
1 Einleitung

Die weltweit steigenden Investitionskosten in der Elektromobilität und die damit einhergehenden gesellschaftlichen Veränderungen müssen für eine kollektive Akzeptanz der Bevölkerung zu einer verbesserten Ökobilanz beitragen. Emissionsanalysen elektrifizierter Antriebslösungen werden zunehmend kritisch hinterfragt und weichen Life Cycle Assessments (LCAs), die die gesamte Wertschöpfungskette untersuchen. Das Ziel eines nachhaltigen Antriebs harmonisiert mit einem langlebigen und ressourcenschonenden Design, bei dem sich Emissionen während der Fertigung und Entsorgung über den gesamten Lebenszyklus amortisieren. Aufgrund steigender elektrischer und thermischer Belastungen wird das Isolationssystem zunehmend zum bestimmenden Faktor der Lebensdauer elektrischer Maschinen.

In der vorliegenden Dissertation wird daher die Forschungsfrage untersucht, in welchem Maß das elektrische Isolationssystem die Lebensdauer und die Zuverlässigkeit einer elektrischen Maschine steigert. Zusätzlich werden die Auswirkungen des Isolationssystems auf die Performance der Maschine berücksichtigt, die sich aus einem veränderten Kupferfüllfaktor und einer optimierten Kühlung ergeben können. Die Steigerung der Leistungsdichte wird ebenfalls in der Entwicklung elektrischer Maschinen fokussiert, da sie mit der Einsparung von Kosten, Bauraum und Ressourcen korreliert. Besonders in der aktuellen Marktphase mit Trends wie steigenden Materialkosten und sinkender Ressourcenverfügbarkeit bieten leistungsdichte Maschinen Wettbewerbsvorteile, die jedoch im Konflikt mit einem langlebigen Design stehen. Die vorgestellte Methodik zeigt, wie durch die Berücksichtigung der Zuverlässigkeit des Isolationssystems in einer frühen Entwicklungsphase die Lebensdauer oder die Leistungsdichte gesteigert und eine Überdimensionierung der Maschine verhindert werden kann.

Der Begriff der *Zuverlässigkeit* meint dabei die Fähigkeit, über die gesamte

Betriebszeit ausfallfrei anwendungsspezifische Leistungen zu erbringen. Da Ausfälle niemals gänzlich vermieden werden können, zeichnen sich zuverlässige Systeme durch eine geringe Ausfallwahrscheinlichkeit aus, die erst nach Ende der nominellen Betriebszeit stark ansteigt. Das Isolationssystem gehört zu den nichtredundanten Komponenten, sodass ein Ausfall im Isolationssystem zum Ausfall der elektrischen Maschine führen kann und das Lebensdauerende definiert.

1.1 Motivation

Die Zuverlässigkeit der elektrischen Maschine wird durch die Zuverlässigkeit der einzelnen Komponenten bestimmt und durch die fehleranfälligste Komponente begrenzt. Die Identifizierung und Optimierung von Schwachstellen und fehleranfälligen Komponenten besitzt daher Priorität.

Umfangreiche Studien zur Zuverlässigkeit elektrischer Maschinen wurden bereits 1982 [Cor+82] und 1985 [Gro85] vom Electric Power Research Institute (EPRI) durchgeführt. Untersucht wurden überwiegend Asynchronmaschinen (ASMs) mit einer Leistung von mindestens 150 kW, die die Mehrheit damaliger Industriemaschinen ausmachten. Die Ausfälle wurden den Komponenten Stator, Rotor, Lager und Andere zugeordnet. Das Ergebnis zeigte, dass Lagerausfälle mit 41% der Gesamtausfälle und durch den Stator bedingte Ausfälle mit 37% für den Großteil der gesamten Ausfälle verantwortlich waren. Die Anteile der durch den Rotor bedingten Ausfälle beliefen sich auf 10% und Ausfälle anderer Komponenten auf 12%. Eine Industry Assessment Study (IAS) aus dem Jahr 1986 bestätigte die Ergebnisse des EPRI und veröffentlichte ähnliche Statistiken [Alb+86]. Die Lager waren auch hier mit 44% die fehleranfälligste Komponente. Der Anteil der Ausfälle durch den Stator fiel mit 26% geringer aus, der durch den Rotor betrug 8% und 22% konnten keiner der primären Komponenten zugeordnet werden. Qualitätsstandards für hochwertige und zuverlässige elektrische Maschinen wurden daher in der Vergangenheit durch optimierte Schmiervverfahren, reduzierte Partikelkontamination und verbesserte Oberflächenqualität der Lager erreicht.

1995 wurde eine umfangreiche Studie zu Ausfällen von ASMs in Offshoreanlagen der Erdölindustrie in der Nordsee veröffentlicht und mit den Ergebnissen

aus [Cor+82] und [Gro85] verglichen [TD95]. Das erhöhte Spannungsniveau der ASMs in [TD95] von bis zu 15 kV führte in den Ausfallstatistiken dazu, dass der Anteil elektrisch bedingter Ausfälle anstieg.

Mit zunehmendem Einsatz pulsumrichtergespeister Maschinen, die ein vielfältigeres Ausfallverhalten zeigten, wurden Ende der 1990er Jahre zunehmend Studien veröffentlicht, die die Schädigungsmechanismen des elektrischen Isolationssystems fokussierten [Kau+96; Bon97; Kau+00]. Die Entwicklung leistungsdichter Antriebe in den folgenden Jahrzehnten veränderte die Belastung und führte dazu, dass das elektrische Isolationssystem mit einem Anteil von 66% an den Gesamtausfällen zur fehleranfälligsten und lebensdauerbestimmenden Komponente wurde [He+14].

Aufgrund stetig steigender Belastungen bleibt dieser Trend trotz der Entwicklung neuer Isolationsmaterialien in modernen Traktionsmaschinen für die Elektromobilität bis heute bestehen. Neue Belastungssteigerungen durch den vermehrten Einsatz schnellschaltender Siliciumcarbid (SiC)-Halbleiter [Lan+21] und die 800 V-Technik zur Reduktion der Schaltverluste im Umrichter und die Erhöhung der Ladeleistung (> 200 kW) [MHZ20b; Jun17] lassen sogar vermuten, dass sich die Ausfallhäufigkeit zukünftig weiter in Richtung des Isolationssystems verlagert. Da zeitgleich Anwendungen wie das autonome Fahren erhöhte Anforderungen an die Zuverlässigkeit der elektrischen Maschine stellen, wird die Bedeutung des Isolationssystems im zukünftigen Maschinendesign zunehmen. [HW21b] bietet eine gute Übersicht zur einschlägigen Literatur und zeigt, dass die Anzahl an Publikationen zur Zuverlässigkeit elektrischer Maschinen deutlich steigt.

1.2 Zielsetzung

Da das Isolationssystem die Zuverlässigkeit elektrischer Traktionsmaschinen wesentlich beeinflusst, wird in dieser Dissertation eine Auslegungsmethodik entwickelt, in der das Design des Isolationssystems bereits in einer frühen Entwurfsphase fokussiert wird. Ziel ist es zu zeigen, dass dieser Paradigmenwechsel ein angemessenes Gleichgewicht zwischen Zuverlässigkeit und Performance der Maschine ermöglicht und gleichzeitig bisher ungenutzte Optimierungspotenziale ausgeschöpft werden können.

Bei der Entwicklung elektrischer Antriebsstränge für die Elektromobilität wird die Traktionsmaschine als eine Komponente im Gesamtsystem angesehen. Damit die Komplexität des Gesamtsystems beherrschbar bleibt, sind auf Systemebene häufig nur wenige Parameter pro Einzelkomponente (elektrische Maschine, Leistungselektronik, Batterie, Getriebe etc.) relevant. Im klassischen Entwurfskonzept, welches in Abbildung 1.1 dargestellt ist, dominieren leistungsbezogene Parameter wie Drehmoment, Drehzahl oder die Maschinenleistung. Hinzu kommen Parameter wie Bauraum, Gewicht oder Kosten. Bei dieser Top-Down-Methodik gibt die Systemebene mittels der priorisierten Zielgrößen die Schwerpunkte für die zeitaufwändige Detailkonstruktion der elektrischen Maschine vor. In den letzten Jahren wurden Maschinen überwiegend leistungsorientiert ausgelegt [Gee+15; Al-+18; BHH19]. Die Auslegung des Isolationssystems der Maschine basierte oft auf Erfahrungswerten mit Sicherheitsfaktoren oder Worst-Case-Szenarien, in denen die Isolationsmaterialien entsprechend der maximalen Betriebstemperatur unter Volllast ausgewählt wurden [NJS21]. Eine Verknüpfung der Temperatur mit der eigentlichen Zielgröße, der Zuverlässigkeit bzw. der Lebensdauer, erfolgte sogar meistens erst nach dem Maschinendesign in der Produktzertifizierungsphase und birgte das Risiko zusätzlicher Iterationsschritte. Besonders in Automobilanwendungen sind die Lastkollektive jedoch sehr variabel und von der individuellen Nutzung der Fahrerinnen und Fahrer abhängig [Han+23]. Es ist daher davon auszugehen, dass die leistungsorientierte Auslegungsmethodik zu einer signifikanten Überdimensionierung führt und die Lebensdauer der Maschine die Betriebszeit der Anwendung übersteigt.

Um diese Überdimensionierung zu verhindern, bedarf es eines neuen Konzepts, in dem Zuverlässigkeitsuntersuchungen von der Systemebene höher priorisiert und frühzeitig in den Entwurf der elektrischen Maschine eingebunden werden. Erste Erfahrungen mit zuverlässigkeitsorientierten Auslegungsmethoden machte die Power Electronics, Machines and Control (PEMC) Research Group der Universität Nottingham [Ji+21; Gal+20; Gia+20; GMG20; MGG19]. Die vielversprechenden Ergebnisse dieser Publikationen zeigen, dass durch eine Optimierung des Isolationssystems die Anforderungen an die Lebensdauer der untersuchten Maschine weiterhin eingehalten, die Leistungsdichte erhöht und sogar die Entwicklungszeit reduziert werden konnten. Letz-

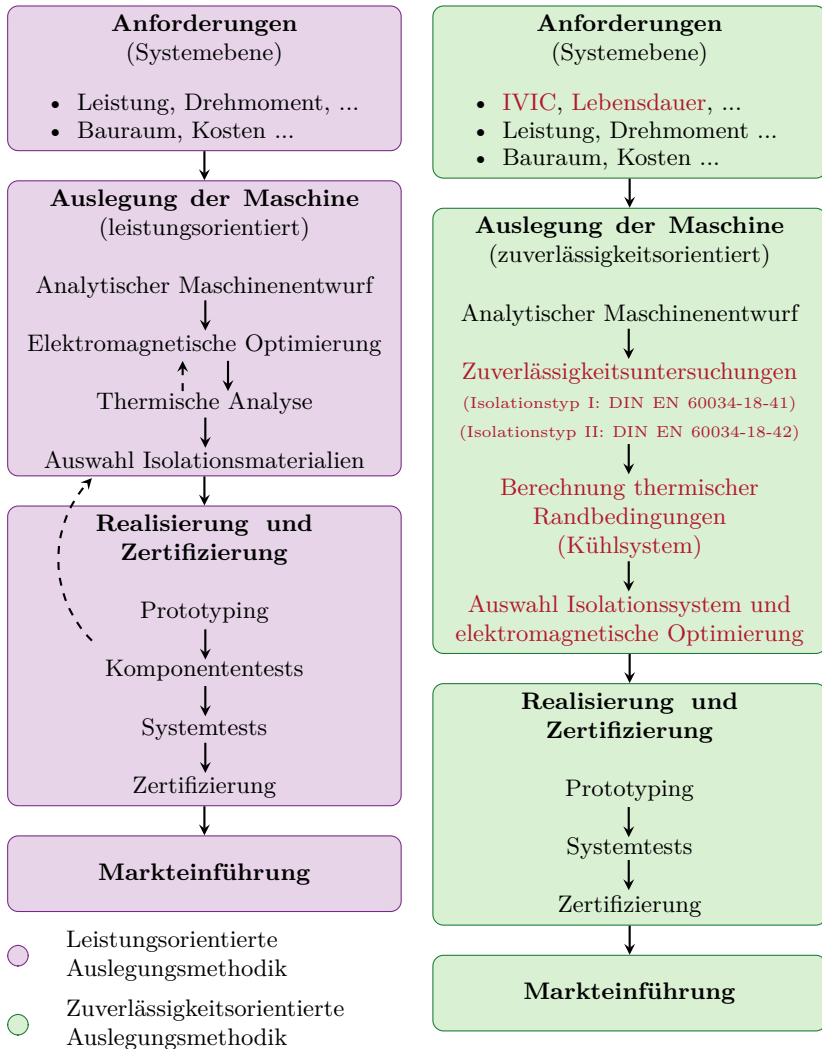


Abbildung 1.1: Gegenüberstellung der konventionellen Auslegungsmethodik (links) mit der neu entwickelten Auslegungsmethodik (rechts)

teres wurde erreicht, indem die Zuverlässigkeitsuntersuchungen parallel zum Entwurf der elektrischen Maschine durchgeführt wurden und in das Design der Maschine eingegangen sind. Der spätere Zertifizierungsprozess vor der Markteinführung beschleunigte sich, da man auf die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsuntersuchungen zurückgreifen konnte. Da sich die Automobilbranche im Umbruch befindet, können kurze Entwicklungszyklen einen zusätzlichen Wettbewerbsvorteil ausmachen.

Die zuverlässigkeitsorientierte Auslegungsmethodik elektrischer Maschinen in dieser Dissertation berücksichtigt Zuverlässigkeitsuntersuchungen ebenfalls in einer frühen Entwurfsphase. Die Vorteile der frühzeitigen Ermittlung der Randbedingungen sind die kurzfristige Abschätzung der Machbarkeit und die Vermeidung zusätzlicher Iterationen. Abbildung 1.1 stellt die zuverlässigkeitsorientierte Auslegungsmethodik der klassischen leistungsorientierten Auslegungsmethodik gegenüber. Zunächst wird gemäß der Leitfrage *„Innerhalb welcher Leistungs- und Systemgrenzen ist ein zuverlässiger Betrieb möglich?“* verfahren. Wenn von der Systemebene Anforderungen bzgl. der Zuverlässigkeit in Form einer IVIC, Failure in Time (FIT)-Werten oder der Lebensdauer vorgegeben werden, können nach einem ersten analytischen Maschinenentwurf Zuverlässigkeitsuntersuchungen durchgeführt werden, um die Randbedingungen eines sicheren Betriebs zu ermitteln. Im Gegensatz zum leistungsorientierten Ansatz, bei dem die Maschine thermisch anhand einer Wärmeklasse ausgelegt wird, werden bei der zuverlässigkeitsorientierten Methode anschließend die thermischen Randbedingungen anhand der eigentlichen Zielgröße (IVIC oder Lebensdauer) berechnet. Erst wenn die anwendungsspezifischen Randbedingungen definiert sind, erfolgt die elektromagnetische Optimierung. Wenn die Zuverlässigkeitsuntersuchungen nach den Normen DIN EN 60034-18-41 bzw. DIN EN 60034-18-42 durchgeführt wurden, können diese Ergebnisse im Zertifizierungsprozess verwendet werden und es entfallen zusätzliche Komponententests.

Die zu Beginn dieses Kapitels genannten Optimierungspotenziale werden durch die detailliertere Betrachtung der Randbedingungen ausgeschöpft. Die zuverlässigkeitsorientierte Auslegungsmethodik ermöglicht einen Maschinenentwurf, der näher an den vorgegebenen Betriebsgrenzen liegt und daher weniger überdimensioniert ist.

1.3 Vorgehensweise

Abbildung 1.2 zeigt die Struktur der vorliegenden Dissertation, um die Ziele aus Kapitel 1.2 zu realisieren.

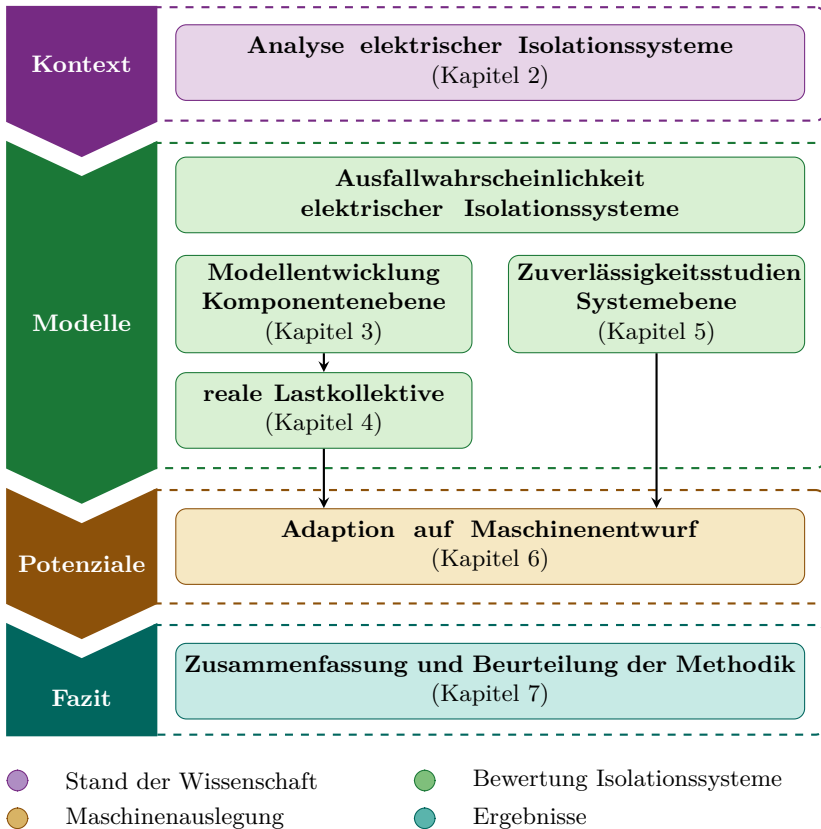


Abbildung 1.2: Struktur der Arbeit

Die Basis bildet eine eingehende Analyse elektrischer Isolationssysteme anhand aktueller Forschungsarbeiten. In Kapitel 2.1 werden der Aufbau von modernen Isolationssystemen für leistungsdichte Traktionsmaschinen beschrieben.

ben und die lebensdauerrelevanten Komponenten identifiziert. Zusätzlich werden Unterscheidungen und Kategorien verschiedener Isolationssysteme in aktuellen Normen eingeführt, die in den späteren Kapiteln 3.2 und 5.2 herangezogen werden. Da der Ausfall des Isolationssystems das zentrale Thema dieser Arbeit ist, werden in Kapitel 2.2 signifikante Schädigungsmechanismen und in Kapitel 2.3 Belastungen analysiert. Die Zustandsbeurteilung erfolgt in der vorliegenden Dissertation mit der Messung von Teilentladungen (TEs), da die TE-Aktivität mit dem Zustand des Isolationssystems korreliert. Kapitel 2.4 widmet sich der Beschreibung verschiedener TE-Messsysteme.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 2 werden in den Kapiteln 3 und 4 Lebensdauermodelle auf Basis empirischer Untersuchungen entwickelt und in Kapitel 5 Zuverlässigkeitsuntersuchungen mittels TEs-Messungen durchgeführt. Wie in Abbildung 1.2 dargestellt, sind diese Kapitel unabhängig voneinander und betreffen verschiedene Kategorien von Isolationssystemen. Bei der Entwicklung von Lebensdauermodellen in Kapitel 3 wird zunächst ein thermisches Modell (Kapitel 3.2) und anschließend ein erweitertes multiphysikalisches Modell (Kapitel 3.3) mit der Methodik des DoE erarbeitet. Die Messungen in Kapitel 3 werden unter Laborbedingungen durchgeführt. Um betriebsabhängige Lebensdauermodelle zu entwickeln, müssen reale Lastkollektive berücksichtigt werden. Dem trägt Kapitel 4 Rechnung. Die TE-Messungen in Kapitel 5 werden an verschiedenen Prüfkörpern (DUTs) (engl. Devices Under Test) und Statoren durchgeführt, um die Gültigkeit der Messergebnisse an DUTs für reale Maschinen zu beurteilen. Anschließend wird der Vergleich verschiedener Isolationssysteme mit neuartigen High Thermal Conductivity (HTC)-Materialien fokussiert. In Kapitel 6 werden die zuvor entwickelten Modelle und Ergebnisse im Entwurfsprozess einer permanentmagnet-erregten Synchronmaschine (PMSM) angewendet. Wie bereits in Abbildung 1.1 dargestellt, werden zunächst einheitliche thermische Randbedingungen definiert (Kapitel 6.1) und anschließend die Effekte des Isolationssystems auf die Performance und Zuverlässigkeit der PMSM diskutiert (Kapitel 6.2).

2 Analyse elektrischer Isolationssysteme und Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext

Die Analyse des elektrischen Isolationssystems (EIS) im folgenden Kapitel dient der Erläuterung notwendiger Grundlagen sowie dem aktuellen Kenntnisstand der Forschung. Es werden Isolationssysteme für Niederspannungsanwendungen bis 1.000 V betrachtet, da diese zahlreich in Traktionsmaschinen für die Elektromobilität eingesetzt werden. Isolationssysteme für Niederspannungsanwendungen zeichnen sich durch den Einsatz moderner Hochleistungsthermoplaste aus, wohingegen in Hochspannungssystemen anorganische Werkstoffe wie Glimmer verwendet werden. In Niederspannungsanwendungen wird auf Glimmer verzichtet, da die Bearbeitung von Glimmer aufwändig ist und die versetzten Glimmerlagen zu sehr dicken Isolationspapieren führen, die verglichen mit den Anforderungen häufig überdimensioniert sind. Als weiterführende Literatur zu Hochspannungsisolationssystemen sind [BN17] und [Sto+14] zu empfehlen. Es ist naheliegend, die Analyse mit dem Aufbau und den verschiedenen Komponenten des EIS zu beginnen.

2.1 Aufbau elektrischer Isolationssysteme für Niederspannungsmaschinen

Das Isolationssystem trennt Komponenten unterschiedlichen Potentials, schützt vor Verunreinigungen und erhöht sowohl die mechanische Festigkeit als auch die Wärmeleitfähigkeit der Maschine. Um die verschiedenen Anforderungen zu erfüllen, muss die Kompatibilität der einzelnen Komponenten beachtet werden. Die detaillierte Analyse des EIS in dieser Arbeit fokussiert die Kernkomponenten, die in Abbildung 2.1 dargestellt sind und die Zuverlässigkeit

der elektrischen Maschine signifikant beeinflussen. Zu diesen zählen der Kupferlackdraht, die Nutisolation und die Imprägnierung. Nebenkomponenten wie der Nutkeil, Zugschnüre oder Isolierschläuche werden nicht näher untersucht. Gute Übersichten, die auch die Nebenkomponenten darstellen, sind in [CFB08] und [Nat+18] zu finden.

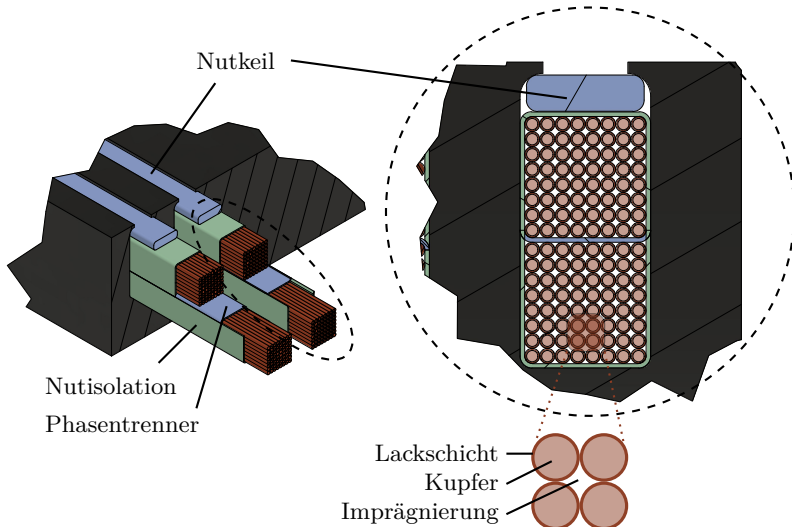


Abbildung 2.1: Design eines EIS für Runddrahtwicklungen mit den Kernkomponenten: Kupferlackdraht, Nutisolation und Imprägnierung

Die Runddrahtwicklung ist die am häufigsten verwendete Wickeltechnologie in Traktionsmaschinen für die Elektromobilität [Ruf18]. Die Anforderungen, Maße, Toleranzen und Prüfverfahren der Runddrähte aus Kupfer und ihrer Lackschicht sind in der Norm DIN EN 60317-0-1 definiert. Die Lackschicht besteht aus einem Grundlack, der die fehlerfreie Auftragung des Isolationslacks gewährleistet, dem Isolationslack und alternativ einem Gleitlack, der den Wickelprozess erleichtert. Der Isolationslack wird abhängig vom Isolationsgrad mittels einer Düsenlackierung oder Filz in 10 bis 30 dünnen Schichten aufgetragen und anschließend ausgehärtet [HSF16]. Je nach Anforderung werden als Isolationslack verschiedene Thermoplaste verwendet oder kombiniert,