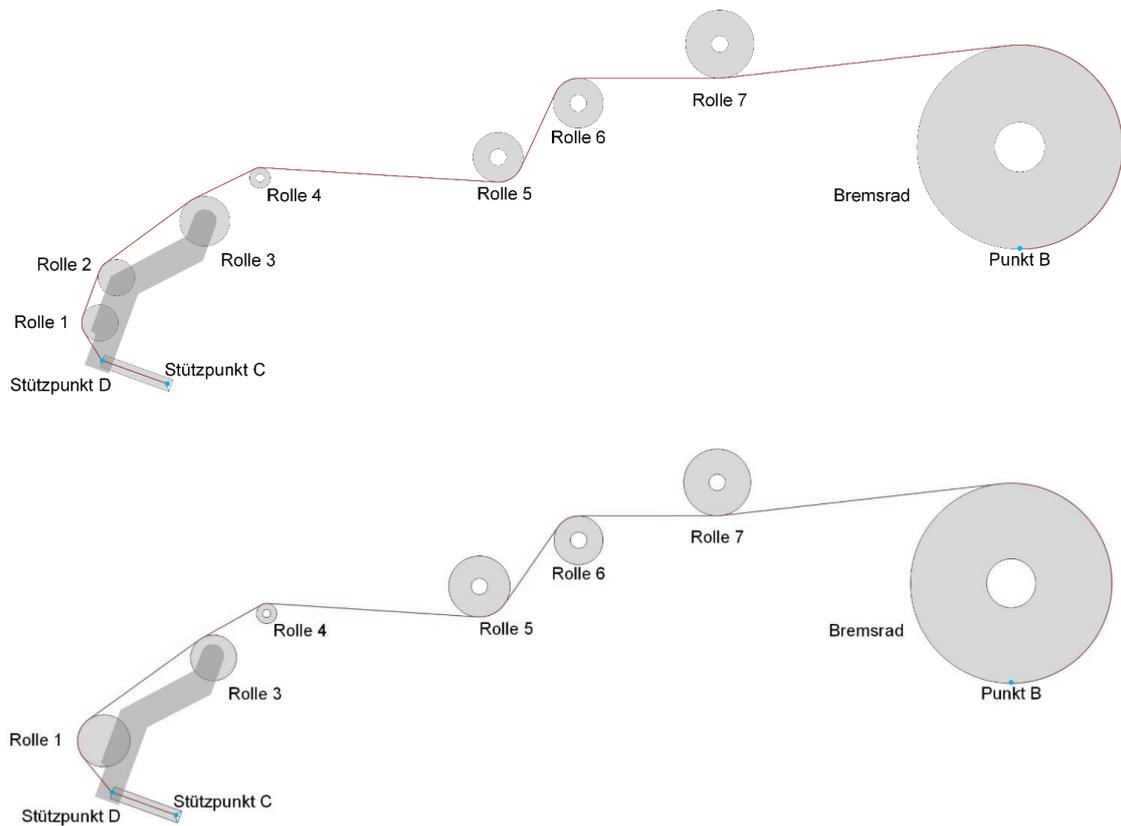


Abbildung 109: Vergleich des Unterschiedes im Rollensystem zwischen der ProLemo Geometrie (oben) und der NeWire Geometrie (unten).

Tabelle 9: Übersicht über die Geometrie- und Positionsunterschiede der Rollensysteme ProLemo und NeWire

Rollenbezeichnung	Unterschied ProLemo und NeWire	
Rolle 1	x_1	+18,42%
	z_1	-20,25%
	r_1	+118,18%
Rolle 2	x_2	Nicht vorhanden
	z_2	Nicht vorhanden
	r_2	Nicht vorhanden
Rolle 3	x_3	0,00%
	z_3	0,00%
	r_3	-20,00%
Rolle 4	x_4	-2,72%
	z_4	+7,24%
	r_4	0,00%
Rolle 5	x_5	-14,59%
	z_5	+43,65%
	r_5	+56,67%
Rolle 6 (=Sensor)	x_6	0,00%
	z_6	0,00%
	r_6	0,00%
Rolle 7	x_7	0,00%
	z_7	0,00%

	r_7	0,00%
Bremsrad	r_B	0,00%
Nadelstützpunkt D	$x_{D,0}$	-87,97%
	$z_{D,0}$	-6,0%
Nadellänge	d_{CD}	+20,27%

Eine weitere Umbaumaßnahme betrifft die Drahtbremse des Systems. Diese basierte bisher auf vier einzelnen Drahtbremsen, die im Rahmen des Projektes NeWwire auf eine Mehrdrahtbremse umgerüstet wurde, um bis zu zehn Drähte parallel bremsen zu können.

Die Drahtbremse wird von einem Servomotor angetrieben, dessen Drehzahl sich über die Steuerung einstellen lässt. Das Drehmoment der Drahtbremse wird über einen Pneumatikzylinder erzeugt, wobei der Druck auf diesen Zylinder über einen manuellen Druckregler bzw. ein Proportionalventil eingestellt wird. Aus der Druckkraft resultiert eine Anpresskraft, welche die Reibbeläge jeweils über zwei Stößel gegen kunststoffbeschichtete Rollen drückt, die als Bremsräder dienen. Die dabei entstehende Reibkraft wird auf die Drähte übertragen und die Drahtzugkraft erzeugt. Die Drähte werden anschließend über das Umlenkrollensystem bis zur Nadel der Nadelwickelmaschine geführt. Die Durchmesser der Bremsräder unterscheiden sich jedoch nicht von den ursprünglichen Bremsrädern.

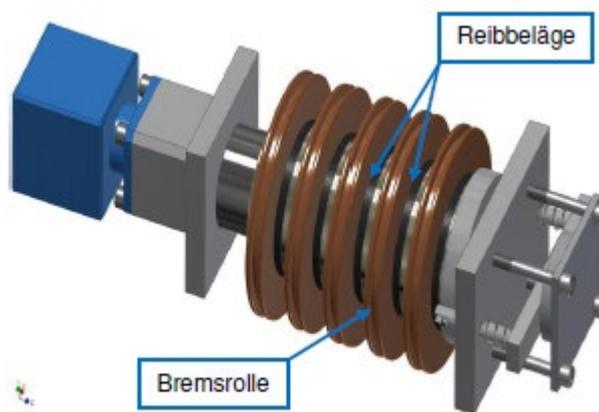


Abbildung 110: Drahtbremse von Aumann – Funktionsprinzip

Die bereits in Abschnitt 7.6.1 aufgezeigte Methodik und Systematik konnte jedoch trotz der abweichenden geometrischen Rahmenbedingungen problemlos auf die NeWwire-Geometrie übertragen werden. Dies soll im folgenden Abschnitt am Beispiel der CAD/CAM-Schnittstelle dargestellt werden.

7.6.3 Validierung der CAD/CAM-Schnittstelle

Die CAD/CAM-Schnittstelle dient der automatisierten Erstellung des Wickelprogramms aus den CAD-Daten von Stator und Wickelwerkzeugen. In der Schnittstelle ist dabei auch eine Kollisionsvermeidung implementiert, die dem Nutzer ein direktes Feedback gibt, ob

ein bestimmter Punkt angefahren werden kann. Die Schnittstelle ist in MATLAB implementiert. Die CAD-Daten müssen als STP-Datei vorliegen. Das Wickelschema wird in eine Excel-Tabelle übertragen. Die Ergebnisse wurden im Rahmen des Projektes NeWire vorab in [Hof-19] veröffentlicht.

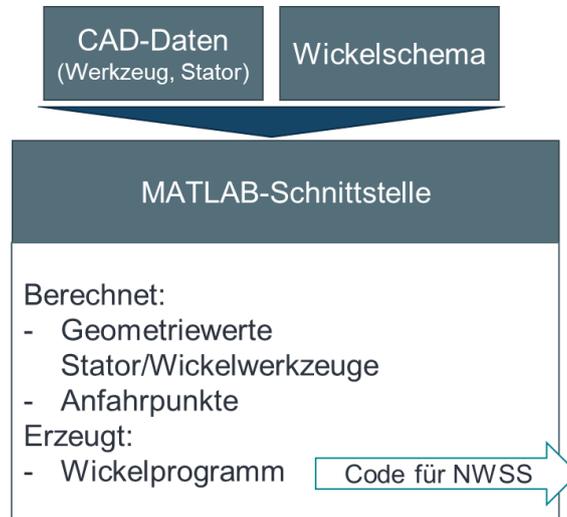


Abbildung 11: Aufbau der CAD/CAM-Schnittstelle

Die Validierung der CAD/CAM-Schnittstelle erfolgt in zwei Schritten. Zunächst muss sichergestellt werden, dass die Geometriedaten richtig eingelesen werden und keine Fehler aus der Verarbeitung der Daten resultieren. Im zweiten Schritt, werden die erstellten Wickelprogramme anhand von Wickelversuchen validiert.

Für die Validierung der CAD-Datenverarbeitung wurden jeweils die Geometrien von Stator und Werkzeug eingelesen und die Ergebnisse mit den Daten auf den technischen Zeichnungen verglichen. Zunächst sollen die Ergebnisse der Geometrieauswertung der Statorgeometrien bewertet werden. Dafür werden die STP-Daten der Stator-Dateien mit der CAD/CAM-Schnittstelle eingelesen. Als Vergleich dienen die technischen Zeichnungen, welche mit der CAD-Software NX 11 für beide Statoren erstellt wurden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 dargestellt. Es gibt keinerlei Abweichungen zwischen den Daten für beide Geometrien. Das Einlesen der Statorgeometrie ist damit validiert.

Tabelle 10: Validierung der CAD/CAM Schnittstelle – Statorgeometrie

Parameter	Abweichung in %
Statortiefe	0%
Innerer Radius	0%
Anzahl Nuten	0%

Für die Wickelwerkzeuge stand die NeWire-Geometrie der Firma Aumann zur Verfügung (vgl. Abbildung 112 (a)). Die Ergebnisse der Validierung sind in Tabelle 11 dargestellt. Für das originale NeWire 1-Werkzeug wird deutlich, dass die CAD/CAM-Schnittstelle anhand

des ProLemo-Werkzeuges erarbeitet wurde. Die durch die Schnittstelle ausgelesenen Werte weichen daher von den realen Werten ab. Dem kann entgegengewirkt werden, indem das originale Werkzeug im CAD nachbearbeitet wird. Das bedeutet, dass fertigungsbedingte Absätze (vgl. Abbildung 112 (a) & (b)) manuell aufgefüllt werden, damit diese für die CAD/CAM-Schnittstelle nicht mehr vorhanden sind. Die Übersicht in Tabelle 11 zeigt, dass dies zu dem gewünschten Ergebnis führt.



(a) Werkzeug NeWire



(b) Bearbeitetes Werkzeug NeWire

Abbildung 112: Vergleich der verschiedenen Versionen des Wickelwerkzeuges

Tabelle 11: Validierung der CAD/CAM Schnittstelle – Werkzeuggeometrie

	NeWire 1 Abweichung in %	NeWire 2 Abweichung in %
Wb ₁	25,24%	0%
Wb ₂	38,46%	0%
Wb ₃	97,74%	0%
Wt ₁	-61,99%	0%
Wt ₂	-70,87%	0%
Wt ₃	-99,95%	0%
Wb	0%	0%
Wt _{außen}	0%	0%
Wt _{innen}	-72,5%	0%

Für die Validierung der Erstellung von Wickelprogrammen wird mit der Schnittstelle ein Wickelprogramm erstellt, indem das Wickelschema als Excel-Tabelle und die CAD-Daten als STP-Dateien eingelesen werden. Es wird automatisiert und ohne Fehlermeldung ein Wickelprogramm erstellt, das über die Anfahrtpunkte, die in manuellen Versuchen Punkt für

Punkt angefahren werden, validiert wurde. Es kommt nicht zu Kollisionen, die Erstellung von Wickelprogrammen für gesamte Statoren kann als valide angesehen werden. Das Erstellen eines Wickelprogramms kann in 35-60 Sekunden durchgeführt werden (je nach Benutzer und Kenntnisstand des Programmes). Eine manuelle Programmierung eines Wickelschemas für einen gesamten Stator dauert selbst für geübte Programmierer bis zu 8 Stunden.

7.6.4 Durchführung von Versuchen mit 180°-Drehung

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Arbeiten an der Universität Kassel und der Volkswagen AG bringt eine 180°-Drehung der Spulen im Wickelkopf erhebliche Leistungsvorteile. Daher wurde durch die Firma Aumann die Nadeldüse so umkonstruiert, dass es möglich ist, die Düse manuell zu drehen. Eine Drehung der Düse im Prozess führt jedoch zu einer kurzzeitigen Erhöhung der Drahtzugkraft im Prozess. Um diese zu quantifizieren, wurde eine systematische Versuchsreihe durchgeführt, um die Auswirkungen der 180°-Drehung bei verschiedenen Prozessparametern festlegen zu können. Dabei wird die Drahtzugkraft mit dem Zugspannungssensor (SFD 200) der Firma Hans Schmidt GmbH erfasst und an die Steuerung übermittelt. Alle Versuche wurden mit neun Drähten durchgeführt.

7.6.5 Fertigung von Prototypen

Im Rahmen des Projektes wurde die Fertigung eines Prototypen des NeWire-Stators im Nadelwickelverfahren angestrebt. Aufgrund fertigungstechnischer Restriktionen ist die Herstellung einer Zweischichtwicklung mit Lagenwechsel mit der verwendeten Nadelwickelmaschine nicht möglich. Stattdessen wurde ein Stator-Prototyp mit einschichtigem Wickelschema hergestellt (siehe Abbildung 113).

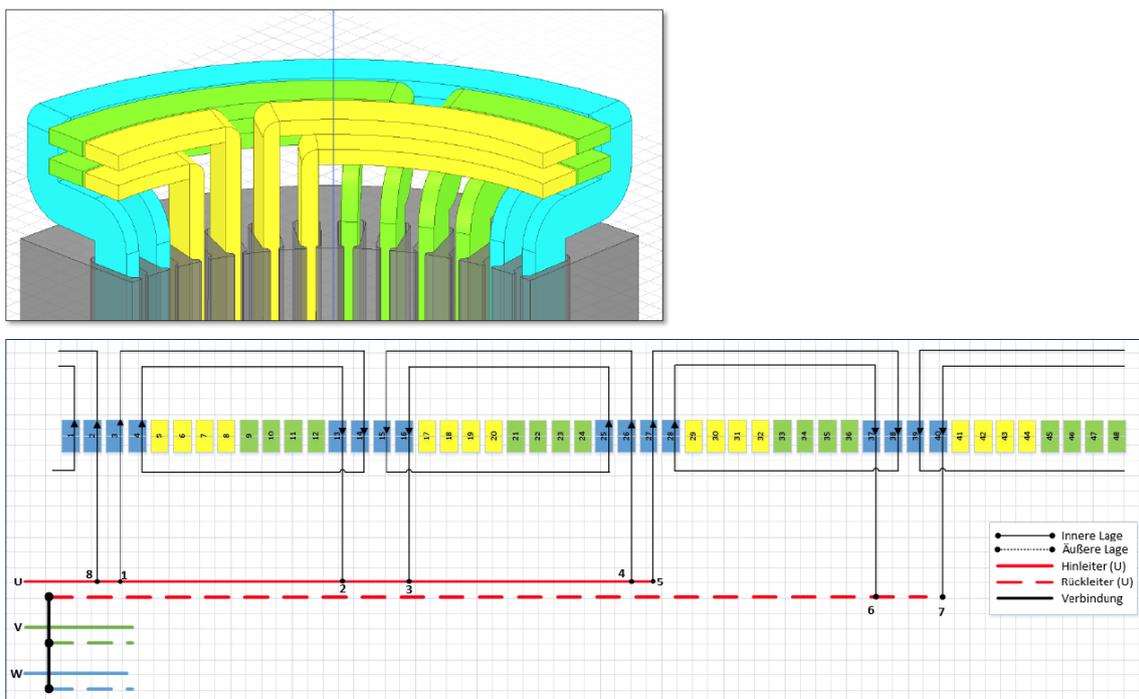


Abbildung 113: Für die gewählte Referenzfertigungstechnik des Nadelwickelns wurde eine Einschichtwicklung ohne Lagenwechsel gewählt, da eine Zweischichtwicklung mit Lagenwechsel prinzipbedingt nicht fertigbar ist

Im Vorfeld des finalen Bewickelns des Stators wurden hierzu diverse Vorversuche durchgeführt, um potenzielle Fehler und Probleme im Fertigungsprozess aufzudecken und gegebenenfalls zu beheben. Neben kleineren Anpassungen des Wickelprogramms zur Korrektur der Wickeltrajektorie und somit der Behebung von Drahtverlegefehlern (Abbildung 114 (links)) musste die Drahtzugkraft durch Reduzierung des pneumatischen Drucks verringert werden, da das Wickelwerkzeug infolge der Prozesskräfte plastisch verformt wurde (Abbildung 114 (rechts)).

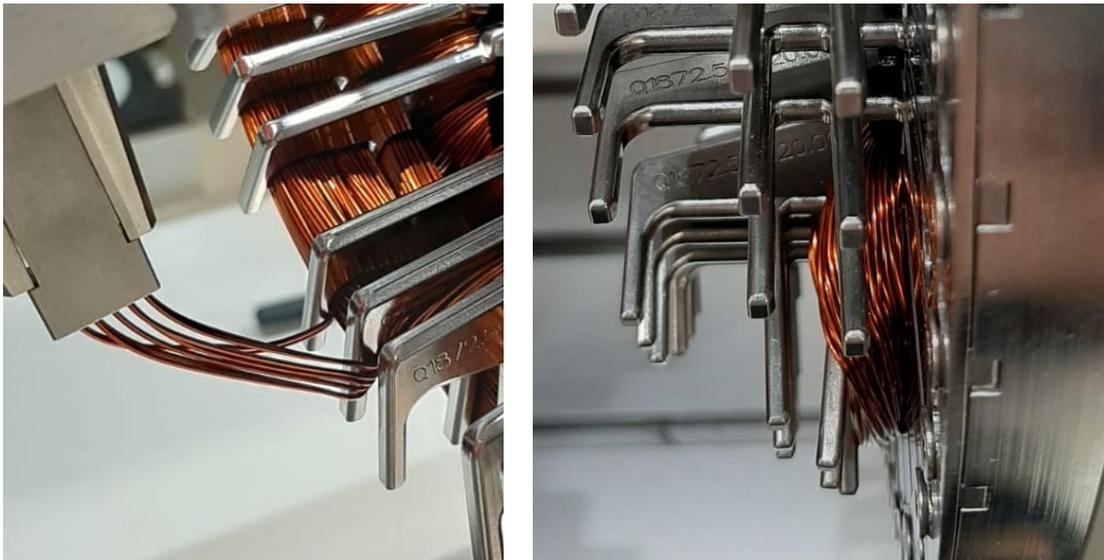


Abbildung 114: (links) Verlegefehler im Wickelkopf: Ein Draht liegt auf der falschen Seite des Wickelwerkzeugs; (rechts) Plastische Verformung des Wickelwerkzeugs durch Einwirkung des Drahtes

Abbildung 115 links zeigt den Wickelprozess des Stator-Prototypen mit neun Drähten in der Nadelwickelmaschine NWS/S der Aumann GmbH. Links im Bild ist die drehbare Aufnahme des Spulenkörpers (Statoraufnahme) zu sehen. Der Drahtführer mit Düse und durchgeführten Drähten ist rechts im Bild beim Bewickeln der Verschaltseite des Stators dargestellt. Abbildung 115 rechts zeigt das Bewickeln der Rückseite des Stators. Im Vergleich zum Bewickeln der Verschaltseite ist die Düse hierbei um ca. 180° verdreht.

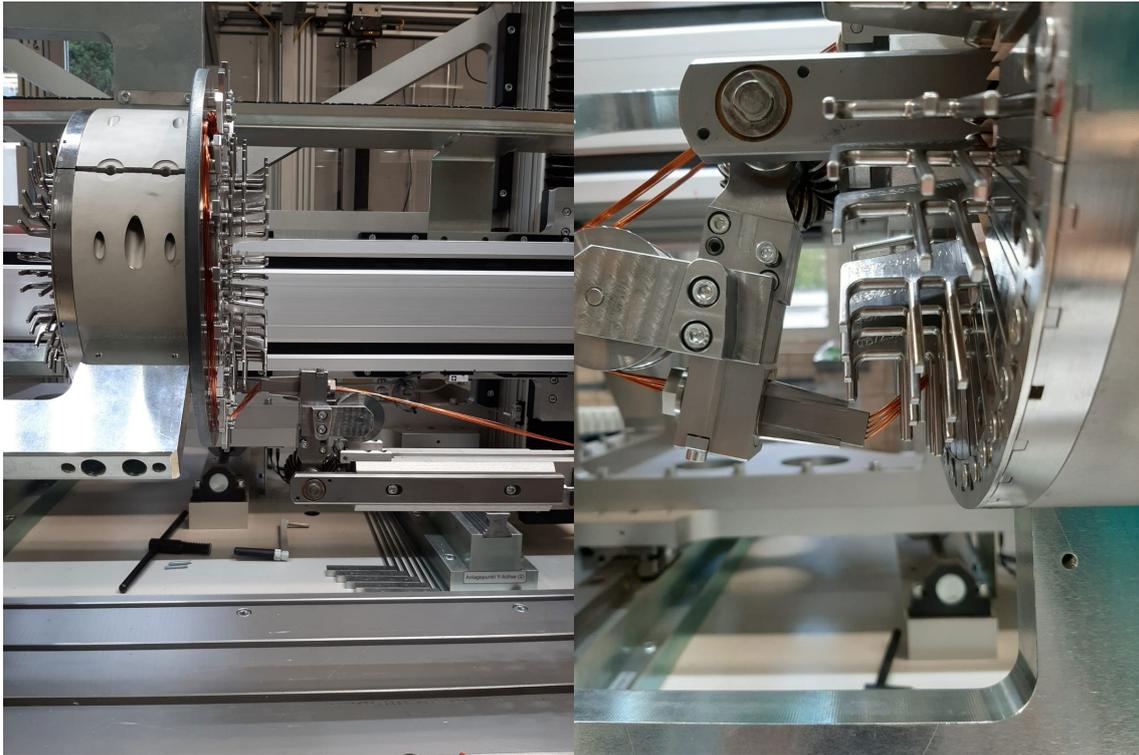


Abbildung 115: (links) Statoraufnahme mit Stator sowie Nadelträger; (rechts) Bewicklung der Rückseite des Stators mit neun Drähten

Der fertig gewickelte, noch in der Nadelwickelmaschine eingespannte Stator ist in Abbildung 116 dargestellt.

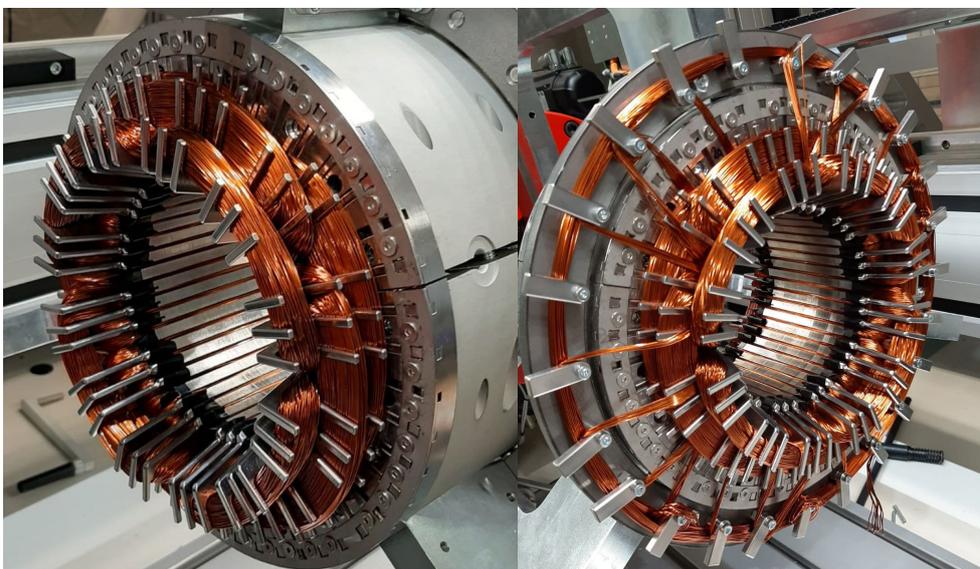


Abbildung 116: Die Wickelköpfe des Stator-Prototypen: Rückseite (links) und Verschaltseite (rechts)

Zum Ausbau des Stators muss dieser noch in der Statoraufnahme eingespannt aus der Nadelwickelmaschine entnommen werden (Abbildung 117 (a)). Um den Stator aus der Aufnahme in axialer Richtung entnehmen zu können, ist es nötig, die Wickelköpfe radial zu verpressen und somit deren Durchmesser zu verringern. Der Einsatz des dazu von der

Aumann GmbH bereitgestellten Wickelkopfpresswerkzeugs ist in Abbildung 117 (b) und (c) zu sehen. Abbildung 117 (d) zeigt den aus der Aufnahme entnommenen Stator mit radial gepresstem rückseitigem Wickelkopf.



Abbildung 117: Stator in Statoraufnahme (links); Einsatz des Wickelkopfpresswerkzeugs (Mitte links und Mitte rechts); aus Aufnahme entnommener Stator (rechts)

Nach zusätzlichem radialem Pressen der Verschaltseite lag der Stator in seinem vorerst endgültigen Zustand vor (Abbildung 118). Auf das weitere (axiale) Verpressen der Wickelköpfe wurde verzichtet, da zunächst die elektrische Prüfung (Isolationsprüfung, Widerstandsprüfung, Stoßspannungsprüfung) der Wicklung durchgeführt werden sollte. Bei dieser zeigte sich, dass die Wicklung beim Fertigen des Stators beschädigt wurde, weshalb auf einen Versand an die Universität Kassel zum weiteren Vermessen verzichtet wurde. Trotzdem ist über den Rahmen des Projektes hinaus die Fertigung mindestens eines weiteren Stators zu Vermessungs- und Ausstellungszwecken geplant, um die Untersuchungen abzuschließen.

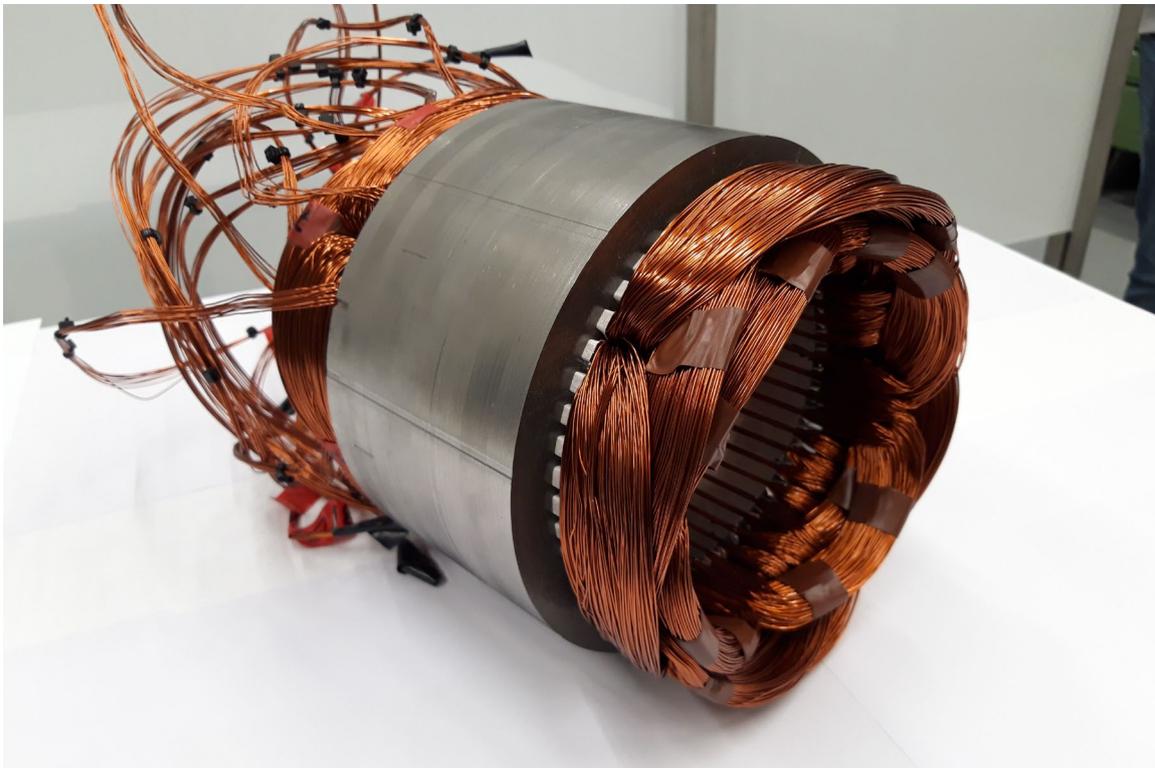


Abbildung 118: Ausgebauter Stator mit radial verpressten Wickelköpfen

8 Definition NeWire-Produktdesign und Prototypenaufbau

Im folgenden Kapitel soll das Produktdesign des NeWire Stators und der Aufbau der Prototypen dargestellt werden. Der Aufbau der elektrischen Maschinen wurde in diesem Fall durch Volkswagen realisiert.

8.1 NEWWIRE PRODUKTDESIGN

Das Statorblechpaket, wird aus 0,3mm starken Elektroblechen NO30-16HS mithilfe einer Backlackbeschichtung paketierrt. Weitere Details sind in der Abbildung 124 dargestellt.

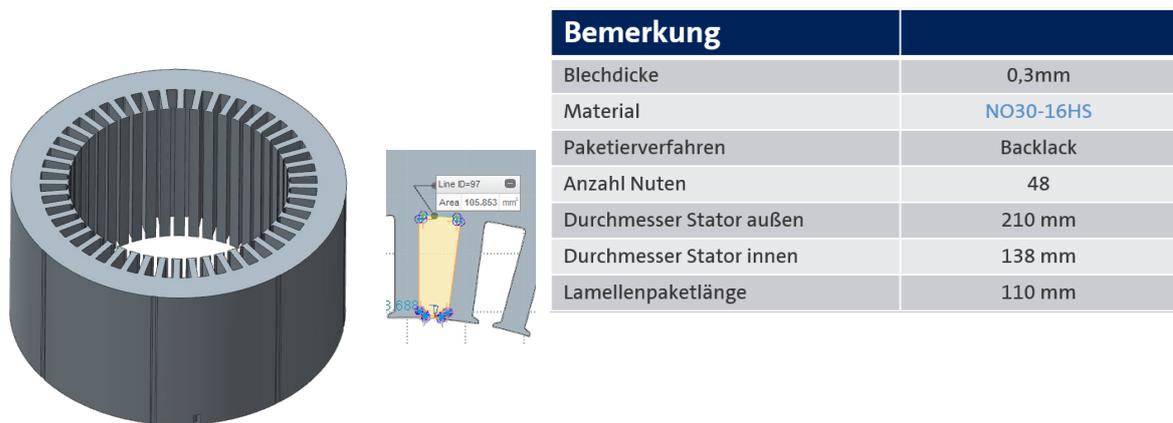


Abbildung 119: Stator details

Das Isolationssystem der Statornut, welches in der Abbildung 120 dargestellt ist, besteht aus einer Nutisolation mit dem Material Nomex410 und einer Dicke von 0,13 mm. Die Spulenisolation besteht aus einem NKN 2511 mit einer Dicke von 0,11mm. Dieses Isolationspapier ist mit thermisch aktivierbaren Beschichtung überzogen, welche genutzt wird, um die Schenkel des Papiers zu verschließen (vgl. Kapitel 7.2.4). Der Deckschieber besteht auch aus einem NKN, jedoch mit der Dicke von 0,35mm. Des Weiteren notwendig ist die Isolation der Phasen im Wickelkopf. Hier wurde sich für ein Nomex 410 Papier mit der Dicke von 0,18mm entschieden.

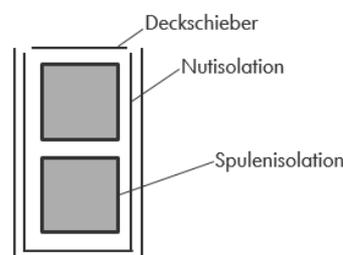


Abbildung 120: Nutisolationssystem NeWire

Das Wickelschema wurde schon in Kapitel 5.2.1 ausführlich beschrieben. Es handelt sich um eine gesehnte Zweischiichtwicklung, in der ein Schichtwechsel von Unter- in Oberschiicht realisiert wird. Die Eckdaten der Spulen und des Drahtes werden in der Tabelle 12

dargestellt. Die Spulen bestehen aus vier in Reihe geschalteten Teilspulen. Die Reihenschaltung erfolgt, indem die Teilspulen jeweils durchgewickelt werden und eine Verschaltung unnötig ist.

Tabelle 12: Drahtdetails

Bemerkung	
Spulenlänge	variabel
Anzahl Drähte (paralleler TL)	9
Windungen	7
Durchmesser (blank)	0,71mm
Lackisolation	PAI/PEI G2

Die Spulengeometrie kann aufgrund der einstellbaren Wickelwerkzeuge flexibel gehalten werden und je nach Bedarf geändert werden.

Für das Rotorblechpaket mit dem Käfigring und den Stäben wurden wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben alle nötigen Geometrien festgelegt. Das Blechpaket bestehend aus dem Material Save30-15 und wird nach dem Paketieren mit Kupfer ausgegossen. Der Außendurchmesser des Rotorblechpakets beträgt 137 mm und eine Länge von 111,2 mm.

8.2 PROTOTYPENAUFBAU

Für die ersten Prototypen wurde der Stator händisch, aber mit dem zuvor genannten Produktdesign, aufgebaut. Die fertigungstechnischen Einflüssen, wie der spezifische Spulenlaufbau des Automated Trickle Winding – Prozesses wurde bei der Statormontage beachtet. Die Abbildung 121 zeigt einen fertigen Stator Prototypen.

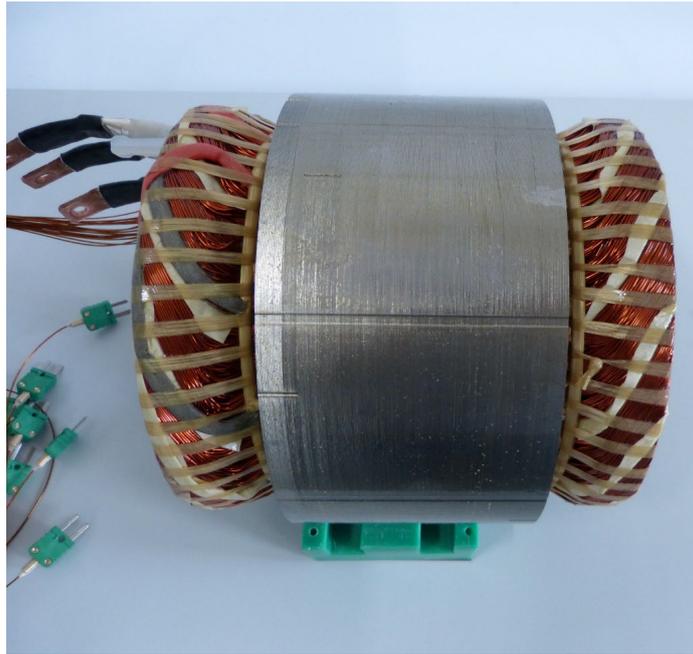


Abbildung 121: NeWire Stator

Nach dem Einbringen der Wicklung wurden die duktilen Thermoelemente für die Messung der Temperaturen im Wickelkopf und in der Nut eingebracht.

Um das Temperaturersatzmodell vollständig validieren zu können, wurden auch im Rotor mehrere Sensoren gesetzt um die Temperaturen gezielt aufnehmen zu können.

Der Zusammenbau der Elektromaschine erfolgt in folgenden Schritten. Zuerst wird der Stator in einem thermischen Prozess in die Hülse gefügt und an das Gehäuse verschraubt wie schon in Kapitel 5.4 erläutert.

Folgend wird der Rotor in das zuvor mit Sensoren ausgestattete Lagerschild gepresst. Bevor das Lagerschild mit dem Rotor zusammengefügt wird, müssen die Dichtflächen mit Dichtmasse versehen werden.

Sobald die Montage des Lagerschilds abgeschlossen ist, werden noch Anbauteile wie Wasserstutzen oder die Schnittstelle zur Leistungselektronik montiert. Abschließend erfolgt eine Dichtheits- und elektrische Prüfung bevor die elektrische Maschine freigegeben und auf dem Prüfstand erprobt werden kann.

9 Vermessung und Validierung eines Maschinenprototyps

9.1 VERMESSUNG DER PROTOTYPEN

Im Zuge des Projekts wurden umfangreiche Messungen mit zwei Prototypen und Teilaufbauten an einem Prüfstand des Fachgebiets Fahrzeugsysteme und Grundlagen der Elektrotechnik (FSG) der Universität Kassel durchgeführt. Die Messungen dienten maßgeblich den drei Schwerpunkten:

- Temperatursensoren des Prüflings und des Kühlmittels
- Massedurchfluss des Kühlmittels

9.1.2 Grundlegende Eigenschaften der Prototypen

Um die Temperaturentwicklung der Maschine während des Betriebs vorherzusagen, ist das Kennen der auftretenden Verluste essentiell [Mue-07]. Mit einer Reihe von Messungen werden grundlegende Versuche zum Verhalten der Maschine durchgeführt, die wichtige Informationen zu bestimmten Verlustgrößen und dem elektromagnetischen Maschinenverhalten liefern und so dabei helfen, die vorher getroffenen Annahmen zu verifizieren.

Zunächst wurden die Reibungsverluste ermittelt, welche sich im Wesentlichen aus Lager- und Ventilationsreibung zusammensetzen. Dies geschah auf zwei Arten. Zum einen wurden mit den Prototypen Auslaufversuche durchgeführt und zum anderen ließen sich die Reibungsverluste als ein Ergebnis aus den Messwerten eines Leerlaufversuchs berechnen. Weiterhin wurden Leerlaufversuche und Kurzschlussversuche durchgeführt, um die Eisenverluste und die charakteristischen Größen des Ersatzschaltbildes der Asynchronmaschine zu bestimmen. Für die Versuchsdurchführung von Leerlauf- und Kurzschlussmessungen wurden die Betriebsparameter (Drehzahl, Statorfrequenz etc.) so gewählt, dass sie die in der späteren Modellvalidierung verglichenen Betriebsfälle abdecken.

Um die Reibungsverluste experimentell in einem Auslaufversuch zu bestimmen, wurde wie folgt vorgegangen:

1. Konditionieren des Prototyps auf die erwarteten Betriebsbedingungen
2. Beschleunigen der entkoppelten Maschine bis zur Obergrenze des betrachteten Drehzahlbereichs
3. Freier Auslauf der unbestromten Maschine und erfassen des Drehzahlverlaufs bis in den Stillstand
4. Berechnung der Reibungsverluste aus zeitlicher Verzögerung und Trägheitsmoment des Rotors
5. Aufteilen der Reibungsverluste in Lager- und Ventilationsreibung

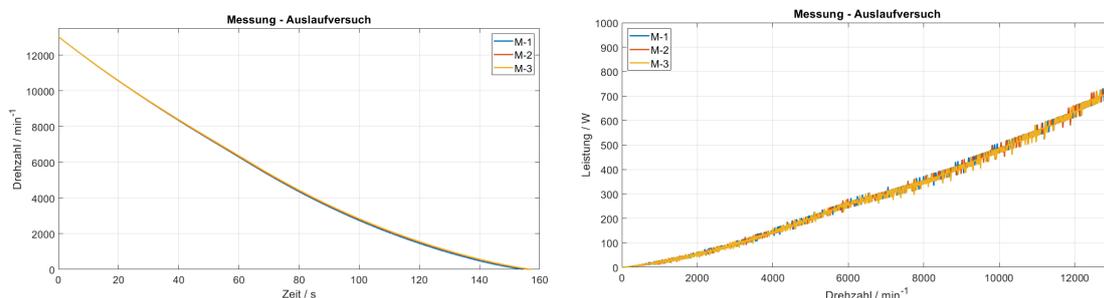


Abbildung 123: Auslaufverhalten (links) und berechnete Reibungsverluste (rechts) des Prüflings

Für das in Abbildung 123 gezeigte Auslaufverhalten wird zunächst die Rotationsenergie für jeden Zeitschritt bestimmt:

$$E_{rot} = \frac{1}{2} \cdot \Theta \cdot \omega^2 \quad \text{Formel 27}$$

Hierbei ist Θ das Trägheitsmoment und ω die Winkelgeschwindigkeit des Rotors.

Die Reibungsverluste ergeben sich aus der Abnahme der Rotationsenergie:

$$P_{Reib} = -\frac{dE_{rot}}{dt} \quad \text{Formel 28}$$

Für die Anwendung der Reibungsverluste bei der Modellierung wird eine Funktion definiert, welche die Reibungsverluste je Drehzahl annähert und in einen linearen und einen quadratischen Term aufteilt. Es wird angenommen, dass sich die Lagerreibung weitestgehend linear mit der Drehzahl ändert, während die Ventilationsverluste quadratisch mit ihr zunehmen:

$$P_{Reib} = P_{Lager} + P_{Vent} \quad \text{Formel 29}$$

$$P_{Lager} = \alpha \cdot \omega \quad \text{Formel 30}$$

$$P_{Vent} = \beta \cdot \omega^2 \quad \text{Formel 31}$$

Für die Konstanten wurden die Werte $\alpha = 265,8 \cdot 10^{-3} \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$ und $\beta = 186,5 \cdot 10^{-6} \frac{kg \cdot m^2}{s}$ gefunden.

9.1.3 Versuche zur Validierung der Parameter der thermischen Simulation

Speziell zum Zwecke der Validierung des thermischen Modells wurden am Prüfstand mehrere Versuchsreihen mit Prototypen und Teilaufbauten durchgeführt. Tabelle 13 listet diese zusammen mit ihrem vornehmlichen Verwendungszweck auf. Jede der Versuchsreihen fokussiert sich auf einen anderen Bereich des modellierten Wärmequellennetzwerks und der an der realen Maschine zugehörigen Wärmetransportmechanismen [Roe-19]. Für jede Versuchsreihe wurden zudem mehrere Messläufe mit variierenden Versuchsparametern durchgeführt.

- In Versuchsreihe 1 wurde ein Prototyp vor dem Einsetzen des Rotors vollständig gegen die Umgebungsluft isoliert. Anschließend wurde die über das Kühlmittel abgegebene Wärmemenge in Abhängigkeit von der Durchflussgeschwindigkeit des Kühlmittels und variierender Stromwärmeverluste in der Statorwicklung gemessen. Alle weiteren Messungen erfolgten mit vollständig montierter E-Maschine.
- In Versuchsreihe 2 wurde die resultierende Wärmeverteilung und der Wärmetransport zum Rotor und an die Umgebung für unterschiedliche Kühlmitteltemperaturen erfasst. Hierbei war die E-Maschine unbestromt und das eigentliche Kühlmittel die Wärmequelle.
- In Versuchsreihe 3 wurde der Rotor der inaktiven E-Maschine über die Lastmaschine des Prüfstands fremdgedreht. Der Fokus hier lag auf der resultierenden Wärmeverteilung, hervorgerufen durch Lager- und Ventilationsverluste. Die E-Maschine wurde solange bei einer Drehzahl gehalten, bis sich eine konstante Wärmeverteilung einstellte.

- In Versuchsreihe 4 wurde die Statorwicklung erneut bestromt. Im Gegensatz zur ersten Versuchsreihe war die E-Maschine hier vollständig montiert und nicht gegen die Umgebungsluft isoliert.
- In Versuchsreihe 5 wurden einzelne Lastpunkte eingestellt, die Messdaten für den regulären Maschinenbetrieb lieferten. Diese Messdaten wurden direkt aus der Messung der Dauerleistungskennlinie gewonnen (vgl. Abschnitt 9.1.4). Hier wurde ein Arbeitspunkt solange gehalten, bis sich ein stationärer Betriebszustand ergab.

Tabelle 13: Versuchsreihen für die Validierung des thermischen Modells

#	Bezeichnung	Primäre Verwendung bei der Validierung
1	Stator-Bestromung E-Maschine (ohne Rotor)	Wärmetransport über Kühlmittel
2	Nur Kühlung	Wärmeabgabe an Rotor und Umgebung
3	Drehung Rotor	Lager- und Ventilationsreibung
4	Stator-Bestromung E-Maschine (vollständig montiert)	Wärmeübergänge an Nutisolation und von Stator zu Kühlmantel
5	Lastpunkte	Vollständige Validierung (enthält alle Verlustarten)

9.1.4 Messreihen zur Verifizierung der Maschinenperformance

Um die hergestellten Prototypen hinsichtlich der erreichten Performance zu charakterisieren, wurden diese einer Reihe automatisierter Prüfungen unterzogen. Zum einen wurden Wirkungsgradkennfelder mit einer Vielzahl an Stützstellen verteilt über den abrufbaren Betriebsbereich gemessen und zum anderen wurden die Drehmoment-/Drehzahlkennlinien sowohl für den Dauerbetrieb als auch für den Kurzzeitbetrieb als die wesentlichen charakteristischen Kennlinien ermittelt und anschließend mit den zu Projektbeginn definierten Anforderungen verglichen.

Um wiederholbare Messungen und eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden für die Prüfungen automatisierte Steuerroutinen implementiert. Für jeden Arbeitspunkt wird die getestete Maschine zunächst auf die immer gleichen Betriebsbedingungen konditioniert, bevor die im Nachgang ausgewerteten Messwerte aufgezeichnet wurden. Es wurde eine direkte Wirkungsgradbestimmung aus abgegebener und aufgenommener Leistung durchgeführt [Mue-07]:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{auf}} \quad \text{Formel 32}$$

Zu beachten ist, dass der gemessene Wirkungsgrad um die Prüfstandverluste korrigiert werden musste. So wurde für die abgegebene Leistung die Schleppverluste des Prüfstands und für die aufgenommene Leistung die Zuleitungsverluste bei der rechnerischen Bestimmung des tatsächlichen Wirkungsgrads berücksichtigt. Abbildung 124 zeigt das ermittelte Kennfeld. Der maximale Wirkungsgrad η_{max} beträgt 92,7 %.

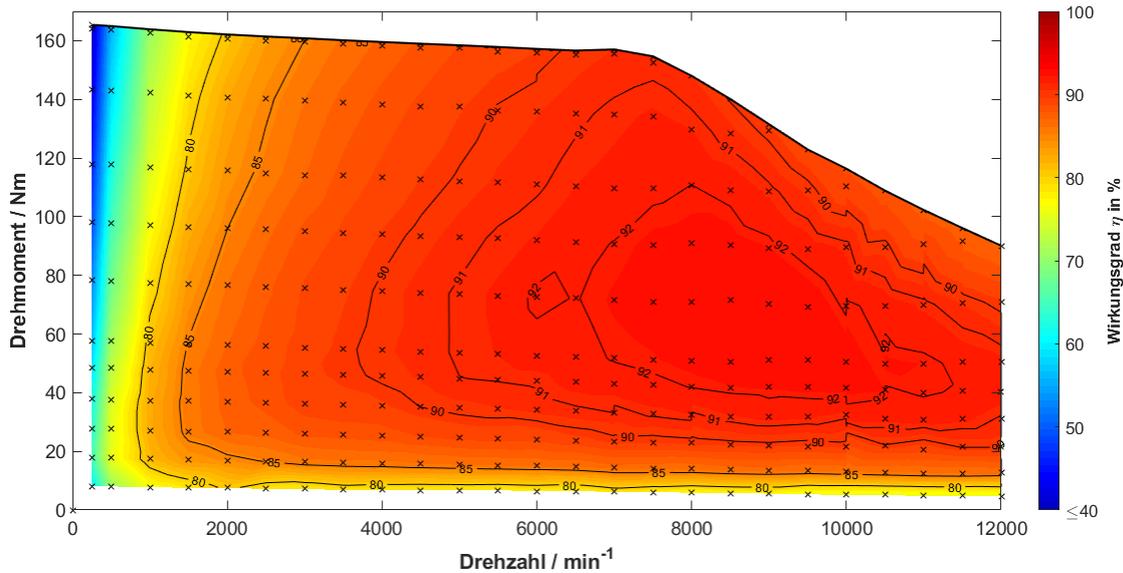


Abbildung 124: Wirkungsgradkennfeld 1. Prototyp

Zum Ermitteln der Kennlinien von Dauerbetrieb (S_1 -Kennlinie) und Kurzzeitbetrieb (S_2 -Kennlinie) wurden Steuerungen entwickelt, die den Prüfling für jede gemessene Drehzahl zunächst wieder auf eine definierte Ausgangsbedingung konditionieren und sich dann in iterativen Messungen den gesuchten Größen annähern. Für den Dauerbetrieb heißt dies, dass zu jeder Drehzahl das maximale Drehmoment bestimmt wurde, bei welchem die Maschine bei kontinuierlichem Betrieb die Grenztemperaturen nicht überschreitet. Für den Kurzzeitbetrieb ist das Drehmoment ermittelt worden, welches für eine Dauer von 30 Sekunden konstant gehalten werden kann, ohne dass sich die Maschine von einer Anfangstemperatur im Stator und Rotor von $100\text{ }^\circ\text{C}$ auf Temperaturen über dem Grenzwert erwärmt.

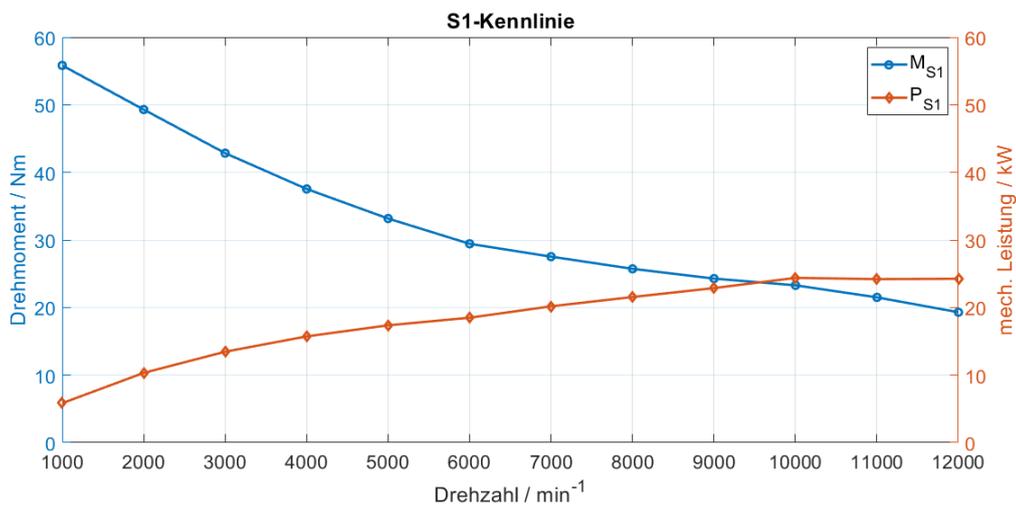


Abbildung 125: Kennlinien für den Dauerbetrieb (S_1 -Kennlinie) des 1. Prototyps

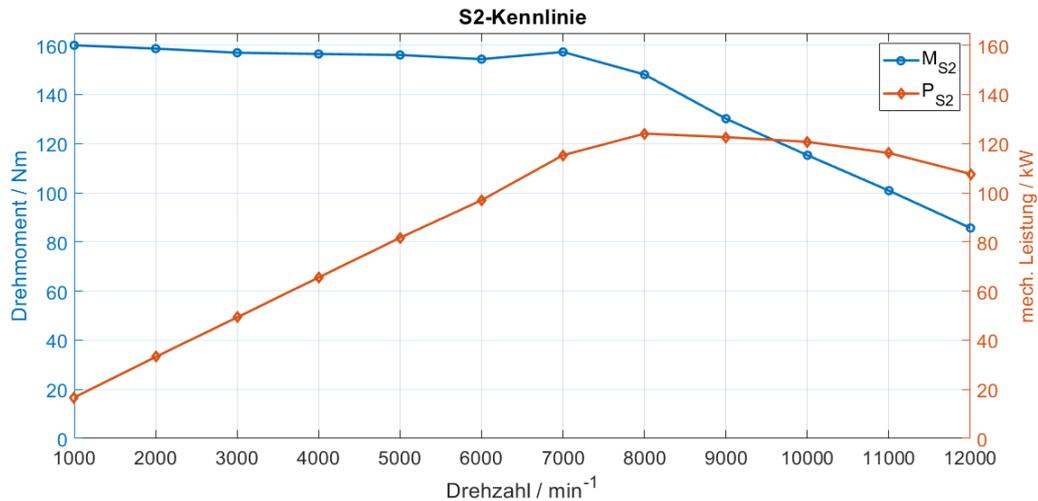


Abbildung 126: Kennlinien für den Kurzzeitbetrieb (S₂-Kennlinie) des 1. Prototyps

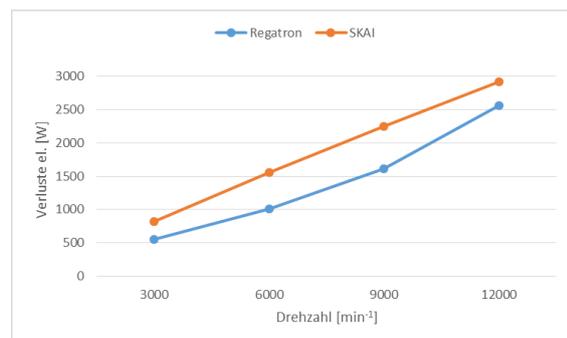
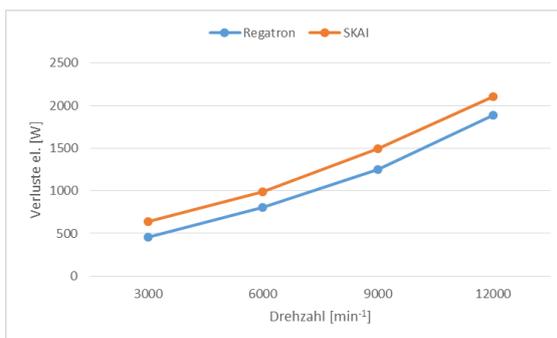
Abbildung 125 und Abbildung 126 zeigen den Verlauf von S₁- und S₂-Kennlinie. Die mit dem Prototyp durchgeführten Messungen am Prüfstand belegen, dass die Leistungen aus der Anforderung (vgl. Kapitel 4) erreicht werden. In Tabelle 14 sind einzelne Messwerte den erwarteten Kennwerten gegenübergestellt.

Tabelle 14: Vergleich der Messungen mit Anforderungen an die Maschinenperformance

Bemessungswerte	Symbol	Wert (Soll)	Wert (Ist-Max)
Maximales Drehmoment im Grundstellbereich	M_{S2}	≥ 155.4 Nm	160 Nm
Maximale Leistung bei maximaler Drehzahl	P_{S2}	≥ 88.8 kW	91 kW
Dauerleistung	P_{S1}	$\geq 22,2$ kW	24,3 kW

9.1.5 Betrieb mit oberwellenarmer Spannungsversorgung

Beim Betrieb der E-Maschine an einem Frequenzumrichter verursachen durch den Umrichter im Ständerstrom hervorgerufene Oberschwingungen sowohl zusätzliche Stromwärmeverluste in der Ständerwicklung als auch zusätzliche Verluste im Kurzschlusskäfig des Läufers [Mue-07]. Um diesen Sachverhalt näher zu untersuchen, wurden mehrere Messreihen mit einer oberwellenarmen Spannungsversorgung der Firma Regatron als Alternative zum Frequenzumrichter (SKAI) durchgeführt.



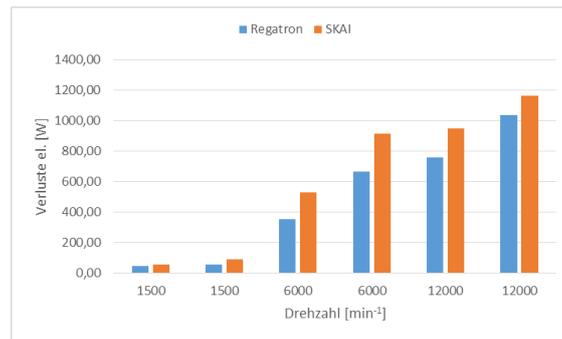


Abbildung 127: Gegenüberstellung Verluste unter Last (oben) und im Leerlauf (unten)

In zwei Messreihen mit unterschiedlicher Belastung sowie bei unbelasteter Maschine wurden über den Drehzahlbereich hinweg immer jeweils zwei gleiche Betriebszustände von Umrichter und Regatron-Quelle gegenübergestellt und die Entwicklung der Umrichterbedingten Zusatzverluste betrachtet. Hierbei sind diese Zusatzverluste deutlich mehr von dem Belastungsfall als von der Drehzahl abhängig. Um weitere Erkenntnisse für die thermische und elektromagnetische Modellierung ableiten zu können, wurden Phasenströme und Spannungen neben der Messung mit dem Leistungsanalysator auch mit dem Transientenrekorder aufgezeichnet. Dies erlaubte eine Analyse der auftretenden Oberschwingungen und des resultierenden Klirrfaktors sowie eine Erweiterung der elektromagnetischen Simulation, welche gewöhnlich nur ein Grundwellenmodell oder eine geringe Anzahl Harmonische berücksichtigt.

9.2 VALIDIERUNG DER SIMULATIONSMODELLE

Bei der Validierung der Simulationsmodelle geht es darum, die während der Auslegung der entwickelten thermischen und elektromagnetischen Modelle anhand von am Prüfstand gewonnenen Messdaten zu überprüfen. Für die thermische Simulation schließt dies eine Optimierung einzelner Modellparameter, welche zuvor nicht analytisch bestimmt werden konnten, mit ein.

9.2.1 Thermische Simulation

Die Validierung des thermischen Modells erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurden die in Abschnitt 9.1.3 beschriebenen Versuchsreihen 1 bis 4 dazu genutzt die unterschiedlichen Aspekte des Wärmetransports und die auftretenden Verlustarten unabhängig voneinander zu betrachten und zugehörige Modellparameter iterativ anzupassen. Abschließend wurde das optimierte Modell mit der letzten Versuchsreihe 5 auf Validität geprüft. Hier wurden die Simulation und die Messungen des regulären Maschinenbetriebs miteinander verglichen.

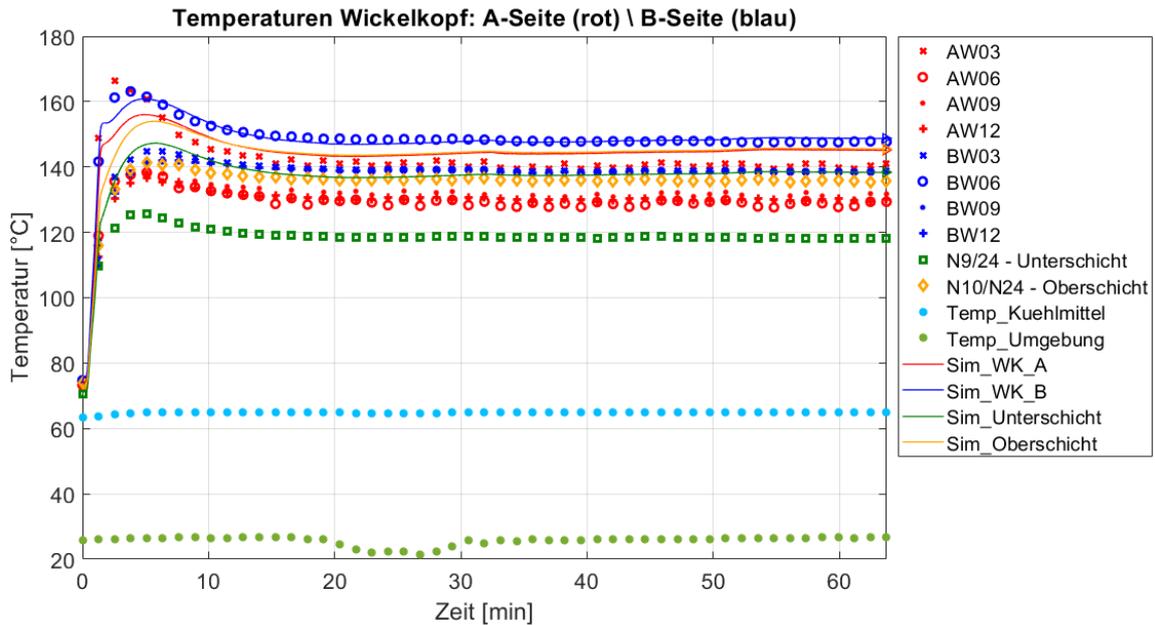


Abbildung 128: Vergleich von Simulation und Messung für einen Teilbereich der Maschine

Die zu vergleichenden Versuche wurden vollständig nachsimuliert. Für jeden Zeitschritt einer Messung wurden die Verluste bestimmt und in der Simulation als Wärmequellen eingepreist. Da die Messungen durchgeführt wurden, bis sich stabile Temperaturverhältnisse einstellen, ließen sich sowohl das dynamische als auch das stationäre Verhalten der Simulation nachvollziehen und vergleichen. Abbildung 128 zeigt die Auswertung einiger Sensoren für eine Messung aus Versuchsreihe 5. Ähnliche Plots wurden auch für die übrigen Bereiche der E-Maschine erstellt. Während diese Art der Darstellung ihren Fokus vor allem auf den zeitlichen Verlauf der Versuche legt, zielt die Übersicht in Abbildung 129 primär auf die Temperaturverteilung im stabilen Zustand ab. Während der zeitliche Verlauf maßgeblich von den Wärmekapazitäten beeinflusst wird, spielen für die erreichten Endtemperaturen vornehmlich die thermischen Widerstände eine Rolle. Die Übersicht gibt eine Möglichkeit, die gemessenen und simulierten Temperaturen sowie die Wärmeflüsse im Detail zu betrachten.

Die abschließende Validierung mit Messwerten aus der Dauerleistungsprüfung wurde für mehrere Drehzahlbereiche ausgeführt. An den kritischen Messstellen der E-Maschine betrug die maximale Abweichung weniger als 5,75 °C. Eine Herausforderung stellten die Messdaten vermeintlich an gleicher Position befindlicher Sensoren dar, die teilweise mehr als 10 °C betrogen. Hierbei handelte es sich zum Beispiel um zwei Sensoren, welche allerdings in zwei sich am Umfang des Stators gegenüberliegenden Nuten platziert wurden. Dies liegt vor allem daran, dass das schwierige händische nachträgliche Montieren der Sensoren in der Nut zu Toleranzschwankungen in der Positionierung führt und somit statt der Temperatur in der exakten Nutmitte z.B. eher die Nutwandtemperatur erfasst werden kann. Die insgesamt dennoch gute Übereinstimmung von Messung und Simulation erlaubt fortan weiterführende simulationsgestützte Untersuchungen wie sie beispielsweise bereits im Rahmen des Projektes in Abschnitt 9.4 Verwendung fanden.

9.2.2 Elektromagnetische Simulation

Der elektromagnetische Abgleich wurde durch die Finite-Elemente-Methode mit Hilfe des Software-Tools ANSYS Maxwell (siehe Abbildung 130) durchgeführt. Ziel ist es hierbei, die magnetischen Flussdichten und magnetischen Feldstärken in der Maschine, welche durch die Einprägung von Strömen im Stator hervorgerufen werden, möglichst genau zu bestimmen [Dop-17]. Mit diesen ermittelten Größen kann dann das innere Moment

$$M_i = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{1}{1+\sigma_R} \cdot \text{Im}\{I_S^S \cdot (\Psi_R^S)^*\} \quad \text{Formel 33}$$

bestimmt werden. Hierbei ist σ_R die Rotorstreuiziffer, I_S der Statorstromraumzeiger und Ψ_R der Rotorflussraumzeiger. Diese Gleichung beschreibt das Systemverhalten unter idealisierten Annahmen [Nus-17]. Im Anschluss an die zeitintensive Simulationsdurchführung werden in einem nachgelagerten Post-Prozess die bis dahin vernachlässigten Verluste berücksichtigt (siehe Abbildung 131). Hierbei handelt es sich um die Stromwärme-, Eisen-, Reibungs- und Zusatzverluste im Stator und Rotor.

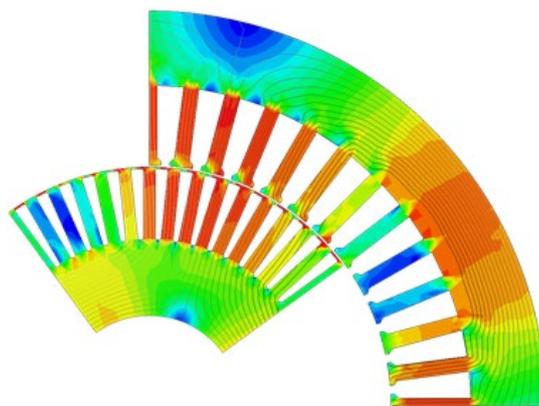


Abbildung 130: Beispiel der FEM-Simulation mit ANSYS Maxwell

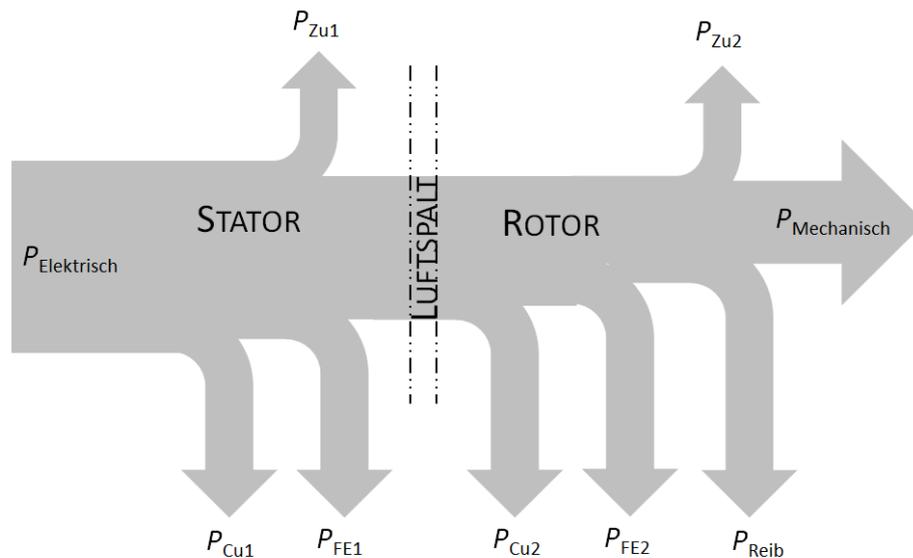


Abbildung 131: Verlustaufteilung in einer Asynchronmaschine aufgeteilt für Stator und Rotor [Dop-17]

Die Stromwärmeverluste

$$P_{Cu} = 3 \cdot k_r \cdot R(\vartheta) \cdot I^2 \quad \text{Formel 34}$$

werden zum einen temperaturabhängig berücksichtigt und zum anderen kommt ein sogenannter Widerstandserhöhungsfaktor k_r zum Einsatz, welcher den Stromverdrängungseffekten in den Spulen Rechnung trägt [Jun-16]. Die Eisenverluste P_{FE} werden üblicherweise mit Hilfe der spezifischen Verluste p_{FE} berechnet, indem diese mit der jeweiligen Eisenmasse m_{FE} multipliziert werden:

$$P_{FE} = p_{FE} \cdot m_{FE} \quad \text{Formel 35}$$

Die Maschine wird hierzu in Abschnitte mit jeweils ähnlichen Flussdichten unterteilt (Statorzähne, -joch, Rotorzähne -joch) und für jeden Abschnitt wird die spezifische Verlustleistung getrennt bestimmt [Dop-17]. Als Verlustmodell kommt hierbei der Ansatz von Jordan zum Einsatz [Jor-24]:

$$p_{FE} = k_h \cdot f \cdot \hat{B}^2 + k_w \cdot f^2 \cdot \hat{B}^2 \quad \text{Formel 36}$$

Hierbei handelt es sich bei dem Parameter k_h um den Hysterese- und bei k_w um den Wirbelstromverlustkoeffizienten. Beide wurden zuvor vom Projektpartner Volkswagen mit Hilfe von Messungen in einem Epsteinrahmen identifiziert. Die Reibungsverluste P_{Reib} wurden wiederum zuvor messtechnisch vom Fachgebiet FSG der Universität Kassel am Prüfstand ermittelt. Bei den Zusatzverlusten P_{Zu} handelt es sich um alle Verluste, die man nicht den zuvor genannten zuschreiben kann. Dies sind z.B. Ummagnetisierungsverluste in leitfähigen Konstruktionsteilen oder aber auch parasitäre Effekte durch eine nicht ideale Oberflächenbeschaffenheit der Statorinnenbohrung und der Rotoroberfläche. Berücksichtigt werden diese Effekte hier mit einem Zuschlagsfaktor von 0,5 % der aufgenommenen Leistung [Bin-17] [Dop-17].

Für die dargestellte Maschine können nun die Wirkungsgrad-Kennfelder berechnet werden. Ein Suchalgorithmus identifiziert hierzu im Grundstellbereich die Arbeitspunkte nach der Regelstrategie MTPA (Maximum Torque Per Ampere) und im Feldschwächbereich nach der Methode MTPV (Maximum Torque Per Voltage). Hierzu ist es erforderlich, auch die induzierte Spannung an der Wickelkopfinduktivität L_{WK} zu berücksichtigen. Diese lässt sich nach [Adz-08] wie folgt abschätzen:

$$L_{WK} = 2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot w^2 \cdot l_{WK} \cdot \lambda_{WK}}{p} \quad \text{Formel 37}$$

Hierbei ist w die Windungszahl, l_{wk} die Wickelkopfhöhe und p die Polpaarzahl. Die Stirnleitwertzahl λ_{wk} kann für Käfigläufer-Asynchronmaschinen mit Zweischicht-Ständerwicklung nach [Kla-62] mit einem Wert von ca. $\lambda_{wk} = 0,2$ angegeben werden.

Abbildung 136 zeigt nun das berechnete Wirkungsgradkennfeld der E-Maschine. In Abbildung 136 sind die Gesamtverluste P_{VGes} zu sehen, welche nach der zuvor dargestellten Vorgehensweise berechnet wurden und für die Bestimmung des Wirkungsgrades

$$\eta = \frac{P_{\text{elektrisch}} - P_{VGes}}{P_{\text{elektrisch}}} \quad \text{Formel 38}$$

herangezogen wurden.

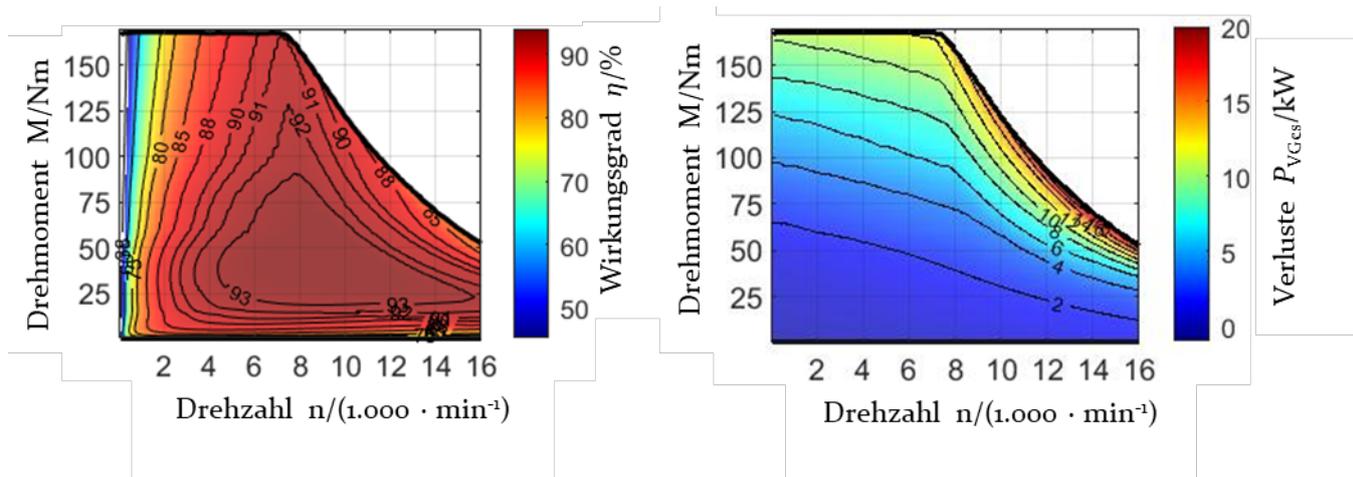


Abbildung 132: (a, links) berechnetes Wirkungsgradkennfeld; (b, rechts) berechnete Gesamtverluste P_{VGes}

Die elektrische Maschine wurde am Prüfstand der Universität Kassel Fachgebiet Fahrzeugsysteme (FSG) in Betrieb genommen und das Wirkungsgradkennfeld wurde bis zu einer Drehzahl von 12.000 min^{-1} aufgenommen. Abbildung 133 zeigt das gemessene Wirkungsgradkennfeld und die ermittelten Gesamtverluste.

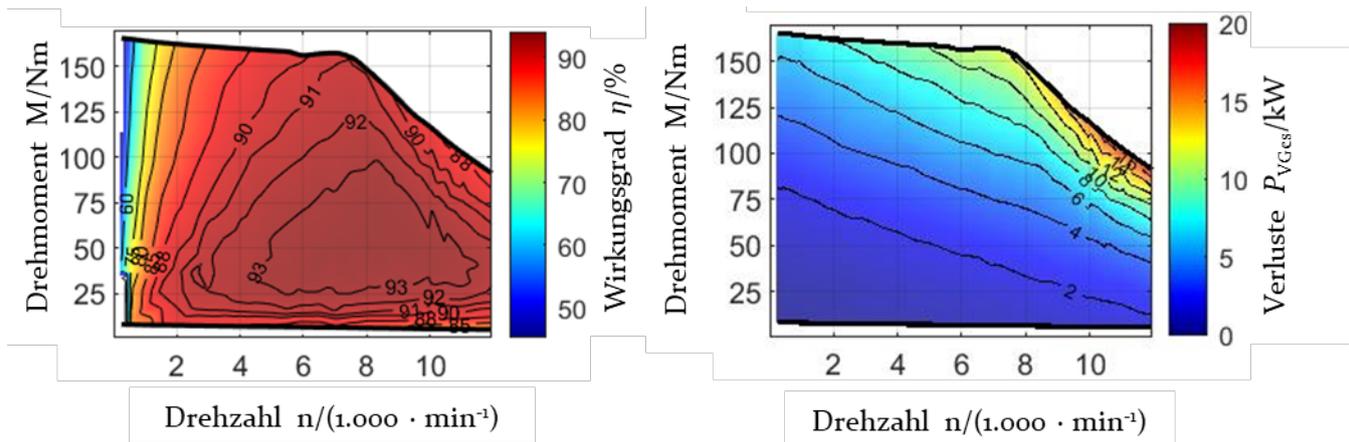


Abbildung 133: (a, links) gemessenes Wirkungsgradkennfeld; (b, rechts) Gesamtverluste P_{VGes}

Für eine Validierung des Prototypen wurde zur besseren Visualisierung das Differenz-Wirkungsgradkennfeld (siehe Abbildung 134)

$$\eta_{\text{Diff}} = \eta_{\text{mess}} - \eta_{\text{berechnet}} \quad \text{Formel 39}$$

und das Differenz-Verlustleistungskennfeld (siehe Bild 10.2-5b)

$$\Delta P_{VGes} = \frac{P_{VGes, \text{mess}} - P_{VGes, \text{berechnet}}}{P_{VGes, \text{mess}}} \quad \text{Formel 40}$$

bestimmt.

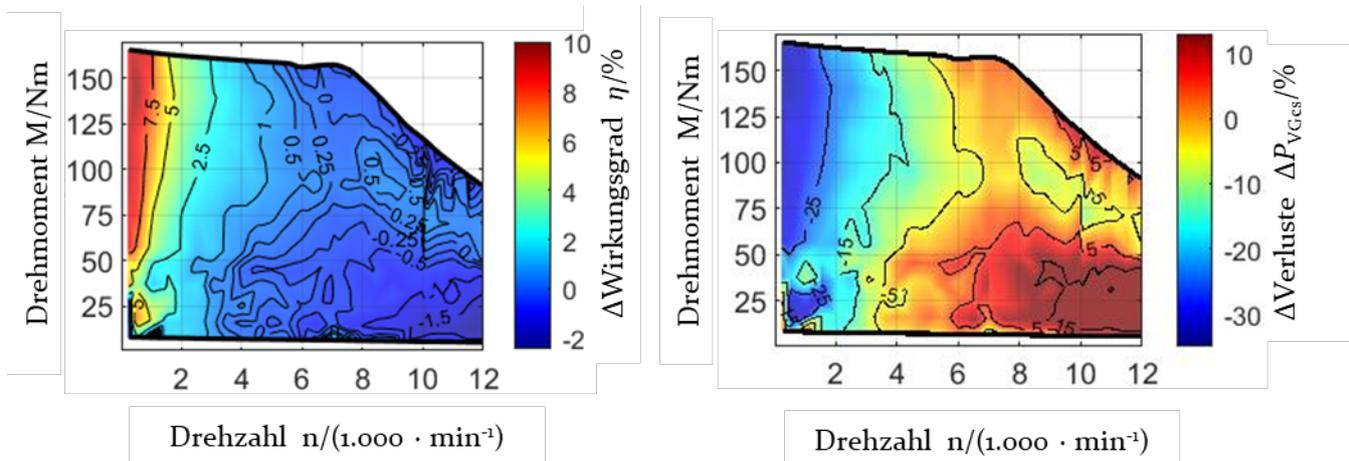


Abbildung 134: (a, links) Differenz-Wirkungsgradkennfeld; (b, rechts) Differenz-Gesamtverluste ΔP_{VGes}

Wie man an den Differenz-Kennfeldern (Abbildung 134) erkennen kann, stimmen z.B. die mit Hilfe des FEM-Modells berechneten Wirkungsgrad-Werte in einem großen Bereich gut mit den realen Prüfstandsdaten überein. Einzig bei niedrigen Drehzahlen und hohen Momenten ist eine merkbare Abweichung detektierbar. Der Nachweis bzw. die Validierung des elektromagnetischen Modells konnte somit überzeugend erbracht werden.

9.3 OPTIMIERUNG PROZESSPARAMETER IN DER FERTIGUNG

Pressen von Wicklungen

Ein wichtiger Faktor, der in der Fertigung zu verbessern ist, ist das Verpressen der Wicklungen. Der Prozessschritt ist ein elementarer Bestandteil des Kompaktwickelverfahrens, spielt aber ebenfalls eine entscheidende Rolle bei der Optimierung des Automated Trickle Winding-Prozess. Nach den Voruntersuchen des Projektpartners Essex Furukawa wurden am wbk Institut für Produktionstechnik in Karlsruhe weiterführende Untersuchungen durchgeführt. Hierbei stellte sich heraus, dass die Lackbeschichtung Pressdrücken bis zu 300 MPa standhalten kann, das Isolationspapier allerdings eine wesentliche Schwachstelle darstellt. Die Versuchsreihen wurden mit Modellnuten an einer hydraulischen Handhebelpresse durchgeführt. Nach den Pressvorgängen wurden elektrische Messungen mit einem Spulentestgerät vom Typ Schleich MTC 2 durchgeführt, welches Widerstand, Stoßspannungsprüfung, Teilentladungseinsetz- und Aussetzspannung sowie Isolationsfestigkeit messen kann. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse kann [Sel-19] entnommen werden. Für den Kompaktwickelprozess ist es dementsprechend von Vorteil, dass die Wicklungen außerhalb der Nut und ohne Isolationspapier verpresst werden. Im weiteren Verlauf wurden die Isolationspapiere während der Versuche durch Druckmessfolie substituiert, um die kritischen Druckspitzen zu erfassen, welche die Beschädigungen des Isolationspapiers hervorrufen. Abbildung 135 zeigt eine Druckmessfolie mit anschließender Druckauswertung.

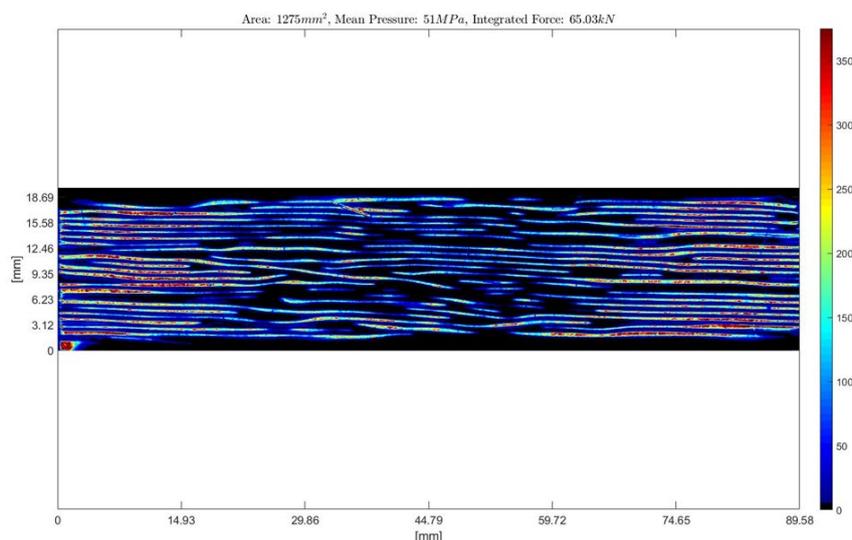
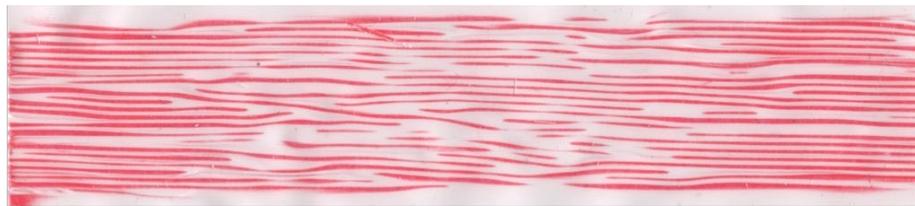


Abbildung 135: Druckmessfolie aus einem Pressversuch mit 72 kN Presskraft, Durchmesser 0,71 mm und Isolationsgrad 2 und 60 Windungen (oben) Druckauswertung der oben dargestellten Druckmessfolie (unten)

9.4 STEIGERUNG DER DAUERLEISTUNG DURCH EINE ÖLSPRITZKÜHLUNG

Bei der elektromagnetischen Auslegung von elektrischen Maschinen und der anschließenden Entwicklung optimierter Betriebsstrategien sind die unterschiedlichen beim Betrieb entstehenden Verluste entscheidende Faktoren. Der Eckpunkt der Maschine legt maßgeblich die Aufteilung der Verluste in Kupfer- und Eisenverluste fest. Je nach Kühlkonzept, kann bei der Auslegung nicht das volle Potential der Maschine genutzt werden, da Freiheitsgrade durch ein schon in gewissen Grenzen vorgegebenes Kühlkonzept entfallen.

Zur Steigerung der bisherigen im Forschungsprojekt erreichten Leistungsfähigkeit der E-Maschinen wurde deswegen die Steigerung der Leistungsdichte durch eine Erweiterung der Mantelwasserkühlung um eine Ölspritzkühlung untersucht. Die in dem Projekt entstandene Wickelkopfgestaltung ließ ein hohes Potential für die zusätzliche Wärmeabführung vermuten, was im weiteren Vorgehen analysiert wurde.

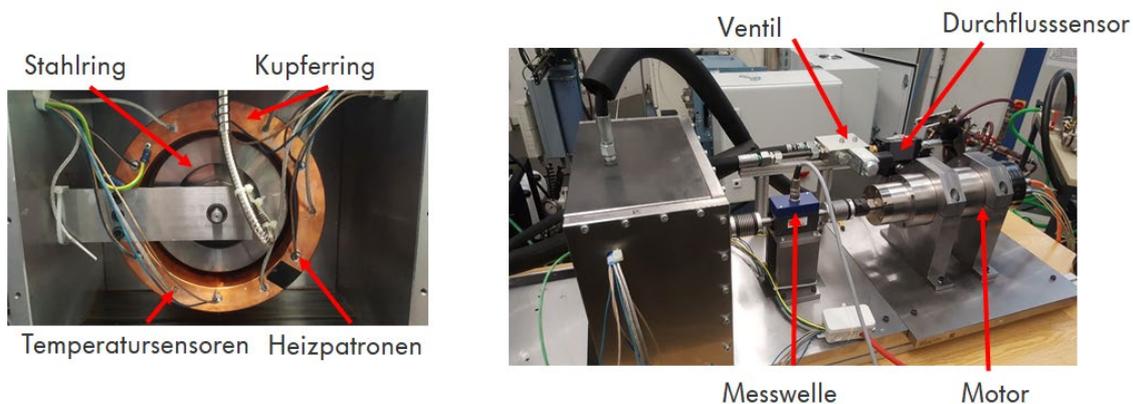


Abbildung 136: Prüfaufbau am Fachgebiet FMF zur Untersuchung des Potenzials einer Ölspritzkühlung unter Beibehaltung der Mantelwasserkühlung

Zum Erreichen dieses Ziels wurde beim aktuellen Konzept mit Hilfe von Prüfstandsversuchen an einem Ersatzsystem (siehe Abbildung 136), welches in erster Linie die Kühlfläche der Wickelköpfe und einen drehenden Rotor nachbildet, die Kühlleistung einer Ölspritzkühlung in unterschiedlichen Betriebspunkten variiert, um die Wärmewiderstände zu identifizieren. Optimierte Abschleuderkanäle wurden hierzu vorab mittels CFD-Modellen für eine Drehzahl von 500 min^{-1} identifiziert. Als Ergebnis der simulativen Untersuchung wurden sechs Kanäle mit jeweils einem Durchmesser von 3 mm gewählt (siehe Abbildung 2).

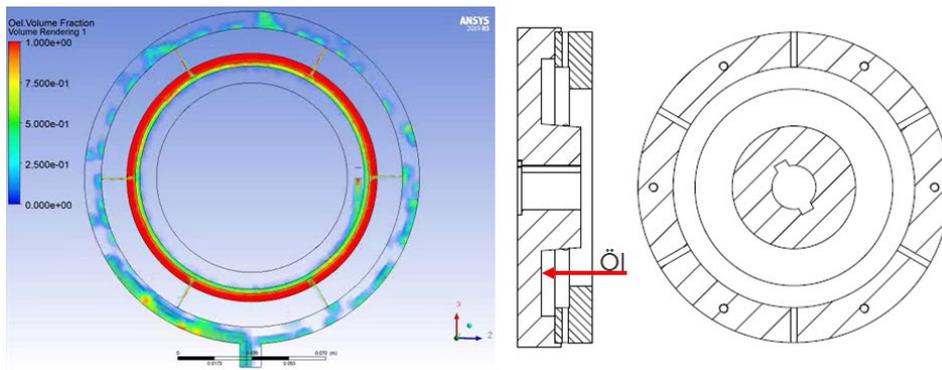


Abbildung 137: CFD-Ergebnisdarstellung und technische Zeichnung; sechs Abschleuderkanäle mit einem Durchmesser von 3 mm

Es wurden Messungen zwischen 500 min^{-1} und 5000 min^{-1} bei unterschiedlichen Kühlmittel-Durchflüssen aufgenommen. Hierbei wurde der Wärmestrom ermittelt, der zur Aufrechterhaltung einer Differenztemperatur zwischen Kühllöl und Wickelkopf benötigt wurde (siehe Abbildung 138). Hieraus wurden die Wärmewiderstände für die unterschiedlichen Drehzahlen und Arbeitspunkte ermittelt, außerdem wurden die Kennlinien bis zur Maximaldrehzahl der Maschine von 16000 min^{-1} extrapoliert (siehe Abbildung 3b). Es ist des Weiteren gut zu erkennen, dass der thermische Widerstand für Drehzahlen unter 1500 min^{-1} stark ansteigt.

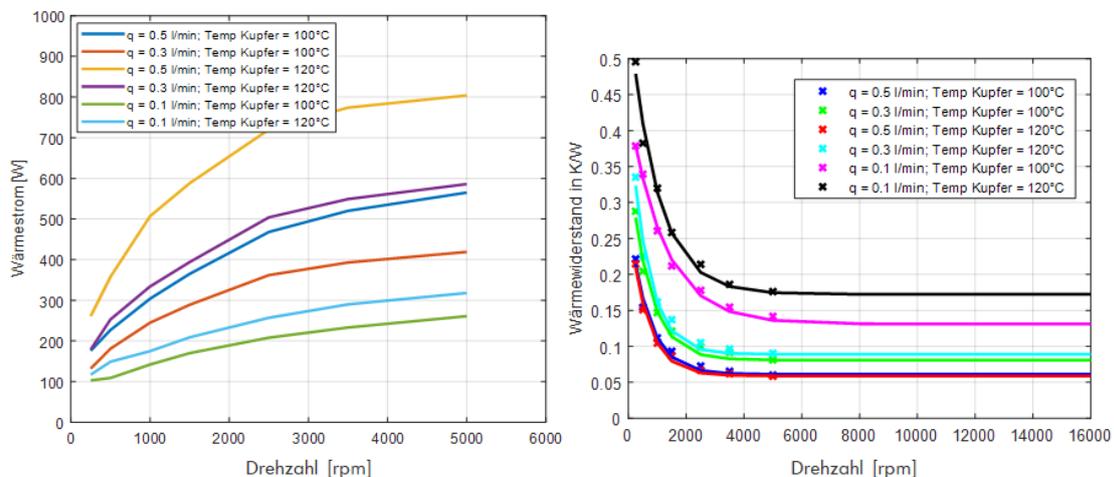


Abbildung 138: (a) Wärmestrom zur Aufrechterhaltung der geforderten Differenztemperatur; (b) Wärmewiderstände für unterschiedliche Kühllölvolumenströme

Die Wärmewiderstände der Ölspritzkühlung wurden anschließend in das thermische Modell der NeWire-Maschine eingebracht, um die Verbesserung der Dauerleistung zu quantifizieren. Da die Verluste der Maschine (auch für Arbeitspunkte oberhalb der Dauerleistung) detailliert bei der Drehzahl 3000 min^{-1} aufgenommen wurden, wurde der Einfluss einer Ölspritzkühlung auf das System stellvertretend für diese Referenzdrehzahl durchgeführt. Das maximale Moment (bei Dauerleistung) konnte von 43 N auf 55 N gesteigert werden, was in diesem Arbeitspunkt einer Steigerung der Dauerleistung um ca. 28% entspricht.

10 Fazit und Ausblick

In den letzten Jahren ist das Interesse an E-Mobilität, nicht zuletzt wegen des weltweiten Klimawandels und der staatlichen Gesetze, die verlangen, die CO₂ Emission zu reduzieren, auf der ganzen Welt stark gestiegen. Viele Fahrzeughersteller begannen damit, ihre Modelle für die Massenproduktion zu entwickeln. Der Volkswagen Konzern investierte und investiert auch weiterhin mehrere Milliarden Euro in die Entwicklung der E-Mobilität und hat mit dem VW ID.3 das erste Großserienauto auf den Markt gebracht. Dieses Fahrzeug war erst der Startschuss für viele weitere angekündigte Modelle.

Die Anforderungen des elektrischen Antriebs lassen sich in Produkt- und Prozessanforderungen aufteilen. Die Effizienz und die Kosten spielen bei den entwickelten Prozessen eine immer größere Rolle. Ein hocheffizienter Antrieb kann ein Reichweitenziel mit einer kleineren Batterie erreichen, wodurch ein großer Vorteil entsteht. Darüber hinaus sind Prozessanforderungen wie sichere und vollautomatisierte Produktionsprozesse elementar, um die Kosten zu senken und die Reproduzierbarkeit der Produktqualität zu erhöhen. Mithilfe von flexiblen Fertigungsprozessen lassen sich Kosten weiter senken, indem verschiedene Produkte auf einer Produktionslinie hergestellt werden können.

Diese Anforderungen wurden auf das Projekt NeWwire übertragen, wobei die Produktkosten durch den Einsatz einer Asynchronmaschine weiter gesenkt werden sollen. Diese Kostenreduktion ist im Wesentlichen in dem Verzicht auf aktive Magnetmaterialien begründet. Darüber hinaus ist dieser Verzicht seltener Erden ein wichtiger Schritt zur Reduktion der Umweltbelastung. Dennoch ist es schwer mit einer Asynchronmaschine die Effizienz und die Leistung bei gleichbleibender Größe gegenüber einer Permanentensynchronmaschine zu erreichen. Mit einer Auslegung als Zweischichtstatorwicklung lassen sich viele dieser Nachteile kompensieren, jedoch stellt die Fertigung dieser Statorwicklung ein Hindernis durch die bisherigen manuellen Fertigungsprozesse dar. Zusätzlich besitzen Wicklungen von Asynchronmaschinen eine geringe Anzahl an Polen, sodass oft große Wickelköpfe entstehen. Somit ist die Aufgabe für das Projektteam entstanden, serienflexible und hochautomatisierte Produktionsprozesse zu entwickeln, die die produktseitigen Vorteile einer Asynchronmaschine hervorheben und gleichzeitig die bestehenden Nachteile eines niedrigpoligen Stators minimieren.

Die Projektpartner begannen auf Basis dieser Anforderungen, Voruntersuchungen durchzuführen. Das Fachgebiet FMF der Universität Kassel beschäftigte sich mit der elektromagnetischen Auslegung der E-Maschine, das Fachgebiet FSG mit der thermischen Auslegung. Die erstellten Maschinenmodelle sollten mit am Prüfstand des Fachgebiets FSG gewonnenen Messdaten validiert werden. Für die Festlegung des Statordesigns wurden im Verbund Untersuchungen zur Drahtgeometrie, für die der Hersteller Essex mit seiner Expertise einen wichtigen Input lieferte, zur Wicklungsauslegung und anderen Teilprozessen die für die Statorfertigung erforderlich sind durchgeführt. Parallel arbeiteten das wbk und Aumann unterschiedliche Konzepte für das Einbringen von Runddrähten in eine Statornut aus. Von Aumann wurde eine Prozesskette zum Spulenwickeln mit mehreren Handhabungs- und Montageschritten entwickelt, die einen Fokus auf die Serientauglichkeit legt und als automatisierte Träufelwickeltechnik bezeichnet wird. Die vom wbk erarbeitete Prozesskette für das Wickeln und Montieren von Wicklungen mit dem Namen Kompaktwickeltechnik hat hingegen den Fokus einer möglichst hohen Produktflexibilität. Als Basis für

die Entwicklung der Prozessketten dienten die von Volkswagen ausgearbeiteten Anforderungen für eine mögliche Serienfertigung. Die automatisierte Träufelwickeltechnik charakterisiert sich durch einen automatisierten Spulenwickelprozess, gefolgt von einigen Handhabungsschritten in denen die Spulen in ein Werkzeug gefügt werden. Nach Montage des Werkzeugs im Inneren des Stators werden die Spulen mit Hilfe eines Expansionsprozesses in die Statornuten gefügt. Insbesondere die passende Abstimmung von Montagewerkzeugen und der Stator- bzw. Wicklungsauslegung wie bspw. dem Nutschlitz, Innen- und Außendurchmesser sowie der Wicklungskonfiguration waren ein zentrales Element, um die Fertigung und Produkteigenschaften des Stators sicher zu stellen. Dabei wurden auch alternative Auslegungen und Prozessketten bzgl. ihrer Vor- und Nachteile für das Produkt und dessen Fertigung untersucht. Insbesondere vorteilhafte Drahtkonfigurationen aus der Elektromagnetik zur Reduktion von Proximity- und Skin-Verlusten aber auch thermische Effekte wurden untersucht, um die Produktperformance zu verbessern. Außerdem wurden im Rahmen des Projektes detaillierte Untersuchungen des Isolationssystems sowie zu Nachfolgeprozessen wie dem Pressen der Wicklung innerhalb der Statornut durchgeführt. Es besteht sowohl bei den einzelnen Isolationsmaterialien als auch beim Pressprozess ein Potential, um eine optimale Nutfüllung zu gewährleisten.

Für eine Vergleichbarkeit zwischen händischer und automatisierter Träufelwicklung wurde sowohl ein Stator händisch aufgebaut als auch ein Stator mit der von Aumann entwickelten Prozesskette aufgebaut und in zwei E-Maschinen verbaut. Diese E-Maschinen wurden auf dem Prüfstand des Fachgebietes FSG charakterisiert. Anhand der ausgewerteten Daten konnten sowohl das thermische Ersatzmodell als auch die Simulation der Gesamtmaschine mit Erfolg und lediglich geringen Abweichungen zur Simulation validiert werden. Die durchgeführten Messungen zur Maschinen-Performanz konnten zudem das Erreichen der an das Maschinendesign gestellten Anforderungen bestätigen. Potentielle Vorteile gegenüber den vorhandenen Herstellprozessen für Statorwicklungen mit Runddraht waren in den Untersuchungen in diesem Projekt bereits zu erkennen. Die Fertigungstechnik könnte nun in einem konkreten Produkt Anwendung finden. Zur Absicherung der Serientauglichkeit ist es insbesondere nötig, eine größere Stückzahl an Prototypen herzustellen, um eine statistische Beurteilung der Technik durchzuführen. Außerdem sollte es noch weitere Optimierungen an dem entwickelten Isolationssystem geben, um eine optimale Nutfüllung zu gewährleisten. Die Ergebnisse zu den unterschiedlichen betrachteten Isolationssystemen sowie die Untersuchungen zum Verpressen der Einzeldrähte in der Nut sind auch unabhängig von dieser Wickeltechnik nutzbar.

Die Kooperation von Systementwicklung, Komponentenentwicklung, Fertigung und Halbleitungslieferanten stellt aus Sicht des Konsortiums eine besonders favorisierte Form des Projektkonsortiums dar. Sowohl auf Produktentwicklungsebene als auch für die zugehörigen Fertigungsaspekte sind somit alle notwendigen Parteien am Projekt beteiligt und können einen passenden Input für ein optimales Projektergebnis liefern.

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Längsschnitt einer ASM (links), Käfigläufer und unterschiedliche Käfige (rechts) [Par-08]	10
Abbildung 2: Prinzipdarstellung einer Drehfeldmaschine [Sch-15]	10
Abbildung 3: Leistungsfluss durch einen Motor [Sch-07]	11
Abbildung 4: Aufbau eines Leiters für Wickelgüter [Hag-16].....	12
Abbildung 5: Prozesskette zur Herstellung von Kupferlackdraht [Hag-16].....	13
Abbildung 6: Vorbereitung der Wicklung Bild (l.) nach [Tzs-90]; Einziehen der Wicklung (Bildquelle (r.): Otto Rist GmbH)	15
Abbildung 7: Einziehen der Wicklung in die Statornut [Tzs-90].....	15
Abbildung 8: Aufbau des Nadelwickelverfahrens [Fel-14], [Hag-16]	16
Abbildung 9: Herstellung eines Spulenstranges auf einer Schablone [Hag-16].....	17
Abbildung 10: Verwendung von Hilfswerkzeugen zur Wicklungseinbringung: Holzkeil [Hag-16]	17
Abbildung 11: Normiertes Drehmoment über den Rotoraußendurchmesser D_{a2} für einen Statoraußendurchmesser $D_{a1} = 210$ mm.....	20
Abbildung 12: Visualisierung des zusammengebauten Statorblechpakets ① mit (Vollmaterial--) Spulenseiten ② und den gesehten (Vollmaterial--) Spulenenden (mit natürlicher Umschichtung), die den Wickelkopf ③ bilden, das Rotorblechpaket ⑥ mit den beiden Kurzschlussringen ⑤, sowie der Rotorwelle ④ mit den Lagern.....	21
Abbildung 13: Betrag des Zonenfaktor ξ_{Zone} abhängig von der Lochzahl q für die Ordnungszahlen bis $v = 19$	22
Abbildung 14: Betrag des resultierender Wicklungsfaktor $\xi_{Res} = \xi_{Zone} \cdot \xi_{Sehn}$ für die Lochzahl $q = 4$ und unterschiedliche Wicklungsschrittweiten in Nutteilungen für die Ordnungszahlen bis $v = 19$	23
Abbildung 15: Betrag des Nutverstärkungsfaktors ζ_{Nv} für einseitige Nutung, einem konstanten Luftspalt $\delta = 0,5$ mm und einem Bohrungsdurchmesser von $D_{ii}=140$ mm für die Ordnungszahlen bis $v = 19$	24
Abbildung 16: Prozesskette aktuelle Statormontage.....	26
Abbildung 17: Darstellung der Hauptanforderungen an das Wickelverfahren im Projekt .	28
Abbildung 18: Schematisches Bild Lackdrahtaufbau der Muster	29
Abbildung 19: Wickelschemata	31
Abbildung 20: Abbildung Versuchsaufbau.....	31
Abbildung 21: Luftspaltunterschied gesehnte Wicklung zur Einschichtwicklung	32
Abbildung 22: Händisches Einbringen der Statorwicklung.....	32
Abbildung 23: Verschaltungsbild NeWire	33

Abbildung 24: Gegenüberstellung der Drehmomente und Leistungen über die Drehzahl für die spannungshaltenden Strangwindungszahlen $w_1 = 24, 28, 32$	34
Abbildung 25: Wickelschema eines Strangs für die Strangwindungszahl $w_1 = 28$ ($w_{sp} = z_N/2 = 7$ und $a = 4$)	35
Abbildung 26: Dreieck-Verschaltung der drei Stränge (U, V, W)	35
Abbildung 27: Detaillierte Abmessungen des Magnetkreises (alle Werte sind in mm angegeben).....	36
Abbildung 28: Visualisierung der Nutfüllung. Darin ersichtlich die 126 Einzelleiter, deren Lackschicht, der gefaltete Deckschieber, der Phasentrenner und die umhüllende Nutisolation.	37
Abbildung 29: Ausschnitt der E-Maschine mit Kühlmantel.....	38
Abbildung 30: Temperatur-Zeit-Verhalten bei zwei Betriebspunkten mit unterschiedlicher Stromdichte	39
Abbildung 31: Einfaches Wärmequellennetz mit mehreren Temperaturknoten.....	42
Abbildung 32: Thermisches Netzwerkmodell der E-Maschine	43
Abbildung 33: Teilstück eines Stator-Musters; Versuchsaufbau (links), Ansicht von oben (rechts)	44
Abbildung 34: Temperaturentwicklung; Übersichtsbild (links), Temperaturen entlang Linie (rechts).....	44
Abbildung 35: Rotordetails.....	46
Abbildung 36: Schnittbild E-Maschine	47
Abbildung 37: Phasen der Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte nach VDI 2221	48
Abbildung 38: Prozessmodell nach VDI 2221: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren [Fel 13].....	49
Abbildung 39: Auszug der Anforderungsliste	50
Abbildung 40: Funktionsstruktur für einen Schablonenwickler	50
Abbildung 41: Funktionsstruktur zum Einbringen der Drähte (Einbringmechanik)	51
Abbildung 42: Prozessfolge des händischen Träufelwickelverfahrens.....	51
Abbildung 43: Ausschnitt aus dem morphologischen Kasten mit Teillösungen für das automatisierte Träufeln	53
Abbildung 44: Graphische Darstellung Drahtlagenbündel (Konzept A)	54
Abbildung 45: Graphische Darstellung Drahtlagenmontage (Konzept B).....	54
Abbildung 46: Graphische Darstellung Einbringung mit Schnecke (Konzept C)	55
Abbildung 47: Graphische Darstellung der Einbringung mittels Peristaltik (Konzept D)..	55
Abbildung 48: Graphische Darstellung Einbringung mittels Zahnrad/Trichter (Konzept E)	56

Abbildung 49: VDI2225 - Bewertung der Einbringverfahren.....	57
Abbildung 50: Prototypen verschiedener Einbringkonzepte: (links) Schnecke (Konzept C), (Mitte) Peristaltik (Konzept D), (rechts) Trichter/Zahnrad (Konzept E).....	57
Abbildung 51: Ablauf des Labormusters zur Drahtlagenmontage.....	58
Abbildung 52: Modul 1&2: Wickeln der Spulen & Spulenübergabe an die Übergabekette .	59
Abbildung 53: Modul 3: Spulenübergabe ans Innenwerkzeug.....	60
Abbildung 54: Modul 4: Einbringen der Spulen in den Stator	61
Abbildung 55: Darstellung der wilden (links), lagengenauen (Mitte) und orthozyklischen (rechts) Wicklung und die Berechnung der theoretischen mechanischen Füllfaktoren. Es gilt die Annahme einer unendlich ausgedehnten Wicklung ohne Randbereiche der Nut und Toleranzen. Eigene Darstellung nach [Hal-20].....	62
Abbildung 56: Darstellung der lagengenauen Wicklung (links) und einer orthozyklischen Wicklung (rechts) in einer Nut mit parallelen Zahnflanken, 40 Drähten pro Teilspule und den dafür berechneten Füllfaktoren	62
Abbildung 57: Beschreibung des benötigten Umformgrades von 0,242 in negativer Richtung (Druckkraft), bei Erhalt der Nutbreite. Die erzielte Höhenverhältnis liegt bei 0,785 der Ausgangshöhe.....	63
Abbildung 58: Schematische Darstellung der Schritte zur Herstellung einer Kompaktwicklung: Erzeugung der lagengenauen Teilspulen (links), Kompaktierung der Windungen der Teilspulen (Mitte) und Montage der Wicklung in der Nut (rechts)	64
Abbildung 59: Querschnitt durch das schematische Spulenhändlingsystem: a) Gegenläufig bewegliche Führungsschienen für je eine Ebene der Windungen einer Teilspule und Umschließen der schwarz gekennzeichneten Greifer. b) Alle Windungen einer Teilspule werden um 90° gedreht durch den Nutschlitz in die Nut eingeführt. c) Ablegen der Windung einer Teilspule am Nutgrund. Der Ablauf a)-c) wird pro Teilspule vier Mal wiederholt	64
Abbildung 60: Pressen von Einzelleiter Abbildung 61: Schliffbild nach dem Pressen (125kN)	65
Abbildung 62: Ergebnisse nach dem Pressen von Einzelleitern.....	65
Abbildung 64: Schliff nach dem Pressen (Einzelleiter Bündel).....	66
Abbildung 64: Wickeln einer Spulengruppe	67
Abbildung 65: Übergeben der Spulengruppe in ein Übertragungswerkzeug (Übergabekette).....	67
Abbildung 66: Übergeben und Schränken der Spulengruppe in einem Innenwerkzeug....	67
Abbildung 67: Einbringen der geschränkten Spulengruppe vom Innenwerkzeug in den Stator	67
Abbildung 68: Zugversuch für den Klebprozess.....	68
Abbildung 69: Schälversuch für den Klebprozess	69
Abbildung 70: Ergebnis aus dem Zugversuch	69

Abbildung 71: Modellwerkzeug zur Herstellung von Kompaktwicklungen (links), erzeugte Spulen der Kompaktwicklung mit lagengenauer und kompakterer Anordnung in aktiver Länger der Spulen in der Nut (rechts).....	70
Abbildung 73: Konzepte Spulengeometrie	71
Abbildung 73: Mit Spulen gefülltes Innenwerkzeug	71
Abbildung 75: Optimierungsschleifen Wickelschablone.....	72
Abbildung 75: Isolationskonzept NeWire.....	72
Abbildung 76: Querschnitt einer befüllten Statornut.....	73
Abbildung 77: Varianten der Isolationskonzepte in der Statornut	73
Abbildung 78: Temperaturnahme der Thermolemente	74
Abbildung 79: Wickelkopfisolationskonzepte	74
Abbildung 80: Isolationskonzepte (Vorversuche).....	75
Abbildung 81: Wickelkopfisolation zwischen den Phasen.....	75
Abbildung 82: Geometrie Wickelkopfisolation Variante 5.....	76
Abbildung 83: Wickelwerkzeug mit verschlossenen Spulen	76
Abbildung 84: Untersuchung Kontaktierverfahren	77
Abbildung 85: Konzept zum Einbringen einer vollständigen Wicklung mittels Sonnenrad	78
Abbildung 86: Modul 1 - Wickeln der Spulen	79
Abbildung 87: Modul 2 - Übergeben in ein Übertragungswerkzeug	79
Abbildung 88: Modul 3 - Übergeben und Schränken in einem Innenwerkzeug	80
Abbildung 89: Modul 4 - Einbringen vom Innenwerkzeug in den Stator.....	80
Abbildung 90: Drahtführer der LWS/S.....	81
Abbildung 91: Entwurf des Versuchstandes zur Erprobung des Kompaktwickelprozesses: rot: Greifereinheit, grün: Statoreinheit, gelb: Portal zur Bewegung des Spulenhandlingssystem, weiß: Spulenhandlingssystem, grau: Grundgerüst	82
Abbildung 92: Darstellung des geplanten Steuerungskonzepts für den Demonstrator- Versuchsstand des Kompaktwickelverfahrens	83
Abbildung 93: Wickelwerkzeug mit 3-eckigem Wickelkopf, eingespannt in die LWS/S...	84
Abbildung 94: Baustände für das Modul 2 und Modul 3 vor der Erprobung.....	84
Abbildung 95: Trapezschieber im Innenwerkzeug, montiert auf Modul 4.....	85
Abbildung 96: Optimierter Wickelprozess auf Modul 1	85
Abbildung 97: Schließen und Verkleben der Papiere auf Modul 1.....	86
Abbildung 98: Übergabe der Spulen auf Modul 2	86
Abbildung 99: Montage der Spulen ins Innenwerkzeug auf Modul 3.....	86

Abbildung 100: Expansionsprozess der Spulen in den Stator auf Modul 4.....	87
Abbildung 101: Spulenhandlingsystem mit aufgewickelten Formspulen	87
Abbildung 102: Umsetzung des Demonstrator-Versuchsstandes.....	88
Abbildung 103: Darstellung des Ablaufs zur Einbringung der Windungen der Teilspulen einer Kompaktwicklung: A: Greifer fährt an; B: geschlossene Greifer und freigegebenes Spulenhandlingsystem C: um 90° gedrehte Greifer fahren durch die Nutöffnung; D: Positionierung der Windung einer Teilspule auf dem Nutgrund	89
Abbildung 104: Lagenaufbau einer Spule mit Einzelteileitern analog zu Roebelstäben bei Wicklungen mit Formspulen, bspw. Generatoren, zur Verringerung von Kreisströmen ..	89
Abbildung 105: Schablonenwickler zur Herstellung von Spulen mit Verdrillungen im Wickelkopf (links), verdrehbare Düsen zur Realisierung der Lagenspiegelung (rechts)...	90
Abbildung 106: Systematischer Aufbau des Wickelprozesses einer Spule.....	91
Abbildung 107: Parametrisierung des Werkzeugs.....	91
Abbildung 108: Aufbau Wickelwerkzeug NeWire Geometrie.....	92
Abbildung 109: Vergleich des Unterschiedes im Rollensystem zwischen der ProLemo Geometrie (oben) und der NeWire Geometrie (unten).....	92
Abbildung 110: Drahtbremse von Aumann – Funktionsprinzip	94
Abbildung 111: Aufbau der CAD/CAM-Schnittstelle.....	95
Abbildung 112: Vergleich der verschiedenen Versionen des Wickelwerkzeuges	96
Abbildung 113: Für die gewählte Referenzfertigungstechnik des Nadelwickelns wurde eine Einschichtwicklung ohne Lagenwechsel gewählt, da eine Zweischichtwicklung mit Lagenwechsel prinzipbedingt nicht fertigbar ist.....	97
Abbildung 114: (links) Verlegefehler im Wickelkopf: Ein Draht liegt auf der falschen Seite des Wickelwerkzeugs; (rechts) Plastische Verformung des Wickelwerkzeugs durch Einwirkung des Drahtes	98
Abbildung 115: (links) Statoraufnahme mit Stator sowie Nadelträger; (rechts) Bewicklung der Rückseite des Stators mit neun Drähten.....	99
Abbildung 116: Die Wickelköpfe des Stator-Prototypen: Rückseite (links) und Verschaltseite (rechts).....	99
Abbildung 117: Stator in Statoraufnahme (links); Einsatz des Wickelkopfpreswerkzeugs (Mitte links und Mitte rechts); aus Aufnahme entnommener Stator (rechts)	100
Abbildung 118: Ausgebauter Stator mit radial verpressten Wickelköpfen	100
Abbildung 124: Statordetails.....	101
Abbildung 120: Nutisolationssystem NeWire	101
Abbildung 121: NeWire Stator.....	103
Abbildung 122: Übersicht Prüfstand	104

Abbildung 123: Auslaufverhalten (links) und berechnete Reibungsverluste (rechts) des Prüflings	105
Abbildung 124: Wirkungsgradkennfeld 1. Prototyp.....	108
Abbildung 125: Kennlinien für den Dauerbetrieb (S ₁ -Kennlinie) des 1. Prototyps.....	108
Abbildung 126: Kennlinien für den Kurzzeitbetrieb (S ₂ -Kennlinie) des 1. Prototyps.....	109
Abbildung 127: Gegenüberstellung Verluste unter Last (oben) und im Leerlauf (unten)..	110
Abbildung 128: Vergleich von Simulation und Messung für einen Teilbereich der Maschine	111
Abbildung 129: Vergleich von Simulation und Messung – Übersicht Endtemperaturen ...	112
Abbildung 130: Beispiel der FEM-Simulation mit ANSYS Maxwell	113
Abbildung 131: Verlustaufteilung in einer Asynchronmaschine aufgeteilt für Stator und Rotor [Dop-17].....	114
Abbildung 136: (a, links) berechnetes Wirkungsgradkennfeld; (b, rechts) berechnete Gesamtverluste $P_{V_{Ges}}$	115
Abbildung 133: (a, links) gemessenes Wirkungsgradkennfeld; (b, rechts) Gesamtverluste $P_{V_{Ges}}$	116
Abbildung 134: (a, links) Differenz-Wirkungsgradkennfeld; (b, rechts) Differenz-Gesamtverluste $\Delta P_{V_{Ges}}$	116
Abbildung 135: Druckmessfolie aus einem Pressversuch mit 72 kN Presskraft, Durchmesser 0,71 mm und Isolationsgrad 2 und 60 Windungen (oben) Druckauswertung der oben dargestellten Druckmessfolie (unten).....	117
Abbildung 136: Prüfaufbau am Fachgebiet FMF zur Untersuchung des Potenzials einer Ölspritzkühlung unter Beibehaltung der Mantelwasserkühlung.....	118
Abbildung 137: CFD-Ergebnisdarstellung und technische Zeichnung; sechs Abschleuderkanäle mit einem Durchmesser von 3 mm	119
Abbildung 138: (a) Wärmestrom zur Aufrechterhaltung der geforderten Differenztemperatur; (b) Wärmewiderstände für unterschiedliche Kühlölvolumenströme	119

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Wickelverfahren nach [Hag-16]. Konz. W. = Konzentrierte Wicklung, Vert. W. = Verteilte Wicklung	14
Tabelle 2: Vergleich der Wickelverfahren für verteilte Wicklungen nach [Hag-16]	18
Tabelle 3: Anforderung an den Hochleistungs- und Hochdrehzahl-Traktionsantrieb	19
Tabelle 4: Teilstreureaktanzen	22
Tabelle 5: Potentielle Wicklungskennwerte	25
Tabelle 6: Resultierende Induktionen	36
Tabelle 7: Zusammenfassung des Isolationssystems	37
Tabelle 8: Statorabmaße	46
Tabelle 9: Übersicht über die Geometrie- und Positionsunterschiede der Rollensysteme ProLemo und NeWire	93
Tabelle 10: Validierung der CAD/CAM Schnittstelle – Statorgeometrie	95
Tabelle 11: Validierung der CAD/CAM Schnittstelle – Werkzeuggeometrie	96
Tabelle 12: Drahtdetails	102
Tabelle 13: Versuchsreihen für die Validierung des thermischen Modells	107
Tabelle 14: Vergleich der Messungen mit Anforderungen an die Maschinenperformance	109

13 Literaturverzeichnis

- [Adz-08]: Ljubomir Adzic, Entwicklung von Internetdiensten im Bereich der elektrischen Maschinenauslegung, 2008.
- [Bach-15] J. P. Bacher, A. Mütze: Comparison of an induction machine with both conventionally distributed and fractional-slot concentrated stator windings In: *Elektrotechnik & Informationstechnik* (2015) 132/1
- [Bec-11] Beckmöller, S.: Wickeldrähte – ein wichtiger Bestandteil energieeffizienter elektrischer Maschinen, Vortrag, VEM Seminar 10. Technischer Tag, 2011
- [Bin-16] A. Binder, Elektrische Maschinen und Antriebe. Grundlagen, Betriebsverhalten. 2. aktualisierte Auflage, Darmstadt, Germany: Springer Vieweg, p.131, p.312, p.335-338, p.389-390, p.398-401 und p.493-494 December 2016.
- [Bol-18] E. Bolte, Elektrische Maschinen, 2. Auflage, Berlin, Heidelberg, Springer Vieweg, p.566-573, 2018.
- [Daja-13] Dajaku G., Gerling D.: Novel Winding Topologies for Synchronous and Asynchronous Machines In: HdT Elektrische Antriebstechnologie für Hybrid- und Elektrofahrzeuge, Munich, Germany, 2013
- [Fel 13] Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (Hrsg.) (2013), Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642295690.
- [Fel-14] Feldmann, K., Hrsg.: Handbuch der Fertigungstechnik, 2. Aufl., Hanser, München, 2014
- [Fin-11] T. Finken. Fahrzyklusgerechte Auslegung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge. Aachen, Germany: Shaker Verlag, p.82 - 84, Dezember 2011.
- [Fis-17] R. Fischer, Elektrische Maschinen - Auflage: 17., aktualisierte Auflage, München, Carl Hanser Verlag, p453-454, 2017.
- [Fra-21] Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS, Fraunhofer-Leitprojekt »Kritikalität Seltener Erden« (fraunhofer.de) (April 2021)
- [Fue-17] A. Füßel. Technische Potenzialanalyse der Elektromobilität, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-658-16696-0
- [Gro 14] Grote, K.-H., et al. (2014), *Das Ingenieurwissen: Entwicklung, Konstruktion und Produktion*, Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 9783662443934.
- [Hag-16] J. Hagedorn, F. Sell-Le Blanc, and J. Fleischer, *Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren: Ein Beitrag zur Energieeffizienz*. Berlin Heidelberg: Springer Science and Business Media; Springer Vieweg, 2016.
- [Hof-10] Hofmann, P.: Hybridfahrzeuge – Ein alternatives Antriebskonzept für die Zukunft, Springer-Verlag, Wien, 2010.

- [How-12] David A. Howey, Member, Peter R. N. Childs, and Andrew S. Holmes, "Air-Gap Convection in Rotating Electrical Machines", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, No. 3, March 2012.
- [Kla-62]: J. Klamt, Berechnung und Bemessung elektrischer Maschinen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1962.
- [Kno-13] T. Knopik, Steigerung des Wirkungsgrads und der Ausnutzung von Norm-Asynchronmaschinen mit Kurzschlusskäfig, Darmstadt, Germany: ULB Darmstadt, p.40-42, Juni 2013.
- [May-07] H. May: Einfluss von Wicklungstopologien auf die Energieumwandlung von PM-erregten Synchronmaschinen In: Bericht des Instituts für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen, Braunschweig, 2007
- [Mue-05] G. Müller, B. Ponick, Grundlagen elektrischer Maschinen. 9. völlig neu bearbeitete Auflage, Dresden und Hannover, Germany: Wiley-VCH, p.262, p.396, p.431, September 2005.
- [Mül-08] Müller, G., Vogt, K., Ponick, B.: Berechnung elektrischer Maschinen, 6. Aufl., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008
- [Mue-07] G. Müller, B. Ponick, Berechnung elektrischer Maschinen. 6. Völlig neu bearbeitete Auflage, Dresden und Hannover, Germany: Wiley-VCH, p.122 – 123, p.429, p.464, p.580, p.595 - 601 und 604, Juni 2007.
- [Mue-11] Müller, R.: Modulare Bauweisen sind der Schlüssel, in: atz production, 02/2011, S.18-20, 2011.
- [Mue-20] G. Müller, B. Ponick, Berechnung elektrischer Maschinen. BerechnungsbeispielIM.pdf, Germany, Accessed on. Jun. 18, 2020 [Online]. Available: https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527405259_beispiele.zip
- [Neu-15] H. Neudorfer: Elektrische Maschinen und Antriebe In: Elektrotechnik & Informationstechnik (2015) 132/1
- [NPE-10b] Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), Zwischenbericht der Arbeitsgruppe 1: „Antriebstechnologien und Fahrzeugintegration“, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 30.11.2010.
- [Obe-69] K. Oberretl, „13 Regeln für minimale Zusatzverluste in Induktionsmotoren“, Nr. 389/390, Bulletin Oberlikon, June 1969.
- [Oec-18] S. Oechselen: Thermische Modellierung elektrischer Hochleistungsantriebe, Wiesbaden, Springer Vieweg, p.40, 2018.
- [Par-08] Parspour, N.: Grundlagenpraktikum Drehstrom-Asynchronmaschine, Hochschulschrift, Universität Stuttgart, Institut für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe, 2008

- [Pet-13] Peter, M.; Fleischer, J.; Sell-Le Blanc, F. & Jastrzemski, J. (2013), „New conceptual lightweight design approaches for integrated manufacturing processes - Influence of alternative materials on the process chain of electric motor manufacturing“. Electric Drives Production Conference (EDPC), 2013 3rd International, Hrsg. IEEE, S. 206-211
- [Phu-18] P. Phuc, K. Stockman, G. Crevecoeur, Inverse Methodology for the Parameter Identification of a Lumped Parameter Thermal Network for an Induction Machine. In: International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), pp.298-303, 2018.
- [Roe-17] J. Röcher, Untersuchung neuartiger Wickelverfahren für Elektro-Traktionsantriebe, Bachelorarbeit, Universität Kassel, 2017.
- [Roe-19] J. Röcher, Optimierung und Validierung des thermischen Netzwerkmodells einer ASM anhand von Prüfstandsmessungen, Masterarbeit, Universität Kassel, 2019.
- [Sch-07] Schröder, Dierck: Elektrische Antriebe — Grundlagen, Springer-Verlag, Heidelberg/Berlin, 2007
- [Shh-11] Schlick, T.; Hertel, G.; Hagemann, B.; Maiser, E.: Zukunftsfeld Elektromobilität – Chancen und Herausforderungen für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau, Studie von Roland Berger und dem VDMA, 2011.
- [Ste-14] Stenzel, P., Dollinger, P., Mihajlovic, D., Richnow, J., Franke, J., Endisch, C.: Needle Winding for Distributed Round-Wire-Windings Without the Use of Insulation Disks, in: 4th International Electric Drives Production Conference (E|DPC), Bd. 4, Proceedings, IEEE, 2014
- [Tzs-90] Tzscheutschler, R., Olbrisch, H. & Jordan, W.: Technologie des Elektromaschinenbaus, 1. Aufl, Verl. Technik, Berlin, 1990
- [Vdi-13] Verein Deutscher Ingenieure; VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC): VDI-Wärmeatlas. 11., bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, p.19, p.22 und p.32-34, 2013.
- [Vwn-21] <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/e-mobilitaet-3921>, 08.04.2021
- [Wre-11] I. Wrede, www.wd.com, Gewinner der Autosperre in Peking | Wirtschaft | DW | 11.04.2011

14 Veröffentlichungen im Rahmen des Projektes NeWire

[Pet-17] M. Peter, M. Halwas, W. Schigal, J. Fleischer, "Entwicklung eines serienflexiblen Wickelverfahrens", E-Motive, 9. Expertenforum Elektrische Fahrzeugantriebe, Hannover, 06.09.2017.

[Hal-18_1] M. Halwas, J. Hofmann, J. Fleischer, C. Riehm, C. Spieker, M. Fister, G. Stoehr, A. Wist, F. Sell-Le Blanc, "Entwicklung eines parallelen Technologie- und Produktentwicklungsprozesses: Am Beispiel der Wicklungsauslegung und -fertigung im Rahmen des Förderprojektes NeWire," *wt Werkstattstechnik online*, vol. 108, no. 5, pp. 301–306, 2018.

[Hal-18_2] M. Halwas, D. Binder, Prof.Dr.-Ing. J. Fleischer, "Systematische Analyse des Lagenaufbaus von Wicklungen in Nuten elektrischer Maschinen mittels räumlicher Bildgebung und maschinellen Lernens," Verlag Meisenbach GmbH, Bamberg, 2018.

[Hal-18_3] M. Halwas *et al.*, "Systematic Development and Comparison of Concepts for an Automated Series-Flexible Trickle Winding Process," in *2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC): Proceedings : 4 and 5 December 2018, Schweinfurt, Germany*, Schweinfurt, Germany, 2018.

[Hal-20] M. Halwas, L. Weiße, P. Ambs, F. Sell-Le Blanc, J. Hofmann, and J. Fleischer, "Development and Implementation of a Compact Winding Process," in *2020 10th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Ludwigsburg, Germany, 8th and 9th December 2020*.

[Hof-19] Hofmann, J.; Bolender, M.; Sun, P.; Fleischer, J.; Sell-Le Blanc, F. & Köhn, H. (2019), „CAD/CAM-Schnittstelle für die Wickeltechnik“, *wt online*, S. 611-616.

[Sel-19] F. Sell-Le Blanc *et al.*, "Feasibility Study for Enameled Round Copper Wire Compression within Slots of Electrical Machines," in *2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC): Proceedings : 3 and 4 December 2019, Esslingen, Germany, Esslingen, Germany, 2019, S. 1–9*.

15 Anhang

A1

Projekt: NewWire		Produkt: Prozess - Einbringen		Verantwortliche: Janna Hofmann, Manuel Peter, Florian Sell-Le Blanc, Nicolas Kehl, Alex Wist, Maximilian Halwas, Lando Weiß		
Nr.	Datum	F/W	Hauptmerkmal	Anforderung	Quantifizierung	Bemerkung
1	14.06.2017	F	Geometrie	Drahtdurchmesser	0,56 mm; 0,75 mm; 0,9 mm	
2	26.06.2017	F	Stoff	Isolationsgrad des Drahtes	Grad 1 / Grad 2 / Grad 3	
3	04.07.2017	F	Geometrie	Außendurchmesser Stator	210 mm	
4	14.06.2017	F	Geometrie	Anzahl der Nuten	48 Stück	
5	14.06.2017	F	Geometrie	Wicklungsart	Ein-, Zweischichtwicklung	
6	14.06.2017	W	Geometrie	Länge inkl. Wickelkopf	42,5 mm	Besprechung NeWire Wickelkopf A und B
7	14.06.2017	F	Geometrie	Länge inkl. Wickelkopf	57,5 mm	Vw?
8	14.06.2017	F	Geometrie	Länge Blechpaket	90 mm	
9	14.06.2017	F	Geometrie	Innendurchmesser Stator	>130 mm	
10	14.06.2017	W	Stoff	Blechpakettyp	geschweißt	
11	14.06.2017	F	Geometrie	Blechpaket Positionierung (Merkmal)	min. 1 (Passfeder wäre wünschenswert)	
12	14.06.2017	W	Geometrie	Blechpaket Positionierung (Merkmal)	min. 2 (Passfeder wäre wünschenswert)	
13	14.06.2017	F	Kräfte	Zugkraft der Drähte	max. entsprechend IEC 60317	
14	29.06.2017	F	Transport	Höhe des Transports	?	Vw?
15	29.06.2017	F	Transport	Länge des Transports	?	Vw?
16	29.06.2017	F	Transport	Breite des Transports	?	Vw?
17	14.06.2017	F	Geometrie	Höhe der Maschine	max. ?	
18	14.06.2017	F	Geometrie	Länge der Maschine	max. ?	
19	14.06.2017	F	Geometrie	Breite der Maschine	max. ?	
20	22.06.2017	W	Geometrie	Füllfaktor	> 52%	
21	22.06.2017	F	Geometrie	Füllfaktor	> 50%	
22	22.06.2017	W	Gebrauch	Taktzeit pro Spule	20 s	
23	22.06.2017	F	Gebrauch	Taktzeit pro Spule	60 s	
24	22.06.2017	W	Gebrauch	Verschaltlaufwand	gering - Folgewickelfverfahren	
25	22.06.2017	W	Geometrie	Drahtablage in der Nut	kreuzungsfrei	
26	22.06.2017	W	Geometrie	Drahtablage in der Nut	bündig zum Nutgrund und zur Nutflanke	
27	22.06.2017	F	Stoff	Drahtwerkstoff	Cu-ETP	
28	22.06.2017	F	Gebrauch	Automatisierungsgrad	hoch	
29	23.06.2017	W	Gebrauch	Automatisierungsgrad	vollautomatisch	
30	22.06.2017	F	Geometrie	Drahtform	Rund- / Profildraht (Hexagon)	
31	22.06.2017	F	Kräfte	Draht Gleiteigenschaft	Reibkoeffizient - wird definiert von Essex (Standard: Parafin 20-80 mg)	
32	22.06.2017	W	Transport	Gewicht	kleiner 2000 kg	
33	22.06.2017	F	Kräfte	Verjüngung des Kupferdrahtes	vermeiden	
34	22.06.2017	F	Energie	Temperatur (Arbeitsbereich Motor)	-40°C ... 180 °C	
35	26.06.2017	W	Stoff	Vorzugswerkstoffe	Aluminium, Edelstahl, Stahl	
36	26.06.2017	F	Geometrie	Nutisolation - Materialstärke	0,25 mm	
37	26.06.2017	F	Geometrie	Phasenisolation - Materialstärke	Materialstärke	VW?
38	26.06.2017	F	Stoff	Nutisolation - Material	NKN / NHN	
39	26.06.2017	F	Stoff	Phasenisolation - Material	Material?	VW?
40	26.06.2017	F	Geometrie	Deckisolation - Materialstärke	Materialstärke	VW?
41	26.06.2017	F	Stoff	Deckisolation - Material	Material?	VW?
42	26.06.2017	W	Fertigung	Vorzugsfertigungsverfahren	Drehen, Fräsen	
43	26.06.2017	F	Gebrauch	Verschleiß	verschleißarm	
44	26.06.2017	W	Gebrauch	Verschleiß	verschleißfrei	
45	26.06.2017	F	Gebrauch	Einsatzort	Fertigungshalle	
46	26.06.2017	F	Montage	Baugruppenmontage		
47	26.06.2017	W	Instandhaltung	Wartungsintervall	?	Vw?
48	26.06.2017	W	Instandhaltung	Inspektionsintervall	?	VW?
49	26.06.2017	F	Kontrolle	Widerstand	VW Quantifizierung	Vw?
50	26.06.2017	F	Transport	Hebewerkzeug	Gabelstapler	
51	26.06.2017	F	Termin	Meilenstein 1 - Klären der Aufgabenstellung	Q2 2017	
52	26.06.2017	F	Termin	Meilenstein 2 - Konzeption	Q2 2019	
53	26.06.2017	F	Termin	Meilenstein 3 - Konstruktion Versuchsträger	Q2 2018	
54	26.06.2017	F	Termin	Meilenstein 4 - Vorversuche	Q2 2018	
55	26.06.2017	F	Termin	Meilenstein 5 - Konstruktion Demonstrator	Q1 2019	
56	26.06.2017	F	Termin	Meilenstein 6 - Prototyp/Demonstrator	Q3 2019	
57	26.06.2017	F	Transport	Vorkehrungen für Transport	Ösen/Transportgestell	
58	26.06.2017	F	Kosten	Materialkosten		
59	26.06.2017	F	Kosten	Kosten - Vorversuche		
60	26.06.2017	F	Kosten	Kosten - Prototyp / Demonstrator		
61	26.06.2017	W	Kinematik	flexible Werkzeugparameter	Drahtdurchmesser, Nutöffnung, Länge	
62	26.06.2017	W	Ergonomie	Zugänglichkeit	leicht	
63	26.06.2017	W	Energie	Betriebsspannung	240V	
64	26.06.2017	W	Gebrauch	Prozessparallelisierung	gleichzeitig, mehrfach, symmetrisch	
65	29.06.2017	F	Gebrauch	Bedienung Versuchsträger	manuell / Handschalter	VW?
66	29.06.2017	F	Gebrauch	Bedienung Demonstrator	automatisch	???
67	29.06.2017	F	Gebrauch	Demonstrator Spuleneinlage	händisch	
68	29.06.2017	W	Gebrauch	Demonstrator Spuleneinlage	automatisch	
69	29.06.2017	W	Kontrolle	Prüfung der Kreuzungsfreiheit	Plexiglasblechpaket? Elektrische Messtechnik?	VW?
70	29.06.2017	F	Geometrie	Bauraum fürs Einbringen	entsprechend Innenradius	
71	29.06.2017	F	Stoff	Isolationsbeschädigung	verhindern	
72	29.06.2017	F	Gebrauch	Positionierungsgenauigkeit	1/3 Drahtdurchmesser	
73	13.07.2017	W	Geometrie	Drahtdurchmesserbereich	0,5-1 mm	
74	13.07.2017	F	Geometrie	Windungszahl	0,9-->32 0,75-->48 0,56--> 82	aktuell?
75	13.07.2017	F	Geometrie	Wickelkopfform	entsprechend Schaltschema und Bauraum	
76	13.07.2017	W	Kräfte	Aufrechterhaltung der Drahtspannung	während Übergabe und Montage	
77	13.07.2017	W	Kinematik	beidseitige Montage	A und B-Seite	
78	05.09.2017	F	Stoff	Bruchdehnung des Drahtes	DIN EN 60317	
79	05.09.2017	F	Stoff	Fehlstellen des Drahtes	5 Fehlstellen auf 50 bzw. 100 m	
80	05.09.2017	F	Stoff	Dehnbarkeit und Haftung des Drahtes	1x Durchmesser	
81	05.09.2017	F	Stoff	Tempertaurindex des Drahtes	200	
82	05.09.2017	F	Stoff	Isolationsmaterial des Drahtes	PEI-PAI	Kehl- Rückmeldung erfolgt nach M51
83	05.09.2017	F	Stoff	Material des Blechpakets		Vw?
84	05.09.2017	F	Kontrolle	Spannungsfestigkeit	DC 2,1 kV --> GND Auslösestrom 0,050 mA	
85	20.07.2017	W	Gebrauch	Übergabe von Prozessen Spulenstrang	Ordnung beibehalten	
86	20.07.2017	W	Geometrie	Wicklungsschema	unabhängig	
87	07.09.2017	F	Stoff	Abriebbeständigkeit	Drahtabhängig entsprechend Durchmesser DIN 60317	