

## Schlussbericht

### PRO-E-Traktion Automatisierte und robuste Produktionssysteme für E-Traktionsantriebe

### Automatisierte Fertigungstechnologien zum Biegen, Montieren und Schalten von innovativen Formspulenwicklungen

Vorgelegt von:	Förderkennzeichen:
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)	01MX15011F
Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS)	
Egerlandstr. 7,9 91058 Erlangen	
Projektleiter:	Tel.: +49 9131 85-27569
Herr Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke	Fax: +49 9131 302528
	Email: joerg.franke@faps.fau.de
Autoren des vorliegenden Berichts:	
Tobias Gläsel, Michael Masuch, Michael Weigelt, Alexander Kühl, Jörg Franke	
Laufzeit des Vorhabens:	Datum:
von: 01.06.2016                      bis: 31.05.2019	28.02.2020

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



DLR Projektträger

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>PROJEKTDURCHFÜHRUNG .....</b>	<b>6</b>
1.1	Aufgabenstellung .....	6
1.2	Voraussetzungen bei Vorhabensdurchführung .....	6
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	7
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens .....	8
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	10
<b>2</b>	<b>ERZIELTE ERGEBNISSE .....</b>	<b>11</b>
2.1	Bewertung innovativer Formspulenwicklungen und Analyse von Fertigungseinflüssen auf die Produkteigenschaften .....	11
2.2	Prozessketten zur Herstellung von Statoren mit offener Formspulenwicklung .....	16
2.3	Technologien zum Biegen lackisolierter Flachleiter .....	18
2.4	Technologien zur Montage offener Formspulenwicklungen .....	26
2.5	Technologien zur Kontaktierung flachleiterbasierter Formspulenwicklungen .....	32
2.6	Ziele des Forschungsvorhabens und Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse .....	42
<b>3</b>	<b>VERWENDUNG BEREITGESTELLTER MITTEL .....</b>	<b>46</b>
<b>4</b>	<b>NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT .....</b>	<b>48</b>
<b>5</b>	<b>NUTZEN UND VERWERTUNG DER VORHABENSERGEBNISSE .....</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>WÄHREND DES VORHABENS BEKANNT GEWORDENE RELEVANTE FORTSCHRITTE BEI ANDEREN STELLEN .....</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>VERÖFFENTLICHUNG VON PROJEKTERGEBNISSEN .....</b>	<b>53</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fixe und variable Parameter bei der Untersuchung alternativer Wicklungen....	11
Abbildung 2: Auswahl unterschiedlicher Wicklungstechnologien zur weiteren Untersuchung .....	12
Abbildung 3: Grundlegende Abschätzung der elektromagnetischen Eigenschaften.....	12
Abbildung 4: CAD-Darstellung zur geometrischen Analyse der alternativen Wickelschemata .....	13
Abbildung 5: Morphologischer Kasten Wickelschemata.....	14
Abbildung 6: Einfluss von Fertigungsschwankungen auf den Wirkungsgrad [16].....	15
Abbildung 7: Fertigungsablauf konzipiertes Produktionssystem .....	16
Abbildung 8: Ausgangsmodell Ablaufsimulation Fertigungskette .....	17
Abbildung 9: Ergebnisse des Kapazitätsabgleichs für die Stückzahl Szenarien .....	18
Abbildung 10: Vorrichtungen zum Rundbiegen und zugkraftüberlagerten Schwenkbiegen...	19
Abbildung 11: Überarbeitete Version der Rotationsbiegevorrichtung .....	19
Abbildung 12: CAD-Konstruktion und Aufbau der Dreipunktbiegevorrichtung.....	20
Abbildung 13: Kraftverläufe für den Referenzdraht [31] .....	20
Abbildung 14: Aufbau der überarbeiteten 3-Punkt-Biegevorrichtung.....	21
Abbildung 15: Darstellung der notwendigen Kraft und der gemessenen Rückfederung .....	21
Abbildung 16: Schliffbilder vor und nach dem Gesenkbiegen .....	22
Abbildung 17: Elektrische Prüfungen.....	22
Abbildung 18: Teilentladungs- und reaktive Ströme.....	23
Abbildung 19: Sondierung der strukturmechanischen Umformsimulation eines Flachdrahtes anhand einer Zug-Biegebelastung .....	23
Abbildung 20: Belastungssituationen bei der Fertigung eines Hairpins; Gesenkbiegevorrichtung [29] .....	24
Abbildung 21: Schälwiderstandsprüfung in Anlehnung an DIN 1464 .....	24
Abbildung 22: Analyse der Isolationsschichtdickenverteilung [29] .....	25
Abbildung 23: Ermittlung des Einflusses von Biegungen auf den Leiterwiderstand [16].....	25
Abbildung 24: Blechpaket (ohne Nutisolation) für experimentelle Montageuntersuchungen .	27
Abbildung 25: Öffnungsweite eines Hairpins .....	27
Abbildung 26: Aufbau und beispielhafte Vormontage verschiedene partielle Werkzeuge .....	28
Abbildung 27: Kinematiken zur Formierung der Formspulen zu einem Montagekorb .....	28
Abbildung 28: Bewertung der Kinematiken zur Formierung der Formspulen zu einem Montagekorb.....	29
Abbildung 29: Werkzeuge und Bewegungsabläufe bei der einzelnen Wickelkorbzusammenstellung.....	29
Abbildung 30: Schrittweises Eindrehen in der Eindreh-Vorrichtung .....	30

Abbildung 31: Notwendiges Auffalten und Fixieren der Position bei der Isolationspapiermontage .....	30
Abbildung 32: Stiftschablone in einer Ausführungsvariante mit Sicherungsring als Anschlag .....	30
Abbildung 33: Detailkonstruktion und zusätzliche Werkzeuge .....	31
Abbildung 34: Funktionsweise der radialen Führungswerkzeuge .....	31
Abbildung 35: Gefügter Wickelkorb im Referenzstator vor dem Lösen des Stiftschablonenmoduls .....	32
Abbildung 36: Bei der Kontaktierung von Hairpinwicklungen zu berücksichtigende Aspekte [17] .....	33
Abbildung 37: Qualifizierung der Fluoreszenzmessung zur messtechnischen Erfassung von Isolationsrückständen [20] .....	34
Abbildung 38: Parameterstudie Isolationsabtrag Bürstspanen [20] .....	35
Abbildung 39: Parameterstudien Isolationsabtrag Laserabtragen [20] .....	35
Abbildung 40: Versuchsaufbau zur Widerstandsmessung und Regressionsanalyse Widerstand $R_K$ Einschweißtiefe $t$ [22] .....	36
Abbildung 41: Zusammenhang Scherzugfestigkeit $F_S$ und Widerstand Kontaktstelle $R_K$ [22]	36
Abbildung 42: Analyse der erzielbaren Kontaktstellengeometrien [17] .....	37
Abbildung 43: Versuchsanordnung und Haupteffektdiagramm Parameterstudie Laserstrahlschweißen [21] .....	37
Abbildung 44: Analyse der Spritzerbildung in Abhängigkeit der erzielbaren Widerstände $R_K$ [21] .....	38
Abbildung 45: Schliffanalysen (Messdaten: [21]) .....	39
Abbildung 46: Ermittlung Prozessfähigkeit Referenzprozess .....	40
Abbildung 47: Konstruktion und Umsetzung Schweißdemonstrator .....	40
Abbildung 48: Gegenüberstellung Stoßarten .....	41
Abbildung 49: Technologiezelle zur Kontaktierung .....	41

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Balkenplan des Forschungsvorhabens (AP6 nicht dargestellt, da der Lehrstuhl FAPS in diesem keine Arbeitsinhalte hatte) .....	8
Tabelle 2: Zusammenarbeit mit den Konsortialpartnern.....	10
Tabelle 3: Bewertungsmatrix der vom FAPS untersuchten alternativen Wickelschemata .....	13
Tabelle 4: Bewertung technologischer Alternativen zur Herstellung von Statoren mit offener Formspulenwicklung .....	16
Tabelle 5: Ergebnisse der Widerstandsmessungen von gebogenen Leiterproben.....	25
Tabelle 6: Bewertung verfügbarer Kontaktierungstechnologien [17] .....	33
Tabelle 7: Ziele und umgesetzte Ergebnisse der Bewertung innovativer Formspulenwicklungen .....	42
Tabelle 8: Verwertung der Ergebnisse des Teilvorhabens.....	49

## Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Cu-ETP	Electrolytic Tough Pitch Copper
EV	Elektrische Fahrzeuge
FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
MS	Meilenstein
OSG	Obere Spezifikationsgrenze
PKW	Personenkraftwagen
RFU	Relative Fluorescence Unit
UniBW	Universität der Bundeswehr München – Lehrstuhl für elektrische Antriebstechnik und Aktorik
OEM	Original Equipment Manufacturer ( <i>deutsch</i> : Erstausrüster)
EV	Electric Vehicle ( <i>deutsch</i> : Elektrofahrzeug)

## **1 Projektdurchführung**

Die Durchführung des Teilvorhabens „Automatisierte Fertigungstechnologien zum Biegen, Montieren und Schalten von innovativen Formspulenwicklungen“ erfolgte im Verbundprojekt „PRO-E-Traktion - Automatisierte und robuste Produktionssysteme für E-Traktionsantriebe“. Zur Projektdurchführung wurden im Rahmen des Förderprogramms "ELEKTRO POWER II: Elektromobilität - Positionierung der Wertschöpfungskette" Mittel vom BMWi bereitgestellt.

### **1.1 Aufgabenstellung**

Getrieben durch die Elektrifizierung des automobilen Antriebsstrangs müssen Wertschöpfungsketten für elektrische Traktionsantriebe schnell auf sich verändernde Marktsituationen reagieren, weswegen in kürzester Zeit verschiedene Varianten in stark steigenden Stückzahlen und hoher Qualität herzustellen sind, um im internationalen Wettbewerb bestehen zu können. Vor diesem Hintergrund lag das Ziel des Verbundprojektes in der Beseitigung von Engpässen in der Fertigungskette für zukünftige E-Traktionsantriebe die zu Projektbeginn deren kostenoptimierter, automatisierter und robuster Herstellung entgegenstand. Zu diesem Zweck sollten für stromerregte Synchronmotoren adaptive und vernetzte Produktionseinrichtungen entwickelt werden, welche eine entscheidende Reduzierung der Prozesszeit und Herstellungskosten bei einer gleichzeitigen Qualitätssteigerung in der Herstellung elektrischer Traktionsantriebe ermöglichen, wobei offene Formspulenwicklungen, auch Hairpinwicklung genannt, im Fokus standen.

Die Ziele des vom Lehrstuhl FAPS bearbeiteten Teilvorhabens „Automatisierte Fertigungstechnologien zum Biegen, Montieren und Schalten von innovativen Formspulenwicklungen“ können in zwei Bereiche eingeteilt werden. So waren Technologien zur Realisierung der Prozessschritte des Biegens, Montierens und Schaltens innovativer Formspulenwicklungen grundlegend zu untersuchen. Dies sollte die Konzeption, Analyse und Optimierung sowie Bewertung der Technologien unter Zuhilfenahme geeigneter Vorgehensweisen wie Experimente und Simulationen umfassen. Neben der Optimierung im Hinblick auf die erzielbare Qualität des Prozessergebnisses sollte eine Reduktion der Taktzeit verglichen mit etablierten Technologien zur Wicklungsherstellung um mindestens 10 % erreicht werden.

Darüber hinaus waren unter Berücksichtigung der analysierten Technologien Prozessketten für die vollautomatisierte Herstellung von offenen Formspulenwicklungen zu entwickeln und evaluieren sowie Fertigungseinflüsse auf die Produkteigenschaften zu analysiert. Zusätzlich zu der im Konsortium fokussierten Referenzwicklung sollten mindestens 3 geeignete alternative Wicklungsarten bzw. Wickelschemata identifiziert und mit einer im Projekt zu entwickelten Bewertungssystematik gegenübergestellt werden. Diese sollten eine Steigerung des Kupferfüllgrades (nach der Definition absoluter Netto-Leiterquerschnitt zu Brutto-Nutquerschnitt) auf mindestens 60 % ermöglichen. Zur Bewertung waren neben den erzielbaren Produkteigenschaften insbesondere auch die Herstellbarkeit zu berücksichtigen.

### **1.2 Voraussetzungen bei Vorhabensdurchführung**

Die Bundesregierung strebte in ihrem Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität das ambitionierte Ziel an, dass bis zum Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen fahren [1]. Um dieses Ziel zu erreichen, sollten die Gesamtkosten der Elektromobilität

reduziert, Kaufhemmnisse abgebaut und die Hürden zur industriellen Fertigung gesenkt werden. Vor diesem Hintergrund war eines der Ziele elektromobile Wertschöpfungsketten im Bereich der Produktion zu stärken. Da mit zunehmender Verbreitung von EV eine erhebliche Umwälzungen mit Hinblick auf die Herstellung des Antriebsstrangs von PKW zu erwarten ist [3], wurde die Produktion elektrischer Antriebe für den Einsatz in mobilen Anwendungen fokussiert, in welchem Kontext die Durchführung des vorliegenden Forschungsvorhabens erfolgte. [2]

Am Lehrstuhl FAPS wurde im Mai 2010 eine eigene Forschungsgruppe eingerichtet die sich mit innovativen elektrischen Antriebskonzepten beschäftigt und insbesondere die dafür benötigten Produktionstechnologien entwickelt um die gewonnenen Erkenntnisse nutzbringend in industrielle Anwendungen übertragen zu können. Die Forschungsgruppe umfasste zum Zeitpunkt der Projektdurchführung ca. 15 wissenschaftliche Mitarbeiter und konnte auf diverse Fertigungstechnologien des Elektromaschinenbaus, insbesondere im Bereich der Verarbeitung lackisolierter Kupferdrähte, zurückgreifen. Darüber hinaus standen Messeinrichtungen zur Beurteilung von Qualitätskriterien bei wickeltechnischen Erzeugnissen zur Verfügung. Neben der verfügbaren Infrastruktur wurden am Lehrstuhl FAPS vor Beginn des vorliegenden Forschungsvorhabens umfangreiche Vorarbeiten in Form von Dissertationen, Veröffentlichungen sowie Patentanmeldungen getätigt. Darin wurden insbesondere Erfahrungen mit unterschiedlichen direkten Wickeltechnologien, der Montage und Kontaktierung von Wicklungen sowie der zugehörigen messtechnischen Beurteilung gesammelt.

### **1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Die Arbeitsinhalte des Teilvorhabens verteilten sich auf 7 AP die weiter untergliedert wurden. Zu Projektbeginn wurden auf Grundlage einer im Konsortium abgestimmten Anforderungsdefinition die Entwicklungsziele im Projekt festgelegt und detaillierte Wicklungsformen festgelegt, die die Grundlage für die Projektdurchführung darstellten. Im AP 2 wurden prozessschrittübergreifende Fragestellungen zusammengeführt. So erfolgte neben der kooperativen Analyse von Zusammenhängen zwischen Auslegungs- und Produktionsaspekten im Konsortium die Konzeption und Bewertung von Fertigungseinrichtungen zur Herstellung von Statoren mit offenen Formspulenwicklungen. Darüber hinaus wurden alternative Wicklungsarten identifiziert und bewertet. In den Arbeitspaketen AP 3 bis AP 5 wurden die wesentlichen Prozessschritte des Biegens, Montierens sowie Kontaktierens von Hairpinwicklungen eingehend analysiert. Zu diesem Zweck wurden Parameterstudien durchgeführt und es wurde abgeleitet wie die gewonnenen Erkenntnisse in der industriellen Produktion eingesetzt werden können. Das Projekt schloss mit dem Aufbau von Demonstratoren, um die Eignung der entwickelten Lösungen praxisnah validieren zu können. In Tabelle 1 wird der Ablauf des Projektes mit den vorgestellten Arbeitspaketen dargestellt.



**Tabelle 1: Balkenplan des Forschungsvorhabens (AP6 nicht dargestellt, da der Lehrstuhl FAPS in diesem keine Arbeitsinhalte hatte)**

Arbeitspaket Arbeitsschritt		Projektmonat																																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
AP 1	Anforderungsdefinition																																					
AP 1.1	Anforderungsdefinition																																					
AP 2	Adaptive Automatisierungssysteme für Wicklung																																					
AP 2.1	Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge																																					
AP 2.2	Automatisierungssysteme für Wicklungstechnolo																																					
AP 2.3	Anlagen- und technologie-übergreifende adaptiv																																					
AP 3	Biegetechnologie																																					
AP 3.1	Parameter-Studien																																					
AP 3.2	Industrialisierungstechnologien und Integration																																					
AP 4	Montagetechnologie																																					
AP 4.1	Parameter-Studien																																					
AP 4.2	Industrialisierungstechnologien und Integration																																					
AP 5	Kontaktierungstechnologie																																					
AP 5.1	Parameter-Studien																																					
AP 5.2.1	Industrialisierungstechnologien und Integration																																					
AP 5.2.2	Kontaktier-/Schaltelemente																																					
AP 7	Demonstratoraufbau und Validierung																																					
AP 7.1	Aufbau von Demonstratoren (EMA und Anlagente																																					

#### 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Beim Einsatz elektrischer Maschinen in Kraftfahrzeugen unterliegen diese Restriktionen im Hinblick auf den zur Verfügung stehenden Bauraum- sowie das Zulässige Gewicht der Maschine. Vor diesem Hintergrund stieß die Auslegung hochleistungsfähiger elektrischer Maschinen unter dem Einsatz von Runddrähten zum Zeitpunkt des Projektbeginns zunehmend an ihre Grenzen [4]. Dies wird insbesondere bei Betrachtung des Kupferfüllfaktors sichtbar, der bei automatisiert hergestellten Runddrahtwicklungen üblicherweise bei ca. 40 % bis 50 % liegt. Da für eine weitere Steigerung der Effizienz, Leistungsdichte sowie des Leistungsgewichts elektrischer Antriebe eine Erhöhung des Kupferfüllfaktors notwendig ist, wurde zu Projektbeginn ein Schwenk von den etablierten Runddrahtwicklungen hin zu Flachdrahtwicklungen notwendig, die theoretisch Kupferfüllfaktoren oberhalb von 60 % ermöglichen. [5]

Allerdings eignen sich klassische Technologien zur Wicklungsherstellung wie die Einziehtechnik sowie das Nadelwickeln fast ausschließlich für runde Drahtgeometrien, weswegen zum Beginn des Projektes keine etablierten Fertigungstechnologien zur Herstellung von Statoren mit einer Wicklung aus Flachdraht, ohne die Notwendigkeit der Segmentierung des Blechpakets, verfügbar waren. Um dennoch Statoren für Traktionsantriebe mit dieser Querschnittsgeometrie herstellen zu können, rückte zu Projektbeginn die Technologie der offenen Formspulenwicklungen in den Fokus, die bereits bei Großantrieben und Generatoren Anwendung fand. Allerdings können offene Formspulen aus Flachdrähten wegen ihrer stark unterschiedlichen Flächenträgheitsmomente nicht ohne weiteres in klassischen Wickelverfahren hergestellt werden, weil ein umfangreiches Abstützen im Prozess notwendig wird [6]. Vielmehr lassen sich diese durch eine Kombination aus Biege-, Montage- und Fügeoperationen herstellen. [7]

Zu Beginn des Forschungsvorhabens waren für den Automobilbereich realisierte elektrische Maschinen mit offener Formspulenwicklung in der Regel durch folgende Einschränkungen charakterisiert:

- kleine Statorabmessungen und niedrige Leistungsklassen
- nahezu quadratische und große Leiterquerschnitte mit hoher Formstabilität
- keine vollautomatisierte Herstellung über alle Teilprozessschritte hinweg

Vor diesem Hintergrund war es zur Realisierung leistungsfähiger automobiler Traktionsmaschinen notwendig, das Biegen von lackisolierten Kupferdrähten sowie die Montage und Kontaktierung von offenen Formspulen grundlegend zu analysieren, da hier noch umfassende Unsicherheiten vorlagen.

Zur Formgebung wurde zu Projektbeginn bereits das Verfahren des Freiformbiegen im Formungsschritt-Verfahren angewandt, dessen Vorteil darin liegt, dass unterschiedlichste Geometrien mit einem Werkzeug hergestellt werden können. Allerdings wurde die Herstellung komplexer dreidimensionaler offener Formspulen mit hohen Toleranzanforderungen zu diesem Zeitpunkt noch nicht als möglich angesehen [8] und die benötigten Taktzeiten können von dieser Technologie deutlich nicht eingehalten werden. Darüber hinaus sind zur Realisierung niedriger Wickelköpfe kleine Biegeradien vonnöten [6]. Dies lies Problemstellungen wie das Ausdünnen und Reißen der Lackisolation auf der Zugseite, das Abplatzen der Isolation auf der Druckseite, sowie veränderte Querschnitte in Folge der Umformung erahnen, wozu zum Projektbeginn keinerlei belastbare Erkenntnisse vorlagen.

Um das Auftreten von Stromverdrängungsverlusten zu minimieren, ist der Einsatz von Hairpins mit einer geringen Leiterhöhe anzustreben [9]. Daraus resultiert, dass die in das Blechpaket zu montierenden Formspulen eine geringe Steifigkeit aufweisen, woraus bei der Montage die Gefahr von Beschädigungen resultiert. Weiter verkompliziert wird die Montage durch die Gefahr, dass die Nutgrundisolation beim Einbringen der offenen Formspulen verschoben oder beschädigt wird, und dass sich in Abhängigkeit der Wicklungsauslegung Überschneidungen der Formspulen im Wickelkopf ergeben, die deren sequentielle Montage unmöglich machen. Auch unterliegen die im Biegeprozess hergestellten Formspulen geometrischen Toleranzen, die nur durch eine geführte Montage ausgeglichen werden können [10]. Zum Zeitpunkt des Projektbeginns lagen noch keine allgemeingültigen Untersuchungen zur Montage offener Formspulenwicklungen vor, die die Grundlage zur Lösung der erläuterten Problemstellungen darstellen.

Einer der größten Nachteile von Hairpinwicklungen liegt darin, dass zu deren Herstellung eine hohe Anzahl an Kontaktstellen herzustellen ist um die Formspulen elektrisch und mechanisch miteinander zu verbinden [11]. Zu Kontaktierung im Elektromaschinenbau kamen zum Zeitpunkt des Projektbeginns eine Vielzahl unterschiedlicher Technologien zum Einsatz. Diese wiesen bezogen auf die Kontaktierung offener Formspulenwicklungen eine Vielzahl an Nachteilen, wie einen hohen Platzbedarf, die Notwendigkeit nach zusätzlichen Kontaktelementen oder Werkstoffen, lange Taktzeiten oder eine schlechte Reproduzierbarkeit auf [12]. Vor Projektdurchführung war die Kontaktierung offener Formspulenwicklungen von einer hohen Fehleranfälligkeit und damit einhergehenden Ausschusskosten gekennzeichnet, sodass deren produktionstechnischen Vorteile erst nach einer grundlegenden Optimierung des Kontaktierungsprozesses zum Tragen kommen konnten [13]. Es wurde identifiziert, dass das Verfahren des Laserstrahlschweißens Potentiale für diesen Anwendungsfall zeigt. Allerdings lagen zum Projektbeginn keinerlei Untersuchungsergebnisse zum Laserstrahlschweißen flacheiterbasierter Formspulenwicklungen vor, weswegen der Einsatz dieser Technologie mit einem großen Risiko einherging.

Für die Herstellung von Hairpinwicklungen waren zum Zeitpunkt des Projektbeginns bereits erste Konzepte, z.B. in [14] oder [15] aufgestellt. Allerdings wurde zur wirtschaftlichen Herstellung von elektrischen Traktionsmaschinen mit offener Formspulenwicklung am Standort

Deutschland eine vollautomatisierte Produktion als notwendig erachtet. Hierfür lagen noch keinerlei Überlegungen vor, insbesondere gab es keine Überlegungen zur Kombination und Verkettung der benötigten Prozesstechnologien für die Realisierung offener Formspulenwicklungen.

### 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während der kompletten Projektlaufzeit erfolgte eine enge Abstimmung mit den am Verbundprojekt beteiligten Konsortialpartnern aus Industrie und Wissenschaft. Dabei wurde vom Lehrstuhl FAPS insbesondere das Wissen der Industriepartner zu den von Ihnen vertriebenen Prozesstechnologien genutzt und durch einen Rückfluss von Untersuchungsergebnissen erweitert. Die Zusammenarbeit mit anderen Stellen sowie die Inhalte der Kooperation fasst Tabelle 2 zusammen.

*Tabelle 2: Zusammenarbeit mit den Konsortialpartnern*

Konsortialpartner	Kooperationsinhalte
Bayerische Motoren Werke AG FKZ: 01MX15011A	<ul style="list-style-type: none"> <li>Abschätzung der Herstellbarkeit unterschiedlicher Wickelschemata</li> <li>Bewertung von Fertigungstechnologien und Fertigungsketten</li> </ul>
ThyssenKrupp System Engineering GmbH FKZ: 01MX15011B	<ul style="list-style-type: none"> <li>Konzeption und Validierung einer adaptiven und vollautomatisierten Fertigungskette für offene Formspulenwicklungen</li> <li>Parameterstudien zur Montage von Formspulenwicklungen</li> </ul>
TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH FKZ: 01MX15011C	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lasertechnologien zum Schweißen von Kupferwerkstoffen und Abtrag von Isolationsschichten</li> <li>Durchführung von Parameterstudien zum Laserstrahlschweißen von Formspulenwicklungen sowie Abtrag von Isolationsschichten</li> <li>Implementierung von Lasertechnologien in der Prozesskette</li> </ul>
Otto Bihler Maschinenfabrik GmbH & Co. KG FKZ: 01MX15011D	<ul style="list-style-type: none"> <li>Technologien zur Formgebung für lackisolierte Kupferdrähte</li> <li>Durchführung von Parameterstudien zum Biegen von rechteckigen lackisolierten Kupferleitern</li> <li>Implementierung von Biegetechnologien in der Prozesskette</li> </ul>
RF Plast GmbH FKZ: 01MX15011E	<ul style="list-style-type: none"> <li>Imprägnieren von Statoren mit Formspulenwicklungen</li> <li>Implementierung von Isolationstechnologien in der Prozesskette</li> </ul>
Universität der Bundeswehr München FKZ: 01MX15011G	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bewertung von Fertigungseinflüssen auf die Performance elektrischer Maschinen</li> <li>Abschätzung der Herstellbarkeit unterschiedlicher Wickelschemata</li> </ul>

Neben der Kooperation mit den Konsortialpartnern erfolgte auch eine Abstimmung mit nicht am Projekt beteiligten Spezialisten, um deren Wissen einfließen lassen zu können. Es fand insbesondere ein Austausch auf den Gebieten der Mess- und Prüftechnik sowie mit Bauteil- und Materiallieferanten statt.

Zur Mess- und Prüftechnik wurde mit Herstellern und Lieferanten insbesondere für die Quantifizierung der Oberflächenreinheit mittels Fluoreszenzintensitätsmessung sowie zur Widerstandsmessung im  $\mu\Omega$  Bereich zusammengearbeitet.

Im Kontext der Bearbeitung von isolierten Kupferflachdrahtmaterial wurde mit Herstellern der Isolationsschicht, Lieferanten für Kupfer und Kupferlackdraht kooperiert.

## 2 Erzielte Ergebnisse

Die Zusammenfassung und Darstellung der erzielten Ergebnisse erfolgt gegliedert nach Tätigkeitsschwerpunkten.

### 2.1 Bewertung innovativer Formspulenwicklungen und Analyse von Fertigungseinflüssen auf die Produkteigenschaften

Zu Beginn des Projektes wurden am Lehrstuhl FAPS im Rahmen der Anforderungsdefinition umfangreiche Recherchen zu dem Stand der Technik der Formspulentechnik durchgeführt. Hierbei wurden sowohl Konzepte aus dem automotive Bereich als auch anderen Branchen studiert. Die gefundenen Ansätze wurden hinsichtlich ihrer Eignung bzw. Übertragbarkeit für Traktionsantriebe bewertet. Mit dem Meilenstein 1 wurde für das Projekt ein Referenzdesign festgelegt, welches als Ausgangspunkt für die Untersuchung und Bewertung von alternativen Wicklungsdesigns diente. Es wurde erkannt, dass alternative Wicklungen bezüglich ihrer Strangwindungszahl und ihres Strombelags ähnliche Werte aufweisen müssen um eine Vergleichbarkeit mit der Referenzmaschine sicherzustellen. Aus Abbildung 1 ergibt sich, dass diese Wickelschemata bezüglich der Leiter je Nut, Anzahl paralleler Zweige und Verschaltung im Wickelkopf variieren können.

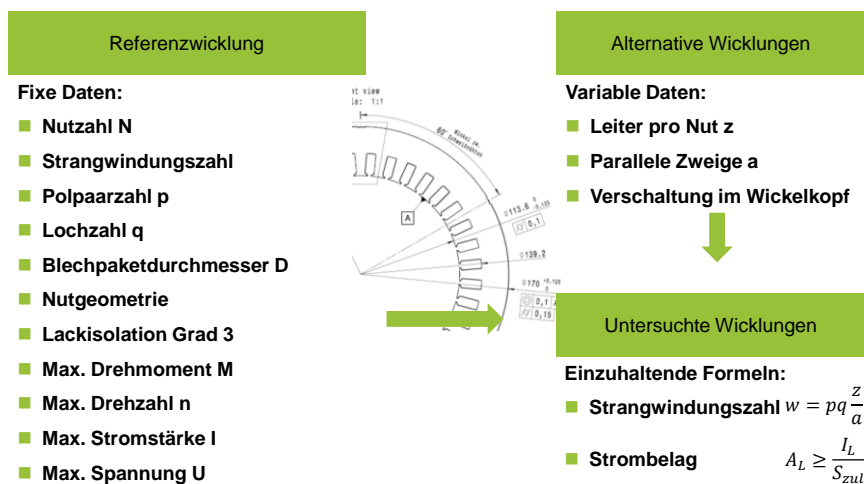


Abbildung 1: Fixe und variable Parameter bei der Untersuchung alternativer Wicklungen

Unter Berücksichtigung dieser Prämissen konnten alternative Wicklungsdesigns gemäß Abbildung 2 identifiziert werden.

Grundsätzliche Wicklungsformen zur Berücksichtigung im Projekt PRO-E-Traktion			
Einschichtige Wellenwicklung	Kombinierte Schleifen-Wellenwicklung	Massiv erhöhte Leiterzahl je Nut	Anpassung Phasenlage je Nut
<ul style="list-style-type: none"> <li>Ideengeber: Aisin</li> <li>Patent US2010/0289374A1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ideengeber: Denso</li> <li>Patent DE102014110377A1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ideengeber: Denso</li> <li>Patent DE102010060083A1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ideengeber: Delco Remy</li> <li>Patent DE 103 21 956 A1</li> </ul>
			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Motivation</li> <li>Montagevereinfachung durch reduzierte Komplexität Wickelschema</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Motivation</li> <li>Erhöhung Freiheitsgrad in der Auslegung von Wicklungsvarianten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Motivation</li> <li>Reduktion Kupferverluste durch Vielzahl dünner Flachdrähte in einheitlichem Wickelschema</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Motivation</li> <li>Reduktion Kupferverluste durch Skin- und Proximity-Effekt mittels geschickter Anordnung unterschiedlicher Phasen in einer Nut</li> </ul>

Abbildung 2: Auswahl unterschiedlicher Wicklungstechnologien zur weiteren Untersuchung

Eine detaillierte elektromagnetische Betrachtung wurde auf dieser Basis dann von der UniBW durchgeführt. Beispielhaft werden die Betrachtungen für die Achtlagen-Wellenwicklung dargestellt:

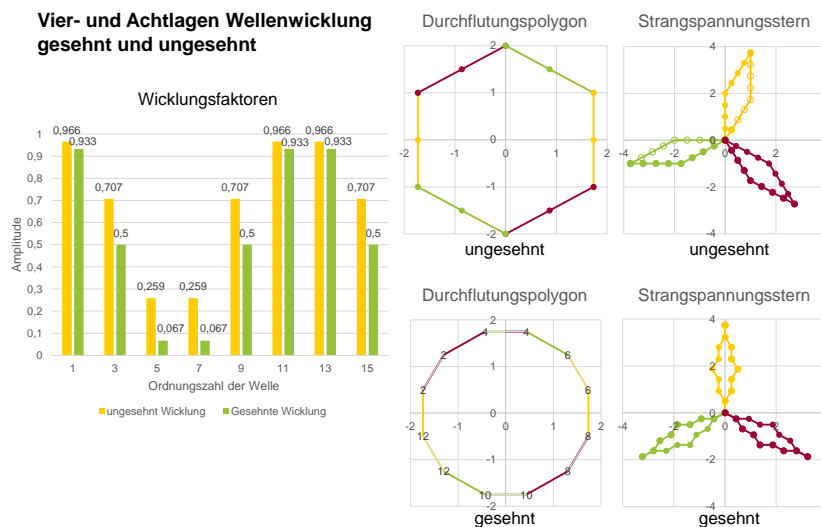
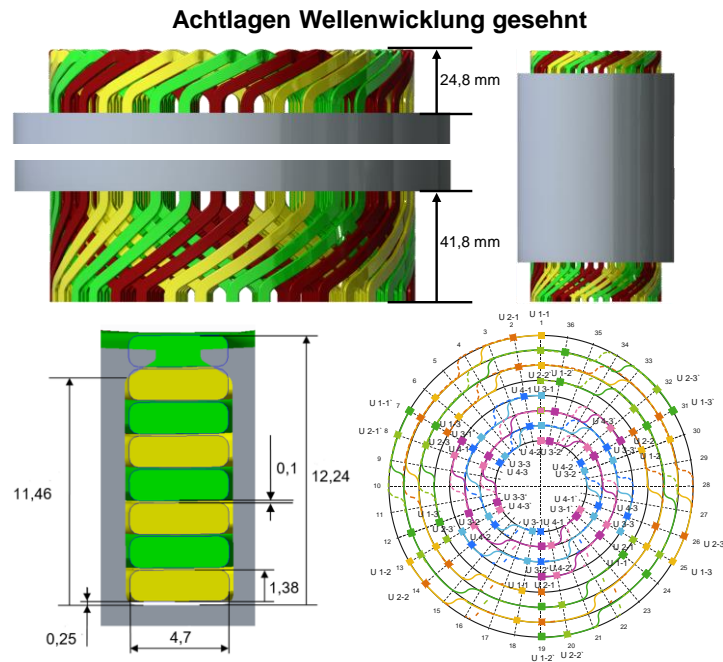


Abbildung 3: Grundlegende Abschätzung der elektromagnetischen Eigenschaften

Um Aussagen über den Raumbedarf der verschiedenen Wickelschemata zu treffen wurden alle betrachteten Schemata komplett in CAD konstruiert. So ließen sich die verschiedenen Konzepte mit der Referenzwicklung vergleichen.

Durch die Erstellung der CAD-Modelle konnte früh im Projektverlauf die Erreichbarkeit von elektrischen Kupferfüllfaktoren über 60 % bewiesen werden.



**Abbildung 4: CAD-Darstellung zur geometrischen Analyse der alternativen Wickelschemata**

Die Ergebnisse der Analysen wurden zunächst in einer tabellarischen Übersicht zusammengefasst, vgl. Tabelle 3, und bildeten die Grundlage für die Gesamtbewertungsmatrix, vgl. Abbildung 5, in Form eines morphologischen Kastens. Die Entwicklung und der Aufbau der Gesamtbewertungsmatrix fanden unter der Koordination durch die UniBW, zunächst in bilateraler Abstimmung mit dem Lehrstuhl FAPS, später im gesamten Konsortium statt. Vor allem die aufzunehmenden Aspekte und deren jeweilige Gewichtung wurden immer wieder mit neuen Erkenntnissen aus aktuellen Versuchsergebnissen und Erfahrungen ergänzt und nachgeführt.

**Tabelle 3: Bewertungsmatrix der vom FAPS untersuchten alternativen Wickelschemata**

	Referenz-wicklung	Schleifen-Wellenwicklung		Vierlagen - Wellenwicklung		Achtlagen - Wellenwicklung	
	4S	ungeseht	geseht	ungeseht	geseht	ungeseht	geseht
Anpassbarkeit an veränderte Leistungsparameter	$z_n$ = ganzzahlige Vielfache von 2	$z_n$ = ganzzahlige Vielfache von 4; Strangwindungszahl $w$ von 12 aber umsetzbar		$z_n$ = ganzzahlige Vielfache von 2; Strangwindungszahl $w$ von aber 12 umsetzbar			
	0	-	-	0	0	0	0
Wicklungs-faktor und Oberwellengehalt	Sehnung Grundwelle: 0,933 3. Oberwelle: 0,5 5. & 7. Oberwelle: 0,067	keine Sehnung, Grundwelle: 0,966 3. Oberwelle: 0,707 5. & 7. Oberwelle: 0,259	Sehnung Grundwelle: 0,933 3. Oberwelle: 0,5 5. & 7. Oberwelle: 0,067	keine Sehnung, Grundwelle: 0,966 3. Oberwelle: 0,707 5. & 7. Oberwelle: 0,259	Sehnung Grundwelle: 0,933 3. Oberwelle: 0,5 5. & 7. Oberwelle: 0,067	keine Sehnung, Grundwelle: 0,966 3. Oberwelle: 0,707 5. & 7. Oberwelle: 0,259	Sehnung Grundwelle: 0,933 3. Oberwelle: 0,5 5. & 7. Oberwelle: 0,067
	+	-	+	-	+	-	+
Kupferfüll-faktor	62,36%, Windungshöhen: 10,24 mm nur Windung; 11,19 mm mit Isolierung und Montageluft	62,36%, Windungshöhen: 10,24 mm nur Windung; 11,04 mm mit Isolierung und Montageluft	62,36%, Windungshöhen: 10,24 mm nur Windung; 11,19 mm mit Isolierung und Montageluft	62,36%, Windungshöhen: 10,24 mm nur Windung; 11,04 mm mit Isolierung und Montageluft	62,36%, Windungshöhen: 10,24 mm nur Windung; 11,49 mm mit Isolierung und Montageluft	KFF nicht bewertbar, Windungshöhen: 11,04 mm nur Windung; 12,24 mm mit Isolierung und Montageluft	KFF nicht bewertbar, Windungshöhen: 11,04 mm nur Windung; 13,29 mm mit Isolierung und Montageluft
	+	+	+	+	+	-	-
Wickelkopf-höhen	Wickelkopf: 33,5 mm Wickelfuß: 34,5 mm	Wickelkopf: 35,1 mm Wickelfuß: 34,5 mm	Wickelkopf: 33,5 mm Wickelfuß: 34,5 mm	Wickelkopf: 29,6 mm Wickelfuß: 36,0 mm	Wickelkopf: 27 mm Wickelfuß: 41 mm	Wickelkopf: 26,8 mm Wickelfuß: 36,6 mm	Wickelkopf: 24,8 mm Wickelfuß: 41 mm
	0	0	0	0	0	0	0
Stromverdrängungs-verluste	Leiter unterschiedlicher Phase in einer Nut; Abfolge: AABB	nur Leiter gleicher Phase in einer Nut	Leiter unterschiedlicher Phase in einer Nut; Abfolge: AABB	nur Leiter gleicher Phase in einer Nut	Leiter unterschiedlicher Phase in einer Nut; Abfolge: ABAB	nur Leiter gleicher Phase in einer Nut	Leiter unterschiedlicher Phase in einer Nut; Abfolge: ABABA...
	0	-	0	-	+	-	+



Stromverdrängungsverluste	Leiter unterschiedlicher Phase in einer Nut; Abfolge: AABB	nur Leiter gleicher Phase in einer Nut; Abfolge: Phase in einer Nut	Leiter unterschiedlicher Phase in einer Nut; Abfolge: AABB	nur Leiter gleicher Phase in einer Nut; Abfolge: Phase in einer Nut	Leiter unterschiedlicher Phase in einer Nut; Abfolge: ABAB	nur Leiter gleicher Phase in einer Nut; Abfolge: Phase in einer Nut	Leiter unterschiedlicher Phase in einer Nut; Abfolge: ABABA...
	0	-	0	-	+	-	+
Hairpinherstellung	Anzahl unterschiedlicher Hairpins: 6	Anzahl unterschiedlicher Hairpins: 2	Anzahl unterschiedlicher Hairpins: 2	Anzahl unterschiedlicher Hairpins: 2	Anzahl unterschiedlicher Hairpins: 2	Anzahl unterschiedlicher Hairpins: 4	Anzahl unterschiedlicher Hairpins: 4
	0	+	+	+	+	0	0
Montageaufwand	Anzahl Ebenen: 2; verschiedene Hairpins je Ebene	Anzahl Ebenen: 2; gleiche Hairpins je Ebene	Anzahl Ebenen: 2; gleiche Hairpins je Ebene	Anzahl Ebenen: 2; gleiche Hairpins je Ebene	Anzahl Ebenen: 2; gleiche Hairpins je Ebene	Anzahl Ebenen: 4; gleiche Hairpins je Ebene	Anzahl Ebenen: 4; gleiche Hairpins je Ebene
	0	+	+	+	+	-	-
Twist-aufwand	dicke Drähte; 144 Drähte zu twisten	dicke Drähte; 144 Drähte zu twisten	dicke Drähte; 144 Drähte zu twisten	dicke Drähte; 144 Drähte zu twisten	dicke Drähte; 144 Drähte zu twisten	dünne Drähte, 288 Drähte zu twisten	dünne Drähte, 288 Drähte zu twisten
	+	+	+	+	+	-	-
Kontaktieraufwand	6 Phasenanschlüsse, 6 Sternverbindungen; 6 Übergänge von Ebene 1 in 2; 60 normale Kontaktstellen	6 Phasenanschlüsse, 6 Sternverbindungen; 6 unregelmäßige Kontaktstellen; 60 normale Kontaktstellen	6 Phasenanschlüsse, 6 Sternverbindungen; 6 unregelmäßige Kontaktstellen; 36 normale Kontaktstellen	6 Phasenanschlüsse, 6 Sternverbindungen; 6 unregelmäßige Kontaktstellen; 36 normale Kontaktstellen	6 Phasenanschlüsse, 6 Sternverbindungen; 6 unregelmäßige Kontaktstellen; 36 normale Kontaktstellen	12 Phasenanschlüsse, 12 Sternverbindungen; 60 unregelmäßige Kontaktstellen; 72 normale Kontaktstellen	12 Phasenanschlüsse, 12 Sternverbindungen; 60 unregelmäßige Kontaktstellen; 72 normale Kontaktstellen
	0	0	0	-	-	-	-
Isolieraufwand in der Nut	Leiter unterschiedlicher Phase in einer Nut; Abfolge: AABB	nur Leiter gleicher Phase in einer Nut; Abfolge: Phase in einer Nut	Leiter unterschiedlicher Phase in einer Nut; Abfolge: AABB	nur Leiter gleicher Phase in einer Nut; Abfolge: Phase in einer Nut	Leiter unterschiedlicher Phase in einer Nut; Abfolge: ABAB	nur Leiter gleicher Phase in einer Nut; Abfolge: Phase in einer Nut	Leiter unterschiedlicher Phase in einer Nut; Abfolge: ABABA...
	0	+	0	+	-	+	-
Gesamtpunktzahl	13	12	14	12	14	5	7

Anders als der Biege- und Montagevorgang der Formspulen, wird die technologische Komplexität des Kontaktierungsprozesses durch Variationen des Wickelschemas nicht maßgeblich beeinflusst. Dies setzt voraus, dass die Fügestellen durch den Laser erreicht werden können und keine Verschattungen vorliegen. Als relevant zu nennen ist hingegen die Anzahl der zu realisierenden Kontaktstellen (Standard- und Sonderschweißungen), da diese die Taktzeiten der Schweißstation stark beeinflussen.

Abk.	Beschreibung	H:B	Kupferfüllfaktor	Hair Pin Varianten			Biege-seite		Standard-schweißungen		Sonder-schweißungen
				Gesamtanzahl Pins	Pin Varianten, mit Schneidprozess	Pin Varianten, ohne Schneidprozess	Ebenenübergreifende Verbindung (Biege-seite)	Innentliegende Pins in Biege-seite			
2-1s	konstanter Pitch auf Biege-seite	1,14	76,0%	36	1	9	0	0	24		24
2-4s	konstanter Pitch auf Twist-seite	1,14	76,0%	36	3	6	0	6	30		12
4-1s	Referenzmaschine, 4-1s	0,5244444	69,9%	72	2	18	0	0	48		48
4-4s	Referenzmaschine, 4-4s	0,5244444	69,9%	72	6	12	0	12	60		24
4-5s	4 Lagen Schleifen-Wellenwicklung	0,5244444	69,9%	72	2	8	36	0	60		24
4-6s	4 Lagen Spiralwicklung	0,5244444	69,9%	72	2	6	0	0	36		42
4-4-2	Pins radial montieren, offene Nut	0,5244444	69,9%	72			0	12			
6-1s	konstanter Pitch auf Biege-seite mit Ebenenwechsel	0,32	64,0%	108	3	36	0	0	54		108
6-2s	konstanter Pitch auf Biege-seite ohne Ebenenwechsel	0,32	64,0%	108	3	27	0	0	72		72
6-3s	konstanter Pitch auf Twist-seite ohne Ebenenwechsel	0,32	64,0%	108	9	18	0	18	90		36
6-4s	konstanter Pitch auf Twist-seite mit Ebenenwechsel	0,32	64,0%	108	9	33	0	18	72		72
6-5s	Schleifenwicklung mit Kompensation über Polpaare	0,32	64,0%	108	12	12	0	81	27		162
8-1s	8 Leiter	0,2183333	58,2%	144	4	20	0	0	96		96
8-2s	8 Lagen Spiralwicklung	0,2183333	58,2%	144	4	12	0	0	72		84
8-3s	Alternative 8 Leiter	0,2183333	58,2%	144	4	20	0	0	96		96

Abbildung 5: Morphologischer Kasten Wickelschemata

Die Bewertung des Einflusses fertigungsbedingter Abweichungen auf die Produkteigenschaften erfolgte zusammen mit dem Projektpartner der Universität der Bundeswehr München. Dazu wurde eine Simulation, mit deren Hilfe die Verlustleistung sowie der Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Betriebspunktes bestimmt werden kann so erweitert, dass vornehmlich im Wickelkopf auftretenden Veränderungen von Widerständen berücksichtigt werden können. Vor diesem Hintergrund konnte der Einfluss der Biegung der Formspulen sowie deren Kontaktierung auf das Verhalten der elektrischen Maschine gespiegelt werden. In Experimenten

wurden für die Wicklung der Referenzmaschine erzielbare Widerstände in Kontaktstellen sowie Biegungen erfasst und die zu erwartende Streuung berechnet. Auf diese Weise wurden zwei Szenarien, eines mit einer geringen fertigungsbedingten Widerstandserhöhung, eines mit einer hohen fertigungsbedingten Widerstandserhöhung abgeleitet und die zugehörigen Wirkungsgrade ermittelt. Im Ergebnis zeigte sich, dass der Bereich in dem ein Wirkungsgrad über 95 % erzielt wird bei dem Szenario mit der hohen Fertigungsqualität geringfügig größer ausfällt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die ermittelten Szenarien nur die Streuung der idealen im Prozess ermittelten Referenzprozesse berücksichtigen und keine Fertigungsfehler abbilden. [16]

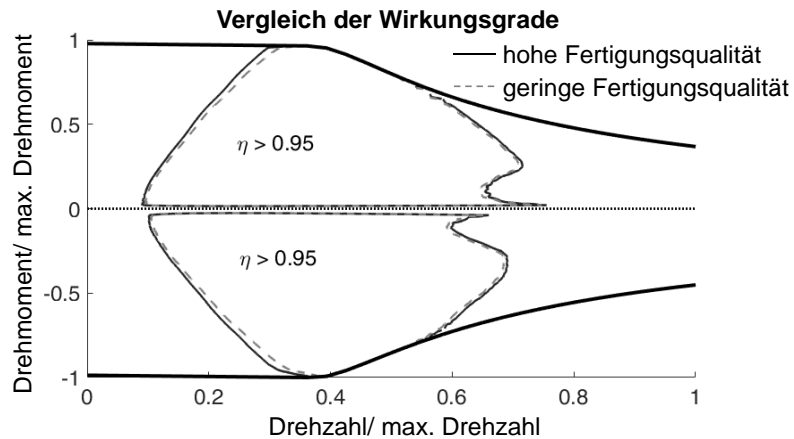


Abbildung 6: Einfluss von Fertigungsschwankungen auf den Wirkungsgrad [16]



## 2.2 Prozessketten zur Herstellung von Statoren mit offener Formspulenwicklung

Für die Herstellung von Statoren mit offener Formspulenwicklung erfolgte die Konzeption einer geeigneten Prozesskette, auf deren Grundlage weitere Analyse durchgeführt wurden. Zu diesem Zweck wurden die notwendigen Herstellungsschritte gesammelt und diese unter Berücksichtigung geeigneter Technologien zu der Fertigungskette angeordnet, die in Abbildung 7 dargestellt wird.



Abbildung 7: Fertigungsablauf konzipiertes Produktionssystem

Für Prozessschritte, die durch unterschiedliche Technologien abgebildet werden können, erfolgte eine Bewertung und Priorisierung der technologischen Alternativen. Hierbei wurden neben theoretischen Überlegungen auch Erkenntnisse aus den Untersuchungen zum Biegen, Montieren und Kontaktieren von Hairpinwicklungen herangezogen. Die wesentlichen identifizierten technologischen Alternativen inklusive der resultierenden Bewertung zeigt Tabelle 4. Dabei sind die Technologien, die im weiteren Vorgehen berücksichtigt wurden, fett dargestellt.

Tabelle 4: Bewertung technologischer Alternativen zur Herstellung von Statoren mit offener Formspulenwicklung

Prozessschritt	Technologien & Priorisierung			
Drahtenden Abisolieren	<b>Beschneiden</b>	<b>1</b>	Laserabtrag	1
	Schälen	2	induktive Erwärmung	3
	Bürsten	2	Trockeneisstrahlen	3
Fase herstellen und trennen	<b>Scherschneiden</b>	<b>1</b>	Sägen	3
	Kerben & Brechen	3		
Hairpins biegen	3-Rollen-Biegen	2	2D-Dornbiegen	2
	NC-Freiformbiegen	2	<b>Gesenkbiegen</b>	<b>1</b>
	<b>2D-Schenkelbiegen</b>	<b>1</b>		
Hairpins kontaktieren	<b>Laserstrahlschweißen</b>	<b>1</b>	Ultraschallschweißen	2
	Widerstandshartlöten	3	WIG-Schweißen	2

Priorisierung: 1: hoch 3: niedrig; Fett: ausgewählte Technologie

Die konzipierte Prozesskette wurde für das im Projektkonsortium festgelegte Referenzwickelschema in eine Ablaufsimulation in Tecnomatix Plant Simulation überführt. Das Wickelschema

war durch 72 Hairpins in 6 Varianten charakterisiert. Die Simulation wurde parametrisierbar aufgebaut, sodass insbesondere Prozesszeiten, Ausschussquoten, Verfügbarkeiten, etc. einfach anpassbar waren. Das Modell diente insbesondere dazu die komplexen Abhängigkeiten der Stationen voneinander abschätzen zu können und somit gesamtheitliche Optimierungen zu realisieren. Das Grundmodell wird in Abbildung 8 dargestellt.

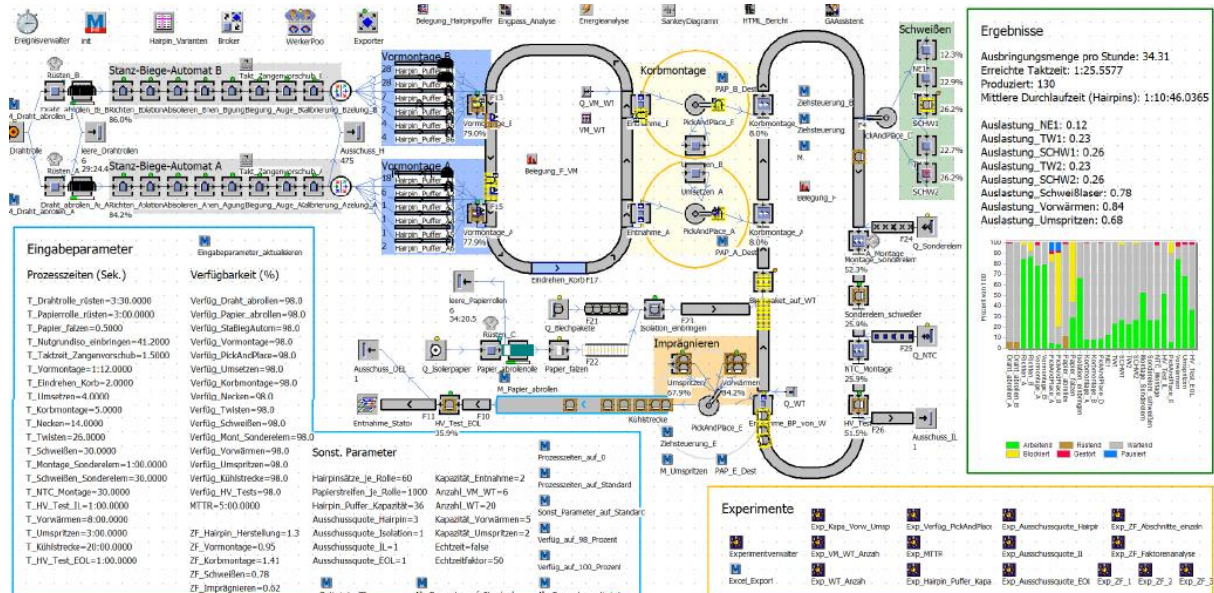


Abbildung 8: Ausgangsmodell Ablaufsimulation Fertigungskette

Unter Zuhilfenahme des Ausgangsmodells wurden die von den Stationen im Mittel erzielbaren Taktzeiten simulativ ermittelt und optimiert. Im Anschluss erfolgte die Übertragung der Erkenntnisse auf 3 im Konsortium definierte Stückzahl Szenarien die im Anschluss weiter optimiert und validiert wurden. Dabei handelt es sich um Ausbringungsmengen von 60, 120 sowie 240 Statoren je Stunde. In einem Abgleich wurde ermittelt welche Kapazitäten für die einzelnen Prozessschritte vorgehalten werden müssen. Im Anschluss wurden die resultierenden Prozessketten für die 3 Stückzahl Szenarien in gesonderte Simulationen überführt, um diese zu optimieren und validieren. Die zusammengefasste Vorgehensweise sowie das Ergebnis der Kapazitätsermittlung für die einzelnen Prozessschritte wird in Abbildung 9 gezeigt. Dabei erfolgt eine Zusammenfassung von Prozessschritten entsprechend der im Simulationsmodell festgelegten Anlagenbereiche.

Grundmodell	Kapazitätsabschätzung	Kapazitätsabgleich	stückzahlspezifische Modelle		
Vorgaben (Taktzeit, Rüstzeit, MTTR, Verfügbarkeit)	Simulation tatsächliche Ausbringungsmengen	Bestimmung Kapazitäten für Stückzahl Szenarien	Optimierung Validierung		
Station	Ø Takt [s]		Kapazitätsbedarf		
	Vorgabe	Simulation	60 Statoren/h	120 Statoren/h	240 Statoren/h
Hairpinformung	0,7 (Satz: 50,4)	0,71	1	2	4
Vormontage	39,6	57,9	1	2	4
Korbmontage	29,0	50,3	1	2	4
Necken	14,0	29,1	1	2	3
Twisten	26,0	33,7	1	2	3
Schweißen	60,0	66,8	2	3	5
Montage Sonderelemente	60,0	75,1	2	3	6
Schweißen Sonderlemente	30,0	43,9	1	2	4
Montage NTC	30,0	39,5	1	2	5
HV-Test	60,0	63,4	2	3	5
Vorwärmen	240,0	284,0	5	10	19
Imprägnieren	100,0	113,6	2	4	8

Abbildung 9: Ergebnisse des Kapazitätsabgleichs für die Stückzahl Szenarien

Als Ergebnis der Untersuchungen wurde eine vollautomatisierte Prozesskette zur Herstellung von Statoren mit Hairpinwicklung geschaffen und validiert. Diese kann als Orientierungshilfe in frühen Stadien entsprechender Industrialisierungsprojekte herangezogen werden um so die Anlagenplanung zu vereinfachen und somit auch das aus Unsicherheiten resultierende Risiko zu minimieren.

### 2.3 Technologien zum Biegen lackisolierter Flachleiter

Das Wickeln von Runddraht, insbesondere von Lackdraht, welches nach DIN 8586 (2.4.2.3) [25] ein Fügeverfahren ist um einen Wickelkörper mit einem drahtförmigen Körper durch dessen fortlaufende Biegeumformung miteinander zu verbinden, ist in Forschung und Literatur vielseitig beschrieben und untersucht.

Die Verarbeitung von lackisierten Flachdraht zu spulenförmigen Induktivitäten ist hingegen schwach dokumentiert. Zwar lassen sich die Umformverfahren aus DIN 8586 grundsätzlich auch auf das Umformen von Kupferflachmaterial übertragen, allerdings findet sich die Lackisolation nicht berücksichtigt. Um die grundlegenden Effekte des Biegens von lackisierten Flachleitern zu beschreiben wurden die bei der Herstellung von Formspulen relevanten Umformschritte auf ihre Grundformen zurückgeführt um jeweils möglichst abstrahierte Aussagen extrahieren zu können.

Zunächst wurden mit einfachen Versuchen, wie dem zugkraftüberlagerten Schwenkbiegen und dem Rundbiegen, siehe Abbildung 10, erste Verarbeitungseigenschaften und mögliche Umformfehler von Flachleitern erfasst.

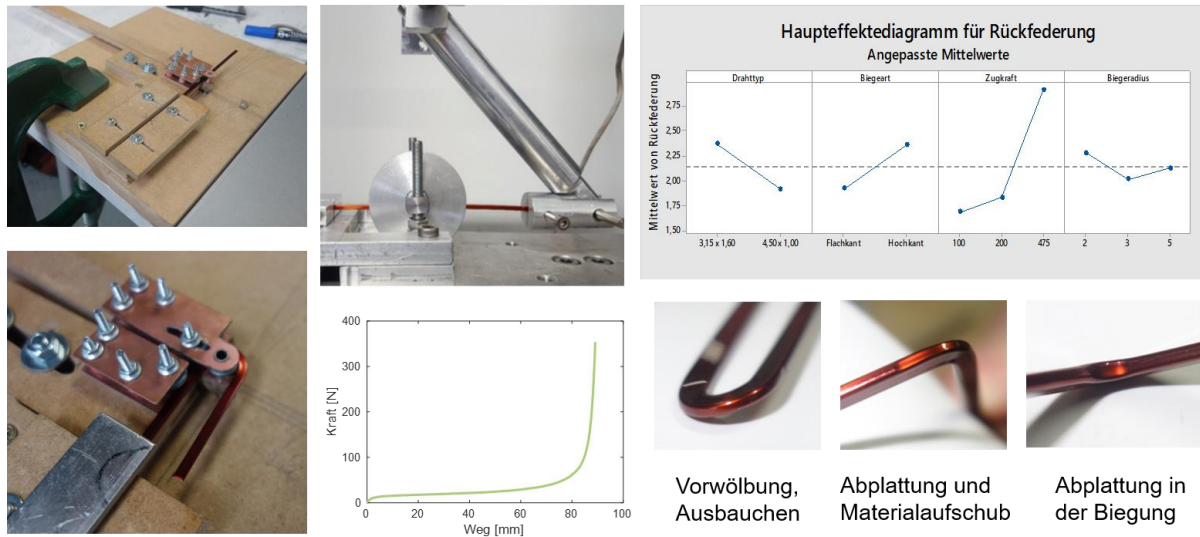


Abbildung 10: Vorrichtungen zum Rundbiegen und zugkraftüberlagerten Schwenkbiegen

Da die Vorrichtungen wertvolle Erkenntnisse erbrachten, jedoch für genauere Betrachtungen nicht prozesssicher genug war und nicht alle Radien aus dem Versuchsplan abgedeckt werden konnten, wurde im Verlauf der Untersuchungen eine überarbeitete Version der Rotationszugsbiegevorrichtung aufgebaut.



Abbildung 11: Überarbeitete Version der Rotationsbiegevorrichtung

Hierbei stellten sich Flachdrähte mit einem Höhe-zu-Breite Verhältnis kleiner als 1:4 als kritisch heraus. Diese ermöglichen kein definiertes Biegen mehr da der Draht im Umformbereich aus der Biegeebene herauskippt.

Die Ergebnisse des zugkraftüberlagerten Biegeversuchs und das Rückfederverhalten bei variierender Leitergeometrie, Biegeart, Zugkraft und Biegeradius fanden Eingang in die ersten Materialkarten für die simulative Betrachtung des Biegeprozesses. In Abstimmung mit dem Konsortium wurde beschlossen die Parameterstudien mittels des in der Norm für Materialuntersuchungen von Metallen DIN EN ISO 7438:2016 beschriebenen Prinzips des Dreipunktbiegeversuches zu optimieren.



Dazu wurde ein Versuchsaufbau konzipiert, die Dreipunktbiegevorrichtung konstruiert und gefertigt. Klassische Versuchsaufbauten für Untersuchungen nach der Norm sind so aufgebaut, dass für jede Geometrie ein eigener Aufbau notwendig ist. Dies wäre jedoch aufgrund der stark variierenden Parameter für den geplanten Versuchsumfang unwirtschaftlich gewesen. Daher wurde eine möglichst variable Vorrichtung, vgl. Abbildung 12, entworfen.

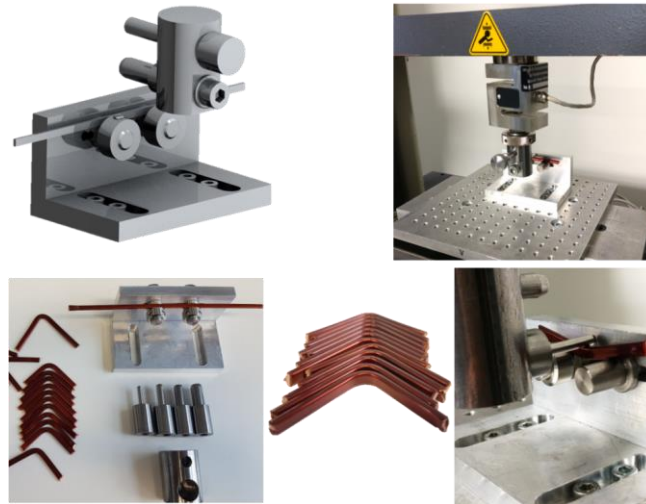


Abbildung 12: CAD-Konstruktion und Aufbau der Dreipunktbiegevorrichtung

Mit der Dreipunktbiegevorrichtung wurden der Versuchsplan, welcher für diese Vorrichtung angepasst worden war, durchgearbeitet. Beispielhaft ergaben sich für den Referenzdraht folgende Verläufe:

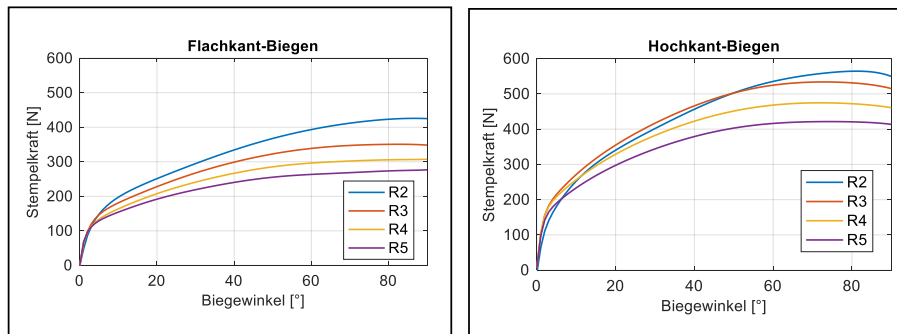


Abbildung 13: Kraftverläufe für den Referenzdraht [31]

Im Verlauf des Berichtjahres konkretisierten sich die Konzepte Konsortialpartner zum Fertigen der Hairpins. Dabei stellte sich heraus, dass Belastungen auf den Draht auftreten, welche über den in der Norm abgedeckten Bereich hinausgeht. Um auch diesen Bereich (etwa Biegungen über 90°) betrachten zu können wurde die Dreipunktbiegevorrichtung weiterentwickelt, neu-konstruiert und aufgebaut. Neben der Erweiterung der untersuchbaren Grenzen konnte die Prozesssicherheit beim Biegen durch eine steifere Auslegung und präzisere Einstellbarkeit erhöht werden.

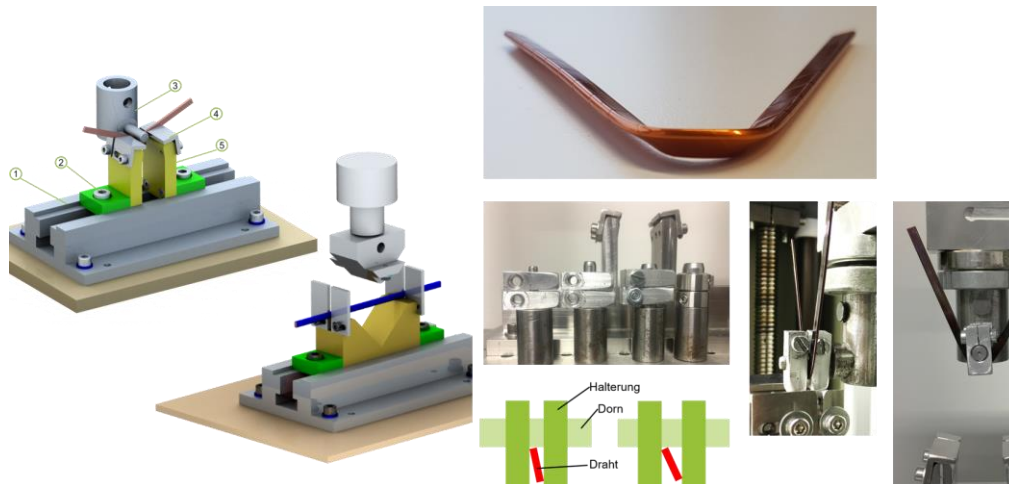


Abbildung 14: Aufbau der überarbeiteten 3-Punkt-Biegevorrichtung

In den im Konsortium vorgestellten Hairpin Formungsverfahren wird zunächst eine 2-dimensionale Form erzeugt, die dann mittels eines Prägegesenkes ihre 3-dimensionale Ausprägung erhält. Um mögliche Schädigungen des Lackdrahtes erfassen zu können wurde ein Gesenk konzipiert und aufgebaut. Bei dem Gesenk ist ein fester Winkel von  $90^\circ$  vorgegeben, die Radien des Stempels können variiert werden. Beispielhaft sind in Abbildung 15 die mechanischen Ergebnisse des Dreipunktbiegeversuches aufgezeigt.

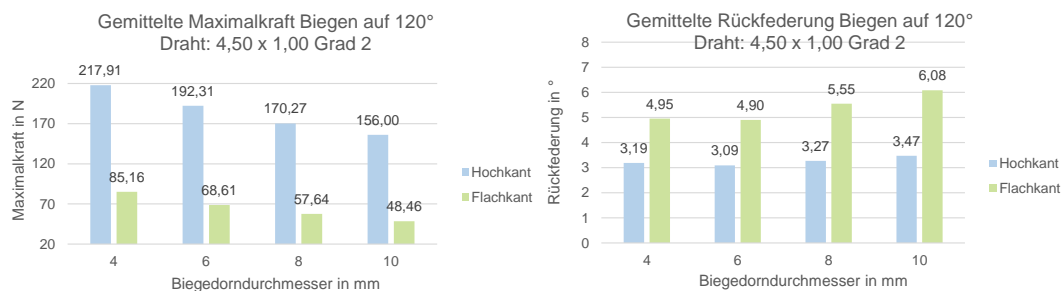


Abbildung 15: Darstellung der notwendigen Kraft und der gemessenen Rückfederung

Neben den Messungen an der Zugprüfmaschine wurden Schliffbilder angefertigt um Änderungen der Isolationsschichtstärke nach dem Biegen zu ermitteln, vgl. Abbildung 16.

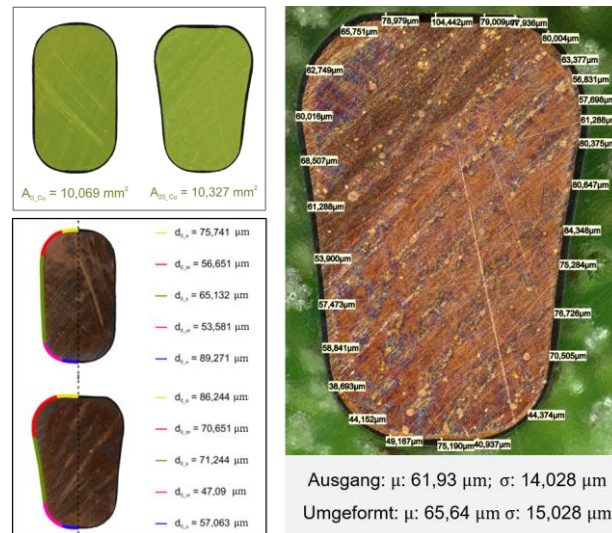


Abbildung 16: Schliffbilder vor und nach dem Gesenkbiegen

Neben der optischen Analyse der Isolationsschicht wurden verschiedene Verfahren und Vorrichtungen entwickelt, aufgebaut und getestet um elektrische Isolationstests durchzuführen. Als zielführend haben sich dabei die in Abbildung 17 dargestellten Prüfungen herausgestellt.

Elektrische Prüfverfahren an Biegeproben	Pin-Hole Test	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elektrolysebad zur Visualisierung von Beschädigungen der Isolationsschicht durch aufsteigende Gasbläschen</li> <li>Kupferdraht als Anode und Aluminiumblech als Kathode</li> <li>Norm: DIN EN 60851-5</li> </ul>	
	Durchschlagsfestigkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eintauchen der gebogenen Kupferdrahtproben in Schrotbad</li> <li>Bis zu 5,5 kV AC-Spannung (60 Hz)</li> <li>Norm: DIN EN 60851-5</li> </ul>	
	TE-Messung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Definiertes Auflegen der gebogenen Kupferdrahtprobe auf Elektrode</li> <li>Anfahren der Spannungskurve und Aufnahme von PDIV und PDEV</li> <li>Bis zu 5,5 kV AC-Spannung (60 Hz)</li> <li>Keine Normung</li> </ul>	

Abbildung 17: Elektrische Prüfungen

Bei Einhaltung des Biegeprozessfensters waren in der Regel keine Schäden der Isolation zu beobachten die direkt zu einem Durchschlag geführt hätten. Allerdings zeigte sich die Teilentladungsmessung als geeignete Methode eine Vorhersage zu der langfristigen Beständigkeit der Isolationsschicht zu treffen. Beispielhaft ist in Abbildung 18 die Höhe des Stromes bei einer Wechselspannung von 5,5 kV im Schrotbad für verschiedene Biegeradien dargestellt. Die Ergebnisse decken sich mit den Aussagen der FEM Simulation.

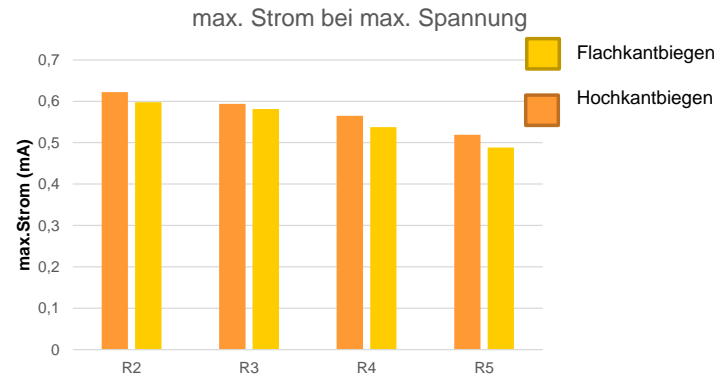


Abbildung 18: Teilentladungs- und reaktive Ströme

Die Parameter-Studien zum Biegen offener Formspulen unter der Anwendung von Flachdrähten wurden durch eine strukturmechanische Umformsimulation begleitet. Die Möglichkeiten zur simulativen Abbildung und die potentiell auswertbaren Ergebnisgrößen wurden anhand eines vereinfachten Simulationsmodells einer Zug-Biegebelastung ermittelt. Die Verschiebungen sowie die Validierung anhand experimenteller und simulativer Kraftverläufe zeigt die folgende Abbildung:

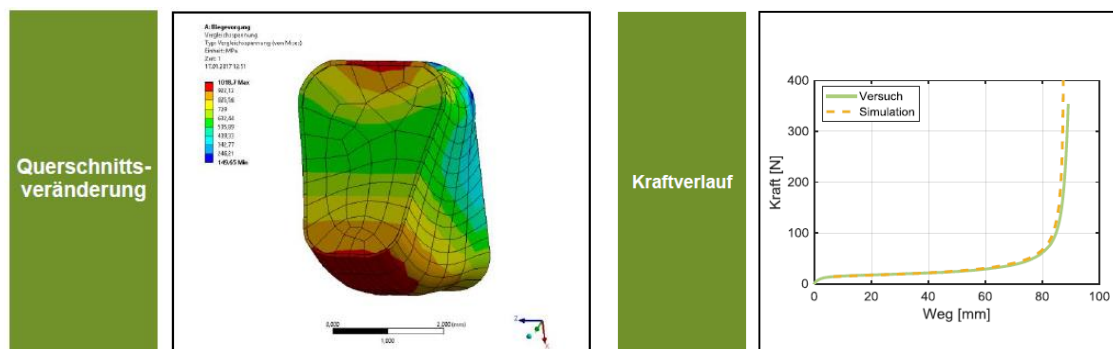


Abbildung 19: Sondierung der strukturmechanischen Umformsimulation eines Flachdrahtes anhand einer Zug-Biegebelastung

Die Belastungssituation beim Umformen von Flachdraht zu einer offenen Formspule konnte in eine Dreipunkt-Biegebelastung und eine Gesenkbiegebelastung unterteilt werden. Die nachfolgende Abbildung visualisiert diese Aufteilung:



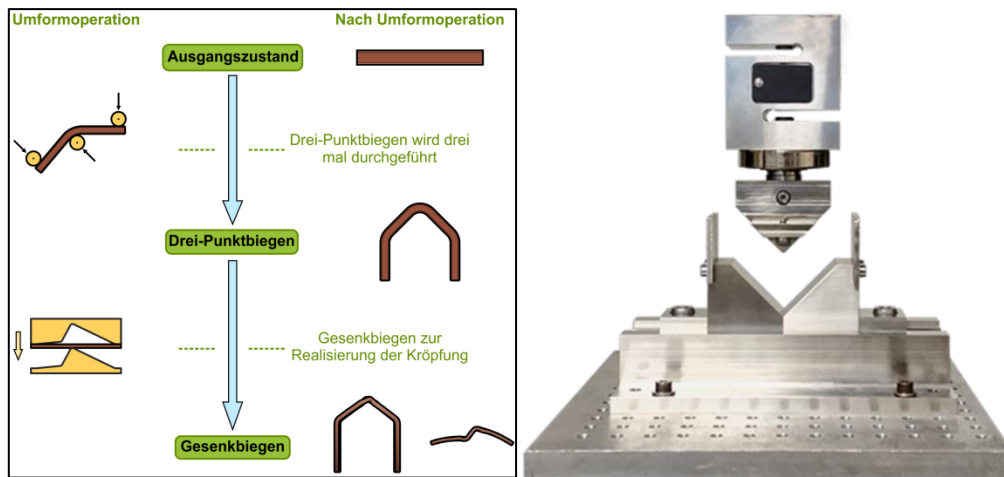


Abbildung 20: Belastungssituationen bei der Fertigung eines Hairpins; Gesenkbiegevorrichtung [29]

Die Validierung der Simulationsergebnisse wurden auf den beschriebenen Versuchsaufbauten durchgeführt.

Basierend auf den Prüfaufbauten erfolgte die Entwicklung zugehöriger strukturmechanischer Simulationsmodelle. Zur Qualifizierung des Halbzeuges „Flachdraht“ wurden Zugversuche unter Berücksichtigung der Querschnittsausdünnung, sowie Abschälversuche der Isolationschicht in Anlehnung an DIN 1464 durchgeführt. Die nachfolgende Abbildung visualisiert den Versuchsaufbau und das korrespondierende Simulationsmodell für die Kalibrierung der Versagensparameter der Kontaktfläche:

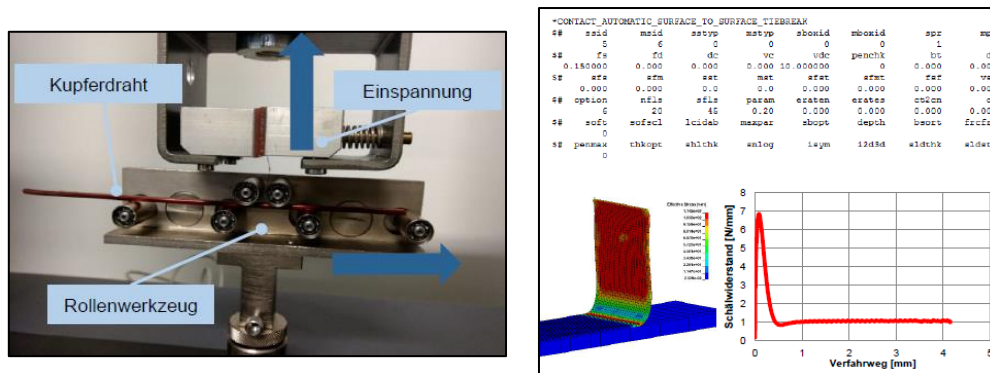


Abbildung 21: Schälwiderstandsprüfung in Anlehnung an DIN 1464

Basierend auf den Simulationsmodellen konnten schließlich Biegekraftverläufe auf Basis der Abmaße des Leiterquerschnitts, des Werkstoffes, sowie Biegeradius und -winkel vorhergesagt werden. Eine Analyse der Verschiebungen im Modell lies weiterhin die Verteilung der Isolationsschichtdicke nach dem Biegeprozess zu. Für den Gesenkbiegeprozess zeigt die folgende Abbildung die Isolationsschichtdickenverteilung im Zeitbereich, sowie nach der Umformung für unterschiedliche Biegewinkel:

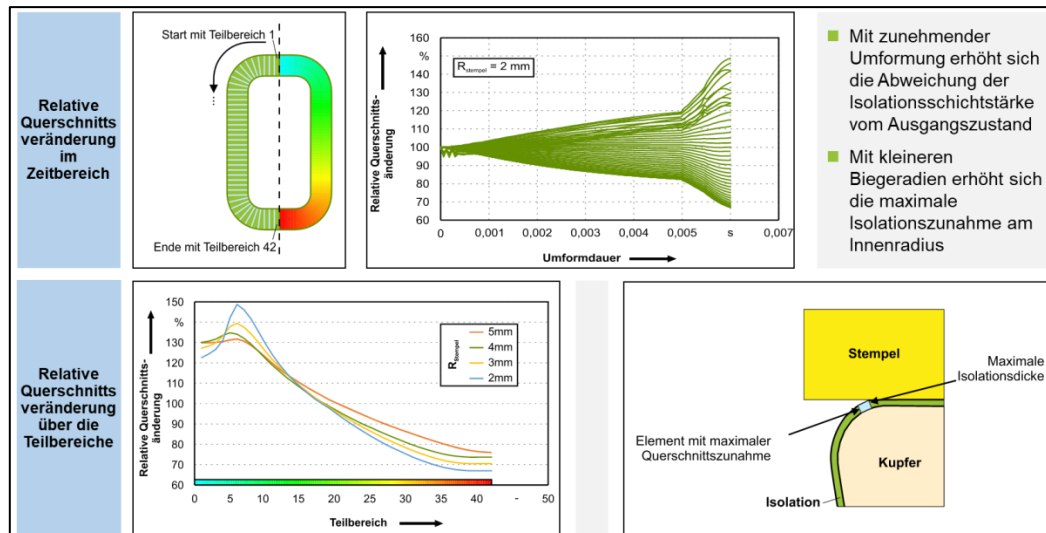


Abbildung 22: Analyse der Isolationsschichtdickenverteilung [29]

Zur Ermittlung des Einflusses von Biegeoperationen auf den Leiterwiderstand wurden Leiterproben jeweils vor und nach dem Biegen vermessen:

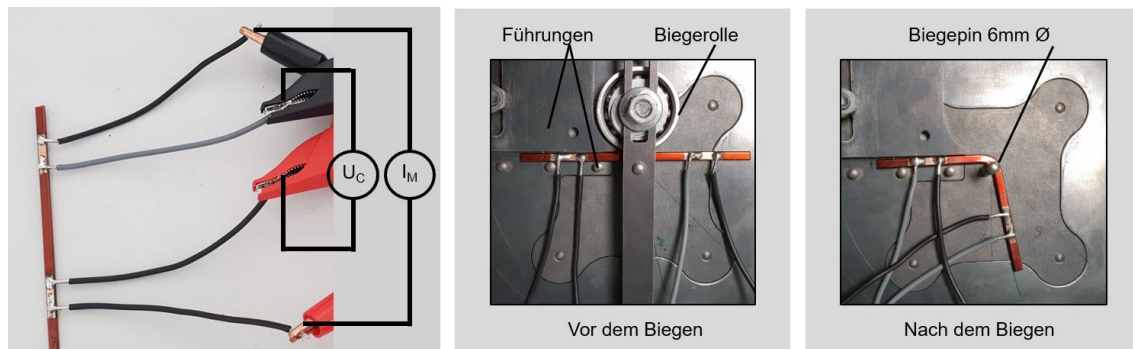


Abbildung 23: Ermittlung des Einflusses von Biegungen auf den Leiterwiderstand [16]

Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse der Messung der Widerstände vor und nach dem Biegen. Die Ergebnisse fließen in die Bewertung der fertigungsbedingten Widerstandsänderungen und deren Einfluss auf die Verlusteigenschaften des Motors ein. Die Ergebnisse wurden ausführlich auf der E|DPC 2019 vorgestellt. [16]

Tabelle 5: Ergebnisse der Widerstandsmessungen von gebogenen Leiterproben

	44° Winkel [ $\mu\Omega$ ]	88° Winkel [ $\mu\Omega$ ]
Durchschnittliche Widerstandserhöhung	0.3226	0.4076
Standardabweichung	0.1178	0.1551
$\pm 3 \sigma$	0.3536	0.4654
Statistisch relevanter Bereich der Änderung	0.00 ... 0.6802	0.00 ... 0.8730

## 2.4 Technologien zur Montage offener Formspulenwicklungen

Das Einbringen der Hairpins in die Nuten des Statorblechpakets ist ein essentieller Prozessschritt in der Fertigungskette für Hairpin-Motoren. Zum einen werden nachfolgende Prozesse wie das Twisten und das Kontaktieren beeinflusst zum anderen besteht die Gefahr, dass die Hairpins bei der Montage beschädigt werden, was zu Ausfällen des Antriebs im Betrieb führen kann. Da die Fertigung von Antrieben hoher Leistungsdichte in Steckwicklungstechnik eine neue Technologie darstellen und damit auch keine Richtlinien zur Beurteilung des Montagevorgangs bestehen, wurden zunächst theoretisch und experimentell mögliche Problemstellungen und Ziele für einen geeigneten Montageprozess ermittelt.

Als mögliche Schädigungen durch den Montageprozess wurden ermittelt:

- Verletzung der Lackisolation der Flachdrähte durch Abschabung bzw. Abrasion am Blechpaket oder Stanzgraten einzelner Bleche
- Verletzung der Lackisolation der bereits in der Nut befindlicher Flachdrähte durch Abschabung bzw. Abrasion beim Einführen von weiteren Flachleitern in die Nut, etwa durch Grate an der Trennstelle des einzuführenden Flachdrahts
- Verschieben des Nutgrundisolationspapiers beim Einbringen der Flachdrähte in die Nut.
- Deformation oder Verbiegen des Flachdrahts beim Einschieben in die Nut
- Verkeilen bzw. Verklemmen des Leiters

Als Ziele für einen automatisierbaren Prozess und hohe Produktqualität wurden erkannt:

- Geringe aber definierte benötigte Kraft beim Einbringen der Hairpins in den Stator
- Einhaltung des Luft- und Kriechstrecken im Wickelkopf und auf der Twist-Seite
- Fügen bzw. Montieren der Hairpins ohne remanente mechanische Spannungen
- Parallelität der Drahtenden auf der Twist-Seite nach der Montage
- Definierte und gleichbleibende Positionierung der Hairpins in axialer Richtung
- Zentrieren und allseitiges Führen der Hairpin-Beine
- Fixierung der Nutgrundisolation
- Offenhalten des Nuteingangs
- Ausgleich und Tolerierung von fertigungsbedingten Formabweichungen

Zur Priorisierung der Maßnahmen zur Schädigungsreduktion wurden zunächst einige Versuche durchgeführt. Dazu wurden aus Backlackelektroblech verschiedene Statorblechpakete aufgebaut. Abbildung 24 zeigt eines der aufgebauten Blechpakete bei dem die einzelnen Bleche minimal gegeneinander verschoben wurden. Dies führte zu sichtbaren Verletzungen der Lackdrahtisolation und Teile des Lacks wurden sogar abgeschält und blieben nach dem Entfernen des Hairpins aus dem Stator zurück. Ähnliche Schädigungen traten bei gut aufgebauten Blechpaketen aber schlecht gerichteten Hairpin-Schenkeln auf. Als besonders Riskant stellten sich Abweichungen der Öffnungsweite, vgl. Abbildung 25, der Hairpins im Bereich des Biegedachs heraus.



Abbildung 24: Blechpaket (ohne Nutisolation) für experimentelle Montageuntersuchungen



Abbildung 25: Öffnungsweite eines Hairpins

Eine richtig eingestellte Öffnungsweite der Hairpins stellte sich auch als die wichtigste Grundlage für einen parallelen Verlauf der Hairpin-Schenkel in axialer Richtung heraus. Die Parallelität ist wiederum entscheidend für einen geraden und korrekten Aufbau der Wicklung auf der Twist-Seite des Stators. Treten auf der Twist-Seite zu grobe Abweichungen von einem parallelen Verlauf auf, werden die Automatisierung des Twistprozesses und das anschließende Kontaktieren erschwert. Die Schnittkante des Flachdrahts darf keinesfalls Grate aufweisen, welche aus dem Profil des Flachdrahtes ragen oder herausgebogen werden können, da sonst benachbarte Lackdrähte beschädigt werden oder das Nutisolationspapier aus der Nut geschoben wird. Eine vierseitige Anfasung der Schnittkante ist nicht zwingend notwendig, hilft aber den Prozess zu stabilisieren, toleranter gegenüber Fehlstellungen zu machen und die Fügekraft herabzusetzen.

Die Geometrie und Anordnung der offenen Halbformspulen verhindert ein sequentielles Montieren der Einzelspulen in den Stator. Die Spulen müssen daher zu einem „Korb“ formiert und anschließend gesammelt in den Stator gefügt werden. Für die Formierung der Einzelspulen kommen grundsätzlich mehrere kinematische Konzepte in Frage.

Abbildung 26 zeigt ein Konzept zur segmentierten Aufnahmen und späterem Zusammenrollen von Hairpins.

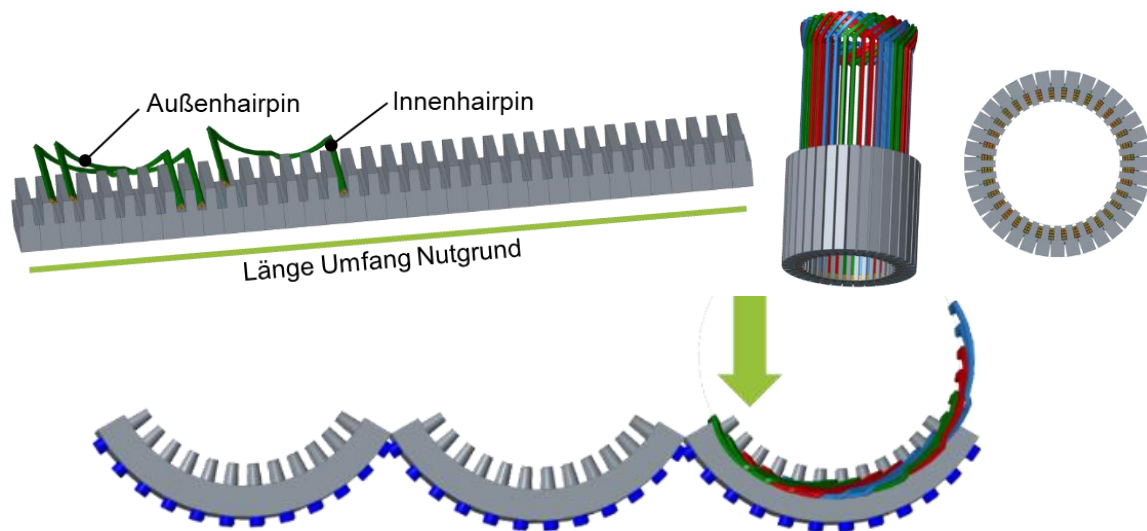


Abbildung 26: Aufbau und beispielhafte Vormontage verschiedene partielle Werkzeuge

Zur Offenlegung potentieller Kollisionsbereiche wurden dynamische Mehrkörpersimulationen herangezogen. Verschiedene Kinematiken konnten somit virtuell auf Ihre Eignung überprüft werden. Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick:

Denkbare Montagekonzepte	<b>Konzept 1: Montagekorb für eine Ebene</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Einzelpins werden auf WZ gesteckt</li> <li>■ Relativbewegung der HZ entsprechend „Korbmontage“</li> <li>■ „Eindrehen“ der HZ zur Korbformation</li> <li>■ Handhabung des Gesamtkorbes und Montage in Stator</li> </ul>	
	<b>Konzept 2: Multiebenen Montagekorb</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Einzelpins werden auf WZ gesteckt</li> <li>■ Synchrones „Eindrehen“ zweier Lageebenen</li> <li>■ Handhabung des Gesamtkorbes bestehend aus zwei Lageebenen und Montage in Stator</li> </ul>	
	<b>Konzept 3: Blumenstrauß</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Einzelpins werden auf WZ gesteckt</li> <li>■ Zusammenführung der „WZ-Spinne“ und direktes Fügen der Pins in angedeuteten Stator</li> </ul>	

Abbildung 27: Kinematiken zur Formierung der Formspulen zu einem Montagekorb

Die Kinematiken weisen individuelle Vor- und Nachteile zur Lösung der Formierungsaufgabe auf. Die nachfolgende Abbildung nimmt eine Bewertung des „multiebenen Montagekorbes“ sowie der „Blumenstrauß“ Anordnung gegenüber des Referenzkonzepts „Montagekorb für eine Ebene“ vor.



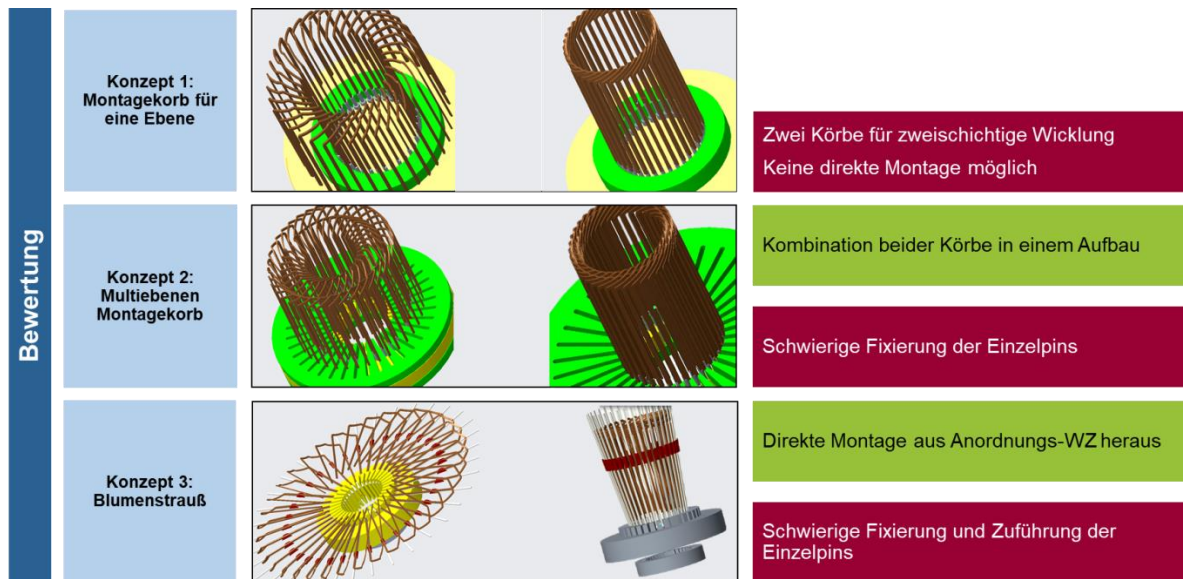


Abbildung 28: Bewertung der Kinematiken zur Formierung der Formspulen zu einem Montagekorb

Die Positionierung der Leiter für den Schweißprozess hängt unmittelbar mit dem Montage- sowie Twistprozess zusammen, da die Positioniertoleranzen in erster Linie in diesen Prozessschritten bestimmt werden. Um Anforderungen an die Montage quantifizieren zu können, wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, in welcher der Einfluss der lateralen Positionsabweichungen in X-, Y- und Z-Richtung auf den Widerstand der Schweißstelle ermittelt wurde. Ziel war es, Richtlinien für die Festlegung von Montagetoleranzen der Hairpins zur Sicherstellung eines nachgelagerten Schweißprozesses abzuleiten.

Aufbauend auf den experimentellen Analysen der Prozessgrenzen bei der Leitermontage und der FEM-Simulation möglicher Montagestrategien sind verschiedene Konzepte zur fertigungsgerechten und serientauglichen Montage von Hairpins entwickelt worden. Für das Erstellen des Wickelkorbes wurden das Eindrehen, siehe Abbildung 29 und Abbildung 30 gewählt.

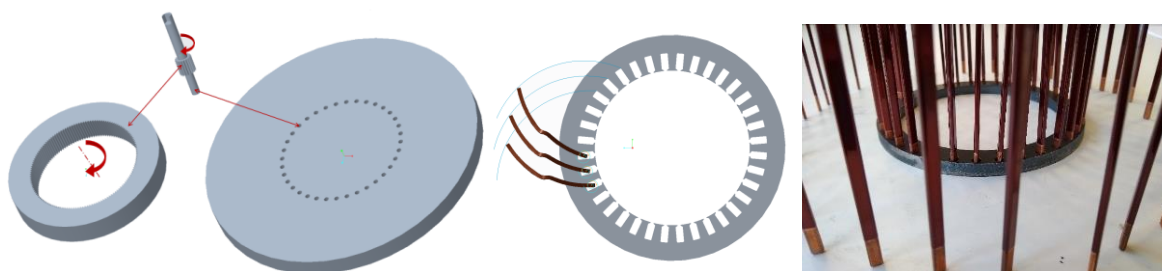


Abbildung 29: Werkzeuge und Bewegungsabläufe bei der einzelnen Wickelkorbzusammenstellung

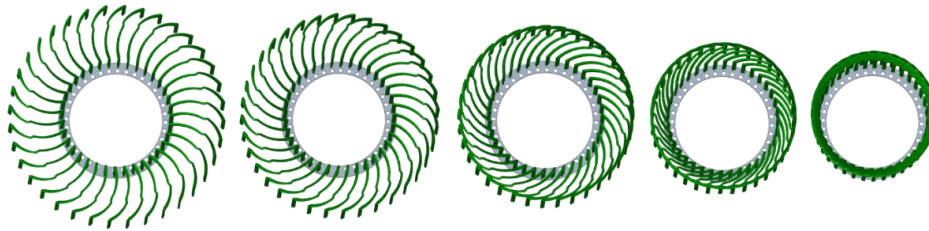


Abbildung 30: Schrittweises Eindrehen in der Eindreh-Vorrichtung

Weitere Herausforderung zeigten sich beim anschließendem Einführen des Wickelkorbes in den Stator. Es stellte sich heraus, dass für ein automatisierbares Fügen das Isolationspapier, welche die Funktion der sekundären Nutgrundisolation erfüllt, an die Zahnflanken angedrückt und fixiert werden muss, damit diese Papiere nicht den Nuteingang blockieren und beim Einführen der Hairpins nicht aus selbiger herausgedrückt werden, siehe Abbildung 31.

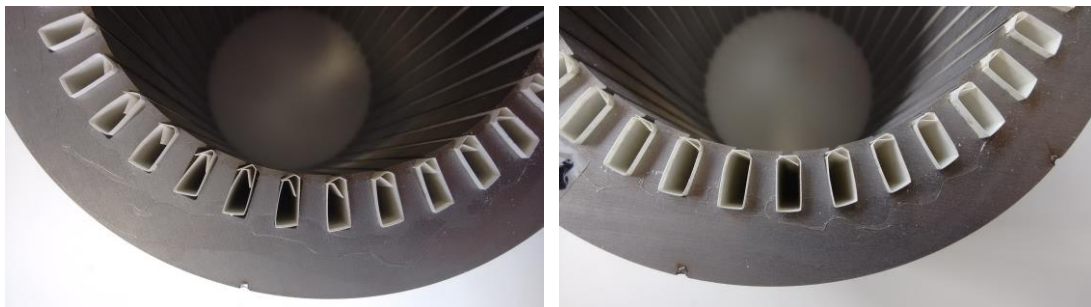


Abbildung 31: Notwendiges Auffalten und Fixieren der Position bei der Isolationspapiermontage

Zur Fixierung des Isolationspapiers, Offenhalten der Nut und das Führen der Hairpin-Beine beim Montieren wurde ein kombiniertes Werkzeug entwickelt. Eine Stiftschablone (Abbildung 32) mit radial geführten Stiften führt und zentriert die Hairpin-Beine über der Nut.

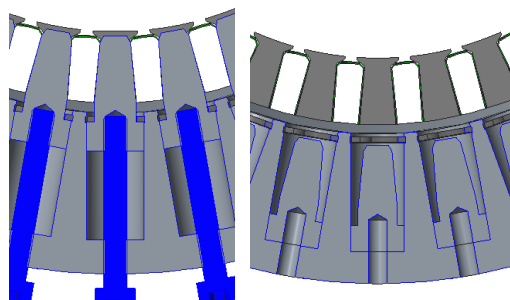


Abbildung 32: Stiftschablone in einer Ausführungsvariante mit Sicherungsring als Anschlag

Aufgrund des über die axiale Projektion des Nutgrunds herausragenden Wickelkopfs eine Stiftschablone mit größerem Durchmesser notwendig, weshalb die Stiftschablone den Flachdraht nur tangential führen kann. Dies macht zusätzliche Justier- bzw. Positionier-Vorrichtungen für eine radiale Führung mittels eines Innenwerkzeuges notwendig. Abbildung 33 gibt einen Überblick über die Teile des Stiftschablonen-Moduls.

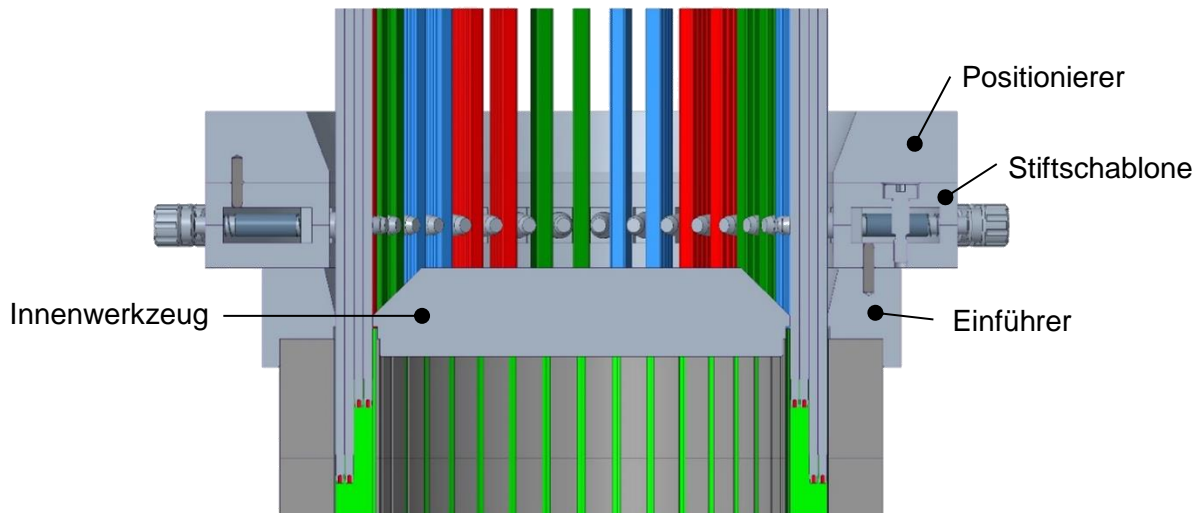


Abbildung 33: Detailkonstruktion und zusätzliche Werkzeuge

Der Einführer und das Innenwerkzeug sitzen passgenau auf dem Stator. Über die Kerbe am Stator wird der Einführer mittels einem Gewindestift fixiert.

Die Stiftschablone ist wiederum über drei Zylinderstifte mit dem Einführer verbunden.

Der Einführer muss sich aufgrund des breiteren Wickelkopfs teilen lassen. Die Ausrichtung der Einzelteile zueinander geschieht ebenso über Zylinderstifte mit Haft- und Spielsitz für eine einfache und passgenaue Montage.

Die beiden Einführer-Teile werden aus dem Grund der notwendigen Anordnung zueinander aus zwei gedrehten Ringen hergestellt, sodass die Flächen ohne Trennschlitz aneinanderpassen.

Falls es bei der Wickelkorbfixierung zu besonders weit nach außenstehenden Hairpins kommt, werden diese durch den Positionierer oben in die Stiftschablone eingeführt, der wieder mit drei Zylinderstiften an der Stiftschablone ausgerichtet ist.

Um die Reibung zwischen den Funktionsflächen des Werkzeugs und des Flachdrahts so gering wie möglich zu halten, sind die Funktionsflächen möglichst klein ausgeführt.

Mit Abbildung 34 wird die Funktionsweise der radialen Führungen verdeutlicht.

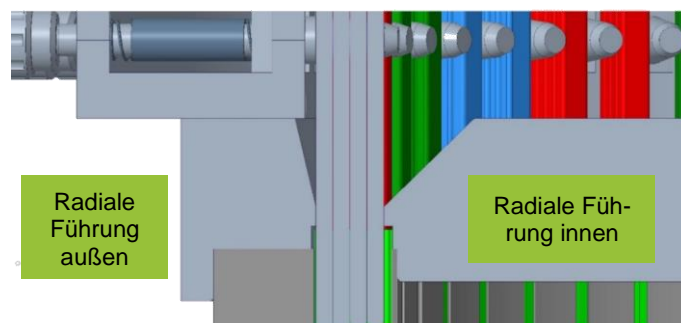


Abbildung 34: Funktionsweise der radialen Führungswerkzeuge

Im weiteren Verlauf dieses Arbeitspaketes wurde das konzipierte Werkzeug auskonstruiert und gefertigt. Abbildung 35 zeigt das Werkzeug, welches für weitere Untersuchungen im Projektverlauf eingesetzt werden konnte.





*Abbildung 35: Gefügter Wickelkorb im Referenzstator vor dem Lösen des Stiftschablonenmoduls*

## **2.5 Technologien zur Kontaktierung flachleiterbasierter Formspulenwicklungen**

Im Prozessschritt der Kontaktierung wird der lackisolierte Kupferdraht der Formspulen im Bereich der Leiterenden mechanisch und elektrisch leitfähig verbunden. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden zunächst Besonderheiten und Herausforderungen für diesen Prozessschritt gesammelt und bewertet. Als wesentliche Aspekte sind die hohe Anzahl zu realisierender Kontaktstellen und die damit einhergehenden Forderungen nach kurzen Takt- und Nebenzeiten sowie einer hohen Prozesssicherheit zu berücksichtigen. Um eine Deformation der Formspulen bzw. eine Beschädigung der Isolation zu vermeiden, ist darüber hinaus die mechanische und thermische Belastung im Prozess zu reduzieren. Da die Kontaktstellen im Wickelkopf angeordnet sind, wurde eine eingeschränkte Zugänglichkeit der Kontaktstellen identifiziert. Darüber hinaus wurde erwartet, dass die Positionierung der Formspulenenden Toleranzen unterliegen. Um eine Beschädigung der Isolation bzw. Verunreinigung der Baugruppe oder Werkzeuge zu vermeiden, wurde festgelegt, dass Schweißspritzer zu vermeiden bzw. reduzieren sind. Da im späteren Betriebe hohe Ströme über die Kontaktstellen fließen ist es darüber hinaus essentiell, einen niedrigen Kontaktwiderstand zu realisieren, was mit einem großen Anbindungsquerschnitt erzielt wird. Um den im Betrieb auftretenden Stößen und Vibrationen Rechnung zu tragen, wurde darüber hinaus eine ausreichende mechanische Dauerfestigkeit als wesentlich festgelegt. Die identifizierten Aspekte sind in Abbildung 36 zusammengefasst. [17]

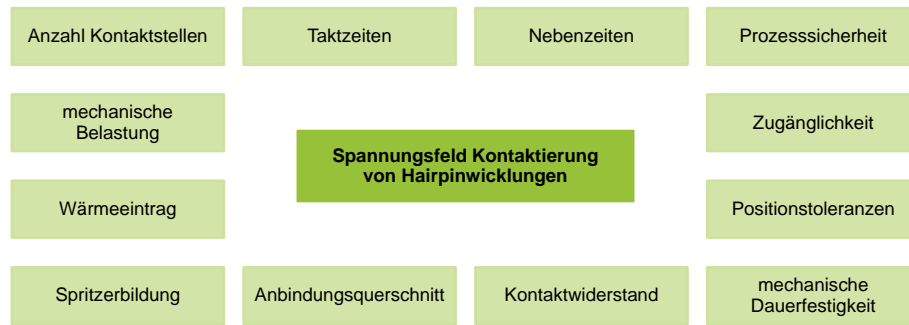


Abbildung 36: Bei der Kontaktierung von Hairpinwicklungen zu berücksichtigende Aspekte [17]

Vor diesem Hintergrund erfolgte eine allgemeingültige Bewertung verfügbarer Kontaktierungstechnologien, auf deren Grundlage sich zeigte, dass das Laserstrahlschweißen große Potentiale zur Realisierung dieses Prozessschrittes aufweist. Dies wird damit begründet, dass das Laserstrahlschweißen ohne die Positionierung von Werkzeugen an der Kontaktstelle auskommt und somit das beengte Raumangebot zu vernachlässigen ist. Außerdem weist es hohe Prozessgeschwindigkeiten auf und grundlegend sind in dieser Technologie hohe Prozesssicherheiten realisierbar. Die Ergebnisse der Bewertung der verfügbaren Kontaktierungstechnologien fasst Tabelle 6 zusammen. [17]

Tabelle 6: Bewertung verfügbarer Kontaktierungstechnologien [17]

Technologie	Anwendung	Status	Automatisierbarkeit	Flexibilität	Werkzeugverschleiß	Prozesssicherheit	Zugänglichkeit	Taktzeit
Widerstandsschweißen	Verbindung Einzelleiter mit Anschlusselement	etabliert	+	o	--	o	o	+
Laserschweißen	Verbindung entlackte Einzelleiter untereinander/ mit Anschlusselement	gegenwärtige Innovation	++	+	++	++	++	++
Ultraschallschweißen	Verbindung Einzelleiter untereinander/ mit Anschlusselement	etabliert	+	o	+	+	-	++
Crimpen	Verbindung entlackte Leiterbündel mit Anschlusselement (z.B. Hülse)	etabliert	++	-	+	+	o	++
Heißcrimpen	Verbindung Leiterbündel mit Anschlusselement (z.B. Hülse)	etabliert	+	+	--	o	-	o
Ultraschallcrimpen	Verbindung Leiterbündel mit Anschlusselement (z.B. Hülse)	gegenwärtige Innovation	+	+	+	+	-	o
Ultraschallkompaktieren	Verbindung Leiterbündel ohne Verbindungselement	gegenwärtige Innovation	++	o	+	+	--	++
Löten (hart/weich)	Verbindung entlackte Einzelleiter & Leiterbündel untereinander/ mit Anschlussgeometrie	etabliert	--	++	++	-	++	o
Schneidklemmen	Verbindung Einzelleiter mit Schneidklemme	etabliert	+	+	++	o	+	++

Zum Laserstrahlschweißen sind eine Vielzahl an Strahlquellen unterschiedlicher Wellenlängen und Leistungsklassen verfügbar. Die im Projekt durchgeführte Identifikation einer geeigneten Lasertechnologie kam zu dem Ergebnis, dass sich in erster Linie leistungsfähige Laser im Wellenlängenbereich von 1000 nm mit einer hohen Strahlqualität für diese Anwendung eignen. Allerdings wurde dabei der niedrige Absorptionsgrad im einstelligen Prozentbereich als nachteilig bewertet. Dieser Nachteil kann durch den Einsatz von Lasern im Wellenlängenbereich von 500 nm ausgeglichen werden, die einen signifikant höheren Absorptionskoeffizienten aufweisen. Diese waren zum Zeitpunkt der Projektdurchführung allerdings nur mit niedrigen Laserleistungen verfügbar, sodass die erzielbaren Einschweißtiefen limitiert waren, weswegen deren Einsatz zu diesem Zeitpunkt ausschied [18]. [19]

Als wesentliche Voraussetzung zum erfolgreichen Laserstrahlschweißen von Formspulenumwicklungen wurde eine rückstandslose Entfernung der Lackisolation in den zu fügenden Leiterbereichen identifiziert da erwartet wurde, dass die beim starken Erhitzen der Isolation auftretenden Verbrennungsgase starke Schmelzeauswürfe hervorrufen. Vor diesem Hintergrund wurden Technologien zum Lackabtrag in Experimenten gegenübergestellt. Um die Abtragsqualität quantifizieren zu können wurde identifiziert, dass eine Fluoreszenzmessung die Erfassung organischer Rückstände und somit von Isolationsresten grundlegend eignet. Diese wurde für den vorliegenden Anwendungsfall validiert, indem experimentell ein Zusammenhang zwischen Isolationsschichtstärke  $t$  und der gemessenen Fluoreszenzintensität  $I_F$  hergestellt wurde. Dazu wurden in einem chemischen Abtragverfahren Musterteile mit variierenden Isolationsschichtstärken hergestellt, in der Fluoreszenzmessung analysiert und anschließend in Schliffbildern die zugehörige Schichtstärke messtechnisch erfasst. Im Ergebnis wurde ein linearer Zusammenhang belegt, wodurch das Messmittel als geeignet zur Erfassung von Isolationsrückständen bewertet wurde. Den Versuchsaufbau sowie die ermittelten Messpunkte und zugehörige Ausgleichsgerade zeigt Abbildung 37. [20]

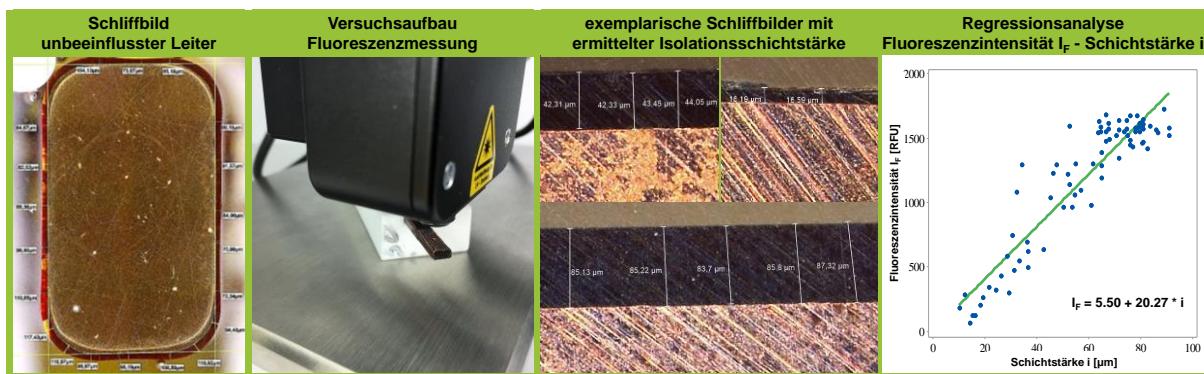


Abbildung 37: Qualifizierung der Fluoreszenzmessung zur messtechnischen Erfassung von Isolationsrückständen [20]

Um die Eignung der Abtragstechnologien des Bürstspanens und laserbasierten Abtrags zu evaluieren, wurden diese in Parameterstudien adressiert. Für das Bürstspanen wurden neben der Drehzahleinstellung  $n$  der Bürstenabstand  $d$  sowie die Bearbeitungszeit  $t$  variiert. Die Auswertung in Abbildung 38 zeigt, dass unabhängig von den Einstellungen mittlere Fluoreszenzintensitäten  $I_F$  im Bereich von 15 RFU bis 20 RFU auftreten. Zusätzlich fiel eine starke Streuung der Messwerte über alle Faktoreinstellungen hinweg auf. Wegen der Isolationsrückstände und

schlechten Reproduzierbarkeit wurde das Verfahren im vorliegenden Forschungsprojekt als negativ bewertet und nicht weiterverfolgt. [20]

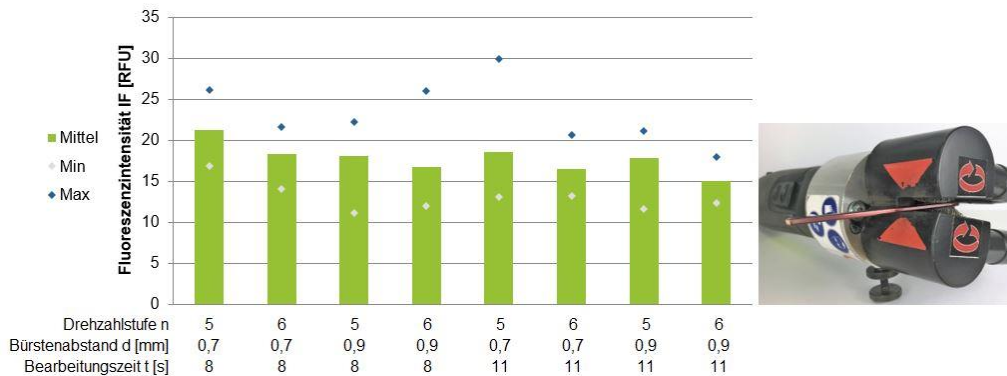


Abbildung 38: Parameterstudie Isolationsabtrag Bürstspanen [20]

Zum laserbasierten Abtrag kam ein gepulst betriebener Infraroter Laser zum Einsatz. Dieser wurde mit einer Pulsdauer von 0,3 ms und einer Repetitionsrate von 1000 Hz betrieben, während mittels einer programmierbaren Fokussieroptik die Leiteroberfläche rasterförmig abgefahren wurde. In den Parameterstudien erfolgte eine Variation der Laserleistung  $P$ , der Vorschubgeschwindigkeit  $f$  sowie des Geometrieabstands  $s$ . Die Auswertung in Abbildung 39 zeigt, dass in Abhängigkeit der Parameterkombination niedrige mittlere Fluoreszenzintensitäten und somit geringe Isolationsrückstände erreicht wurden. Dabei waren insbesondere auch die geringen Streuungen innerhalb der betreffenden Parameterkombinationen hervorzuheben. Vor diesem Hintergrund wurde der laserbasierte Abtrag des Isolationslacks als zielführende Technologie eingestuft. [20]

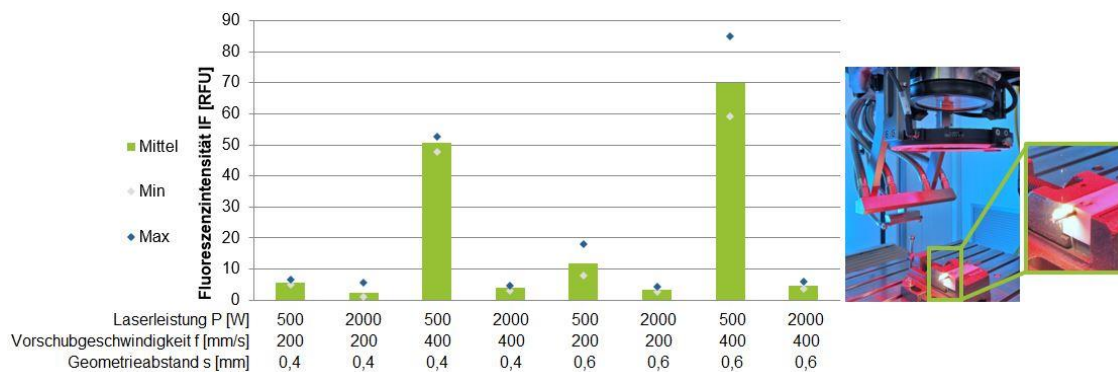


Abbildung 39: Parameterstudien Isolationsabtrag Laserabtragen [20]

Wie in Abbildung 36 aufgeführt wurden beim Fügen offener Formspulenwicklungen die elektrischen Eigenschaften der Kontaktstelle als ausschlaggebend identifiziert. Niedrige Kontaktstellenwiderständen sollten dabei durch hohe Anbindungsquerschnitte erzielt werden, wobei insbesondere auch Poren in der Kontaktstelle zu vermeiden sind [21]. Um die elektrischen Eigenschaften der Kontaktstelle erfassen zu können, wurde eine in Vierleitermessung ausgeführte Widerstandsmessung realisiert, der auch die Temperatur der Probekörper während der Messung erfasst, um temperaturbedingte Schwankungen der Widerstände kompensieren zu können. Da neben dem Spannungsabfall  $U_K$  über die Kontaktstelle auch der Spannungsabfall am unbeeinflussten Leiter  $U_L$  erfasst wird, können die elektrischen Kontaktstelleneigenschaften

mit denen des unbeeinflussten Leiters verglichen werden. Zur Validierung des Zusammenhangs zwischen der Einschweißtiefe  $t$  und dem gemessenen Widerstand über die Kontaktstelle  $R_K$  wurden Muster mit schwankenden Einschweißiefen  $t$  hergestellt, deren Widerstand  $R_K$  erfasst und mit der in Schliffbildern gemessenen Einschweißtiefe  $t$  gegenübergestellt. Es zeigte sich, dass zwischen den beiden Größen ein sehr guter linearer Zusammenhang mit einem Regressionskoeffizienten  $r$  von ca. -0,99 besteht. Die schematische Darstellung des Messaufbaus sowie die gemessenen Wertepaare mit der zugehörigen Ausgleichsgeraden zeigt Abbildung 40. [22]

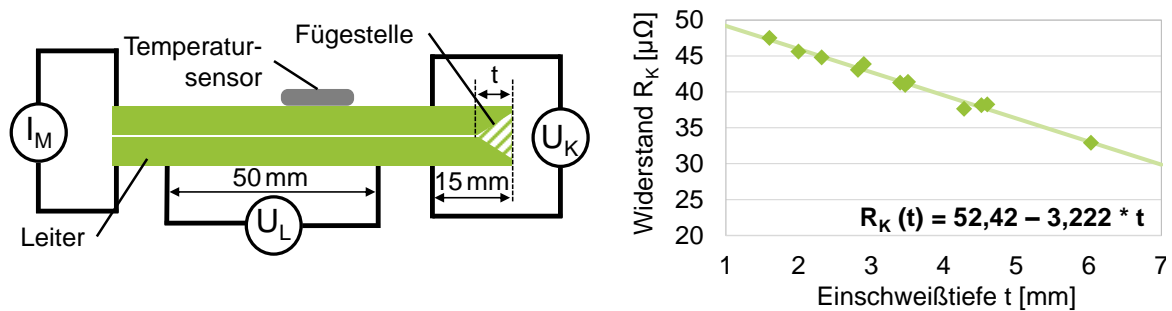


Abbildung 40: Versuchsaufbau zur Widerstandsmessung und Regressionsanalyse Widerstand  $R_K$  Einschweißtiefe  $t$  [22]

Analog wurden Musterteile unterschiedlicher Einschweißiefen  $t$  im Hinblick auf die erzielbare Scherzugfestigkeit  $F_S$  überprüft und ein Zusammenhang zum Widerstand  $R_K$  hergestellt. Es zeigt sich, dass eine quadratische Funktion die Abhängigkeit sehr gut beschreibt, da das Modell nahezu 98 % der beobachteten Streuung erklärt. Den Versuchsaufbau inklusive der erzielten Messwerte und Ausgleichsgeraden zeigt Abbildung 41.

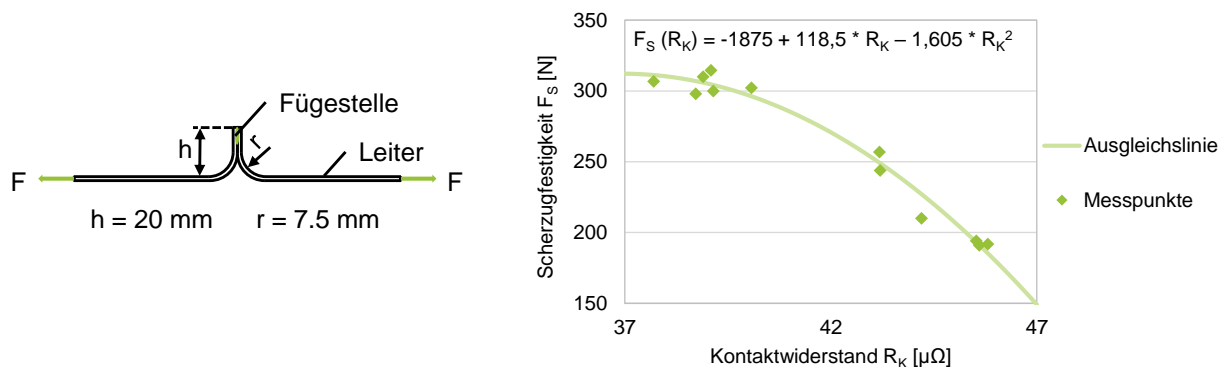


Abbildung 41: Zusammenhang Scherzugfestigkeit  $F_S$  und Widerstand Kontaktstelle  $R_K$  [22]

Die Schweißversuche wurden mit einem infraroten Scheibenlaser der Wellenlänge 1030 nm durchgeführt. Dieser kam zusammen mit einer programmierbaren Fokussieroptik zum Einsatz, die einen Strahltaillendurchmesser von 255  $\mu\text{m}$  realisierte. Als Versuchsmaterial kamen lack-isolierte Flachleiter aus dem Werkstoff Cu-ETP der Abmessungen 4,2 x 2,5 mm mit einem Kantenradius von 0,8 mm. In den Schweißversuchen zeigte sich, dass in Abhängigkeit der gewählten Laserparameter unterschiedliche Kontaktstellengeometrien erzielt werden können und ggf. Poren in der Schweißnaht entstehen, wie Abbildung 42 verdeutlicht.



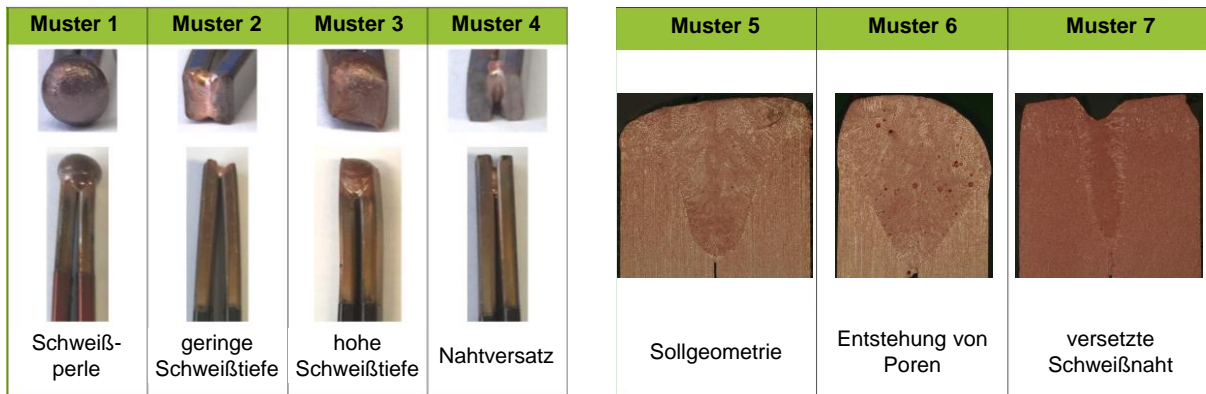


Abbildung 42: Analyse der erzielbaren Kontaktstellengeometrien [17]

Auf Grundlage der Muster 1 – 4 wurde festgestellt, dass die Menge an aufgeschmolzenem Material die Kontaktstellengeometrie maßgeblich bestimmt. Bei einer zu hohen Schmelzmenge entsteht eine Kugel (Muster 1), welche den Abstand zu benachbarten Kontaktstellen verkleinert und zu vermeiden ist, um Kurzschlüsse nicht zu begünstigen. Bei einer zu geringen Menge an aufgeschmolzenem Material (Muster 2 und 4) ist die Schweißnaht nach innen versetzt oder weist eine geringe Einschweißtiefe auf. Als Sollgeometrie für den weiteren Projektverlauf wurde daher die Kombination aus einer hohen Einschweißtiefe, ohne die Entstehung einer Kugel (Muster 3) festgelegt. Auch in den Schliffanalysen zeigen Proben mit dieser Kontaktstellengeometrie eine tiefe und deutlich ausgeprägte Schweißwurzel (Muster 5). Bei einigen Proben wird die Entstehung von Poren detektiert (Muster 6), die bei diesen auf einen unzureichenden Abtrag der Lackisolation zurückgeführt werden konnten. [17]

Um eine ausreichende Menge an aufgeschmolzenem Material erzeugen zu können, zeigte sich insbesondere eine Vorschubbewegung aus 3 geraden Linien auf der Stirnfläche der Leiter als zielführend. Deren Anordnung auf der Leiteroberfläche verdeutlicht Abbildung 43. In einem vollfaktoriellen Versuchsplan wurden neben der Laserleistung  $P$ , der Vorschubgeschwindigkeit  $f$  der Fokuslage  $D_F$  und dem Fügeseit  $s$  die Anzahl der Schweißlinien  $k$  sowie der Abstand der Schweißlinien  $a$  zueinander variiert.

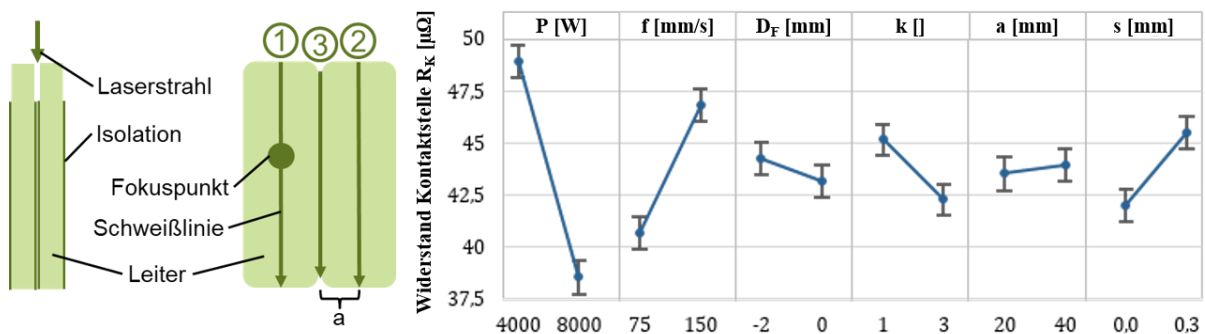


Abbildung 43: Versuchsanordnung und Haupteffektdiagramm Parameterstudie Laserschweißen [21]

Aus dem Haupteffektdiagramm in Abbildung 43 wird sichtbar, dass in den gewählten Faktorstufen die Laserleistung  $P$  den größten Effekt auf den Widerstand  $R_K$  aufweist. Außerdem

konnte ein positiver Einfluss geringer Vorschubgeschwindigkeiten  $f$ , geringer Fügespalte  $s$  nachgewiesen werden. Gleiches gilt für den Einsatz von drei Schweißlinien. [21]

Als weitere Zielgröße wurde definiert, dass Schweißspritzer zu vermeiden sind, um eine Verunreinigung der Werkstücke und Werkzeuge sowie die Möglichkeit der Entstehung von Isolationsschäden zu vermeiden. Zu diesem Zweck wurde in Versuchen der im Schweißprozess hervorgerufene Massenverlust erfasst um die Entstehung von Spritzern zu quantifizieren. In der Versuchsreihe erfolgte eine Variation der Vorschubgeschwindigkeit  $f$  sowie der Laserleistung  $P$  unter Einsatz von drei Schweißlinien. Es zeigte sich, dass für Vorschubgeschwindigkeiten  $f$  ab 100 mm/s die Entstehung von Spritzern signifikant reduziert wurde. Aus Abbildung 44 wird deutlich, dass auch beim Einsatz ausreichend hoher Vorschubgeschwindigkeiten  $f$  die erzielbaren Widerstände unter dem Referenzwiderstand des unbeeinflussten Leiters liegen. [21][20]

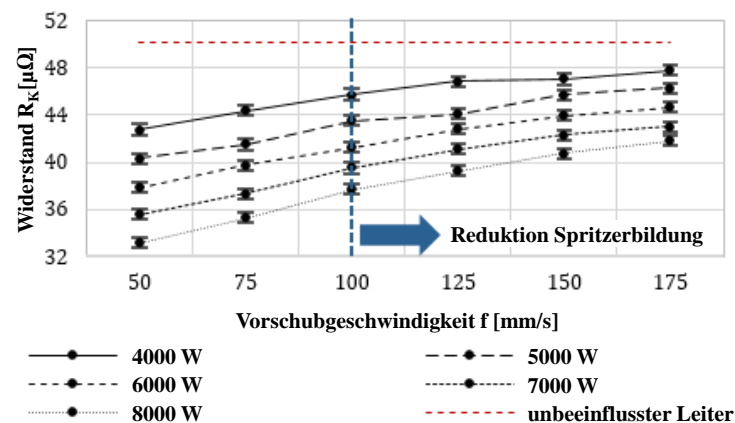


Abbildung 44: Analyse der Spritzerbildung in Abhängigkeit der erzielbaren Widerstände  $R_K$  [21]

Die hergestellten Musterteile wurden des Weiteren in Schliffbildern analysiert, wie Abbildung 45 zeigt. Auch in den Schliffanalysen zeigten sich geringe Vorschubgeschwindigkeiten  $f$  als nachteilig. So waren hier insbesondere im Bereich des Nahtendes ein verstärktes Auftreten von Poren festzustellen. Außerdem sind Löcher zu identifizieren, die auf die Entstehung von Auswürfen hindeuten. Hingegen zeigte sich bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten  $f$ , dass diese Proben zum Einfall der Naht neigen, da keine ausreichende Menge aufgeschmolzenem Materials erzeugt wurde. Die Analyse des verschweißten Querschnitts zeigte, dass dieser mit 9,4 mm<sup>2</sup> bis 16,3 mm<sup>2</sup> im Bereich oder über den Querschnitt des unbeeinflussten Leiters von ca. 10 mm<sup>2</sup> liegen.

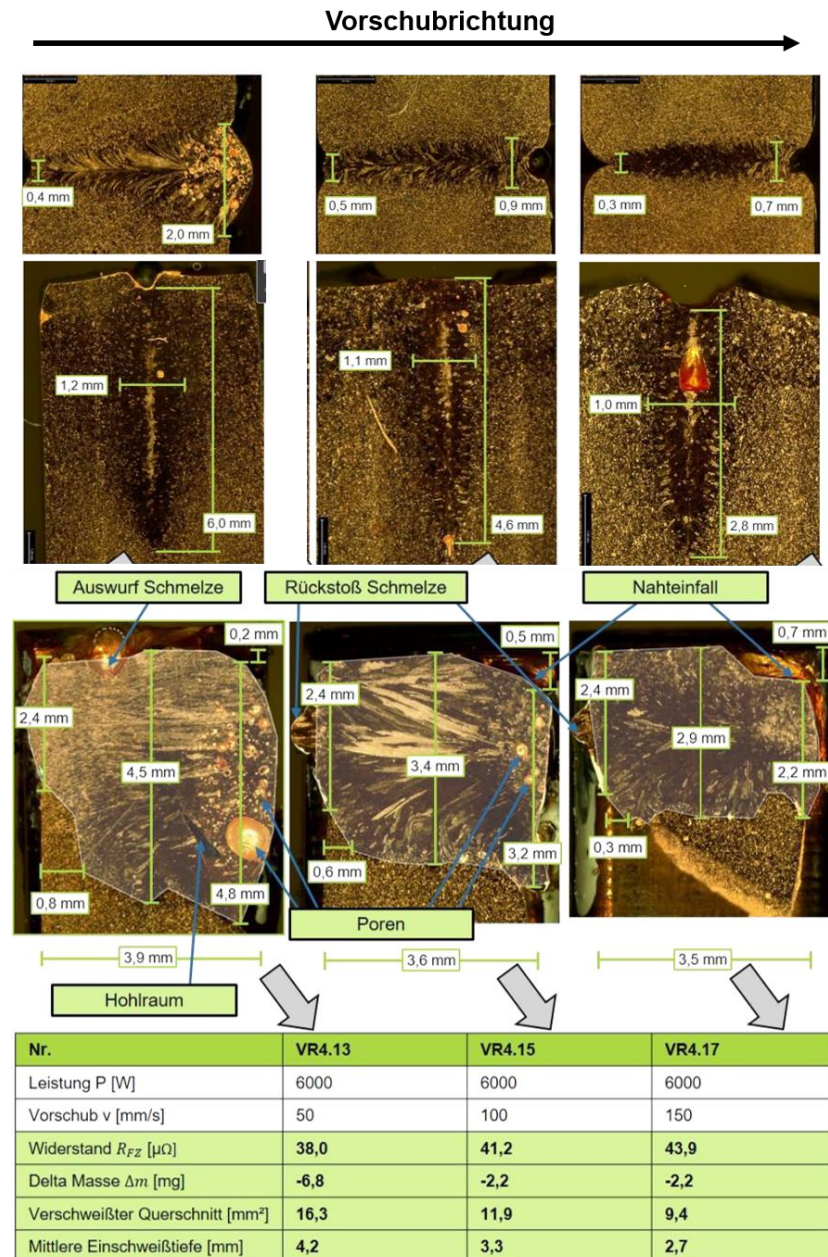


Abbildung 45: Schliffanalysen (Messdaten: [21])

Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen wurde ein Parametersatz abgeleitet, auf dessen Grundlage der entwickelte Prozess des Laserstrahlschweißens validiert wurde. Mit diesen wurden 30 Musterteile hergestellt und die unter Laborbedingungen erzielbare potentielle Prozessfähigkeit ermittelt. Dabei wurde für die obere Spezifikationsgrenze ein Widerstandswert berechnet, der im verwendeten Messaufbau einer Probe mit einer Anbindungsfläche von 120 % der Querschnittsfläche des unbeeinflussten Leiters entspricht. Dieser beläuft sich auf 42  $\mu\Omega$ . Mit einer potentiellen Prozessfähigkeit von 2,63 zeigte sich, dass das Laserstrahlschweißverfahren einen geeigneten Prozess zur Kontaktierung von Hairpinwicklungen darstellt. Die verwendeten Parameter sowie die Auswertung der vorläufigen Prozessfähigkeit stellt Abbildung 46 dar.



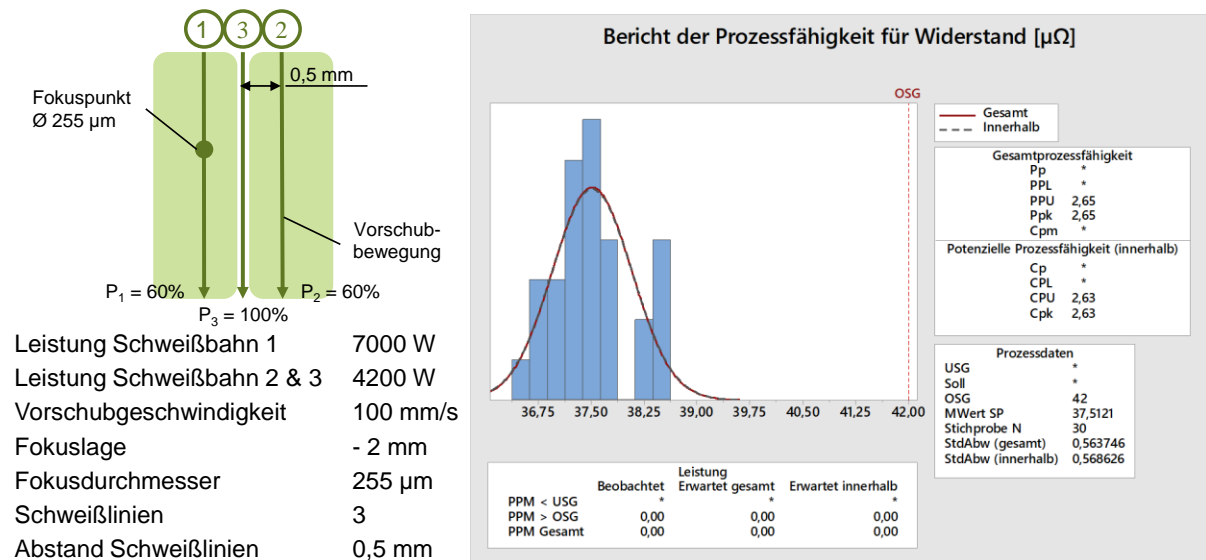


Abbildung 46: Ermittlung Prozessfähigkeit Referenzprozess

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit des entwickelten Kontaktierungsprozesses wurden anwendungsnahe Schweißdemonstratoren in Form von Blechpaketen, die mit entsprechend gebogenen Kupferleitern bestückt wurden, realisiert. Es zeigte sich, dass die Formspulendenenden auch in dieser Konfiguration kontaktiert werden können, wie Abbildung 47 zeigt.

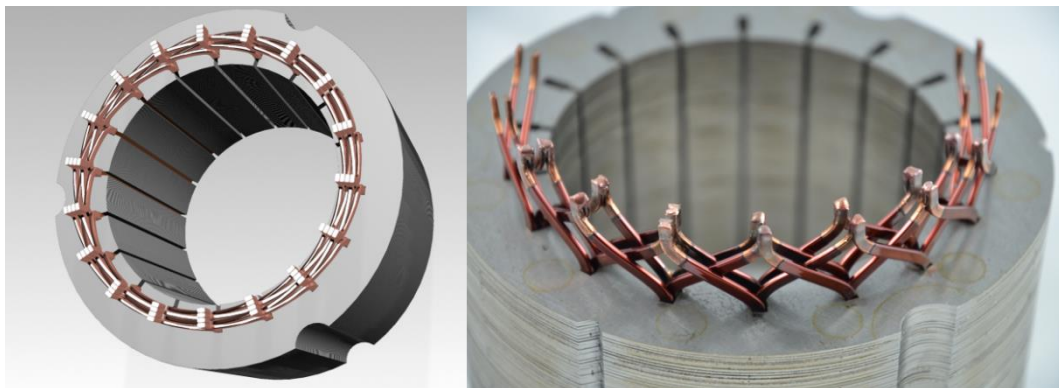


Abbildung 47: Konstruktion und Umsetzung Schweißdemonstrator

Des Weiteren sind Sonder- und Schaltelemente zu kontaktieren. Im Projekt wurde festgelegt, dass diese aus dem identischen Leitermaterial wie die Formspulen herzustellen sind. Aus theoretischen Überlegungen ergab sich, dass deren Kontaktierung in zwei unterschiedlichen Stoßarten möglich ist. So zeigte sich in Versuchen, dass eine Realisierung der gleichen Stoßart wie bei Standardschweißungen Vorteile mit sich bringen, da diese bessere elektrische Eigenschaften, einen einfacheren Spannmeechanismus sowie eine geringere Streuung aufweisen. Die Gegenüberstellung der Stoßarten zeigt Abbildung 48.



Abbildung 48: Gegenüberstellung Stoßarten

Um die wesentlichen Erkenntnisse der durchgeführten Untersuchungen zusammenzuführen, wurde eine Technologiezelle konzipiert, die die zur Kontaktierung notwendigen Schritte und Technologien vereint und vornehmlich bei kleinen Produktionsmengen einsetzbar sein soll. So kann insbesondere der Abtrag der Lackisolation, das Herstellen der Standardschweißungen sowie die Kontaktierung der Sonderelemente mittels der selben Lasertechnik durchgeführt werden, was zu einer Kostenreduktion führt. Den konzipierten Fertigungsablauf und ein Grobkonzept stellt Abbildung 49 dar.

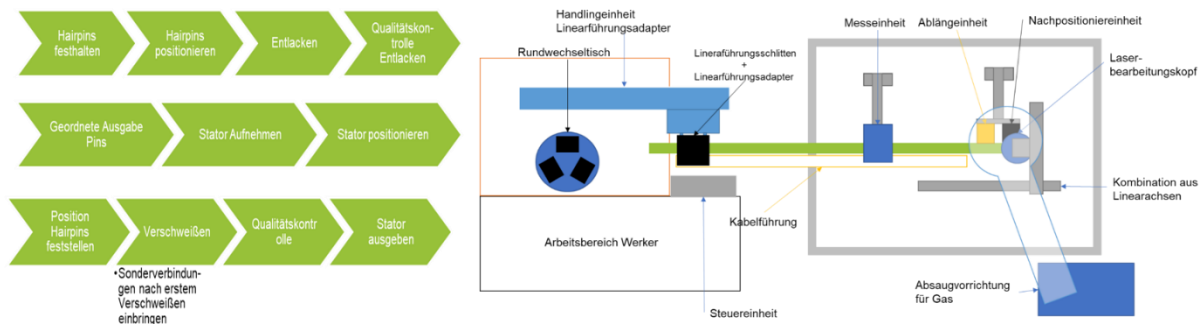


Abbildung 49: Technologiezelle zur Kontaktierung

Um Probleme mit schwankenden Positionen der Formspulenenenden zu begegnen, umfasst die Zelle eine Spanneinheit sowie eine Ablängeinheit, die den Überstand der Formspulenenenden bei Bedarf im Schwerschneidverfahren kürzt. Um eine möglichst hohe Flexibilität abbilden zu können, müssen lediglich die Werkstückaufnahme sowie Spann- und Schneideinheit werkstückspezifisch ausgeführt und folglich gerüstet werden. Auch wurde die in diesem Projekt qualifizierte Fluoreszenzmessung zur Beurteilung der Abtragsqualität integriert. Gleiches gilt für eine Widerstandsmessung zur Überprüfung der Kontaktstellenqualität. Um eine Prozessüberwachung zu ermöglichen, wurde die Analyse des zeitlichen Verlaufs des vom Metaldampf emittierten Spektrums identifiziert, mit dem z.B. die Entstehung starker Schweißspritzer detektiert werden können.

Als Ergebnis der Untersuchungen wurden Anforderungen und Problemstellungen bei der Kontaktierung von Hairpinwicklungen gesammelt und geeignete Prozesse entwickelt, um diesen zu begegnen. Es zeigt sich insbesondere, dass der laserbasierte Abtrag der Isolation sowie

das Laserstrahlschweißen geeignete Prozesse für die vorliegende Kontaktierungsaufgabe darstellen.

## 2.6 Ziele des Forschungsvorhabens und Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse

In Tabelle 7 werden die bei der Beantragung des Projektes definierten Ziele für das Teilvorhaben mit den erzielten Ergebnissen gegenübergestellt.

*Tabelle 7: Ziele und umgesetzte Ergebnisse der Bewertung innovativer Formspulenwicklungen*

Definiertes Zielkriterium	Umgesetztes Ergebnis
Entwicklung alternativer Konzepte von Formspulenwicklungen	Aus der Recherche wurden drei grundsätzliche Ansätze zur Verbesserung der Wickelschemata extrahiert: Durch eine Kombination von Schleifen- und Wellenwicklung lässt sich die Wicklung flexibler auf die Anforderungen auslegen. Durch eine Erhöhung der Leiterzahl je Nut können Wechselstromverluste vermindert werden. Durch regelmäßiges Umschichten der Phasenlagen in den Nuten lassen sich Skin- und Proximityeffekte reduzieren. Aus diesen Ansätzen wurden sechs Wickelschemata synthetisiert und als CAD-Modelle auskonstruiert.
Produktseitige Bewertung 3 innovativer Formspulenwicklungen	Die produktseitige Bewertung der Referenzwicklung und von drei unterschiedlichen Wicklungsschemata mit je zwei Variationen (geseht und nicht gesehen) wurde zunächst mittels bewährter Abschätzungsmethoden (Wicklungsfaktoren, Oberwellengehalt, Durchflutungspolygon, Strangspannungsstern) durchgeführt. Die Erstellung von vollständigen CAD-Modellen für jede der 6 Varianten erlaubt ebenso eine Bewertung der Wickelkopfhöhen. Eine genauere elektromagnetische Analyse fand im Anschluss durch die UniBW statt. Insbesondere zeigten sich gesehnte Wickelschemata als Verlustärmer. Durch Wellenwicklungen welche durch jede Position im Statordurchmesser gleich häufig laufen, können Ausgleichsströme zwischen den Lagen reduziert werden. Ein Lagentausch in der Nut wäre Produktseitig wünschenswert, fertigungstechnisch aber schwer zu realisieren.
Fertigungsseitige Bewertung 3 innovativer Formspulenwicklungen	In enger Zusammenarbeit mit der UniBW und den Konsortialpartnern wurde eine Bewertungssystematik für innovative Formspulenwicklungen erarbeitet. In diese flossen sowohl die Ergebnisse der elektromagnetischen Simulationen ein, als auch Fertigungsrelevante Aspekte. Als besonders relevant hat sich hierbei die Zahl der Ebenen übergreifenden Verbindungen auf der Biegeseite, die Häufigkeit von Sonderschrittweiten, die Zahl der Sonder-Hairpins, die Zahl der Verbindungselemente, sowie die Zahl der notwendigen Etagen auf der Twistseite herausgestellt. Verschiedene Schrittweiten auf der Twistseite stellten sich als kaum realisierbar heraus und sind daher möglichst zu vermeiden.
Erhöhung des Kupferfüllgrades auf über 60 %	Die Erreichbarkeit eines Kupferfüllfaktors von über 60 % konnte durch die CAD-Modelle schon früh im Projekt postuliert werden. Die

	Validierung erfolgte durch den Aufbau der Montagevorrichtung, bei der auch die Tolerierung von Füge- und Leiter- und Nutgeometrieschwankungen als ausreichend gewertet werden konnte.
Bewertung alternativer Prozess-technologien zur Herstellung innovativer Formspulenwicklungen	Alternativtechnologien für die einzelnen Fertigungsschritte zur Herstellung von Formspulenwicklungen wurden gesammelt, analysiert und priorisiert. Die Erkenntnisse wurden im weiteren Projektverlauf berücksichtigt und insbesondere in die Konzeptionierung einer geeigneten Fertigungskette berücksichtigt.
Ermöglichung einer hochautomatisierten und robusten Produktion	Es wurden unter Berücksichtigung geeigneter technologischer Alternativen vollautomatisierte Prozessketten konzipiert, in Simulationen abgebildet und validiert, die unterschiedliche Stückzahlenszenarien abbilden können. Durch die Untersuchung und Optimierung des Biegens, des Montierens sowie der Kontaktierung von Formspulenwicklungen wurde ein grundlegendes Prozessverständnis erarbeitet und dokumentiert, welches die Ableitung robuster Produktionsprozesse ermöglicht.
Befähigung des Biegens von Flachleitern zum Serieneinsatz	<p>Durch die Untersuchung des Biegens von lackisoliertem Flachdrahts, wurde ein ganzheitliches Verständnis über den Biegevorgang und die damit verbundenen Schadensmechanismen geschaffen.</p> <p>Als wichtigste Qualitäts- und Optimierungskriterien für den Biegeprozessschritt wurde die geometrische Formtreue nach dem Biegen sowie eine möglichst geringe Belastung der Leiterisolation ermittelt. Um die Effekte allgemeingültig und reproduzierbar zu erfassen wurden genormte Verfahren nach DIN 8586 zum Biegen gewählt. Die Prozessschritte zum Hairpin-Formen lassen sich in die Biegegrundformen <i>freies Biegen</i>, <i>Schwenkbiegen</i> und <i>Gensenkbiegen</i> zerlegen und anschließend wieder überlagern. Für diese drei wurden in enger Anlehnung an DIN 7438 Versuchsaufbauten erstellt, die Versuche durchgeführt und dokumentiert.</p> <p>Neben der Aufzeichnung von Kraft-Weg-Verläufen wurde die Proben auf Leiterwiderstandsänderungen und Isolationsschäden geprüft.</p> <p>Für die Isolationsprüfung wurden verschiedene Aufbauten zur Prüfung der Isolation mittel Teilentladungsmessung und Hochspannungsdurchschlagsmessung aufgebaut und die Eignung zur Erfassung der verschiedenen Phänomene evaluiert.</p> <p>Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden kontinuierlich in das neu entwickelte FEM-Simulationsmodell für lackisierte Flachdrahtleiter eingespeist um dessen Genauigkeit zu erhöhen und den Vertrauensbereich zu erweitern.</p> <p>Durch die Erfahrungen aus den Versuchen und das Simulationsmodell lassen sich mögliche Probleme beim Umformen von lackisolierten Leitern zu einem frühen Zeitpunkt in der Prozessentwicklung erkennen und kritische Punkte genau untersuchen.</p> <p>Dadurch konnte die erforderliche Prozesssicherheit für einen Serienprozess sichergestellt werden.</p>
Reduktion der Taktzeit des Biegens um 10 %	Die durch die Biegeuntersuchungen gewonnen Erkenntnisse und insbesondere die entstanden Prüfaufbauten für Isolationsmessungen wurden vor allem in Zusammenarbeit zwischen der Fa. Bihler

und FAPS genutzt um einen Biegeprozess zu entwickeln, der den Anforderungen an die Hairpin Geometrie genügt und die Isolationsbelastung auf ein notwendiges Minimum reduziert. So konnte der von BMW bisher eingesetzte Hairpin Umformprozess welcher ca. 15 s je Hairpin [26] benötigt durch den von Bihler entwickelten Umformprozess auf 0,5 s für einen Standard-Hairpin und 0,75 s für Hairpins mit Sonderlänge reduziert werden.

Befähigung der Montage offener Formspulenwicklungen zum Serieneinsatz

Zu Beginn des Projektes waren für die Montage von Hairpins in den Stator nur manuelle Prozesse bekannt. [27] Diese Prozesse sind zeitaufwendig, da jeder Hairpin einzeln in den Stator gefügt werden muss und dabei die bereits im Stator befindlichen Hairpins beiseite gebogen werden müssen, da aufgrund von Über- und Hinterschneidungen im Bereich des Hairpin-Daches ein einfaches axiales Stecken nicht möglich ist. Daher ist dieser manuelle Prozess auch nicht direkt in einen automatisierten Prozess überführbar. Zudem würden bei einer solchen sequentiellen Montage stets Relativbewegungen nicht nur zwischen Hairpin-Beinen und Statorblechpaket sondern auch zwischen schon montierten Hairpin und den zu fügenden Hairpins auftreten. Dadurch erhöht sich die Gefahr von Isolationssschäden des Lackdrahts.

Um einen serientauglichen und automatisierbaren Prozess zum Montieren von Hairpins in Statorblechpakete zu ermöglichen wurden verschiedene Konzepte zum Zusammenstellen von so genannten Wicklungskörben außerhalb des Blechpakets entwickelt. Nach Vervollständigung dieser Wickelkörbe können diese dann in einem Vorgang in den Stator eingesetzt werden. Es wurden drei Erfolgsversprechende Konzepte ausgewählt und in einer dynamischen Mehrköpersimulation validiert.

Auf der Simulation aufbauend wurde in mehreren Iterationsschritten ein durchgehendes Konzept zur Hairpin-Montage entwickelt und ein Prototyp aufgebaut. Durch die aufgebauten Werkzeuge und Vorrichtungen ist es möglich, die Hairpins zu Wickelkörben zu gruppieren, diese in eine Fügevorrichtung zusetzen, welche die Führung der Hairpin-Beine beim Fügen übernimmt und Formtoleranzen der Hairpins ausgleicht, die Positionierung in der Mitte der Statornuten gewährleistet, sowie die Öffnung Nutgrundisolationspapiers offenhält und ein Verschieben der Nutgrundisolation verhindert.

Die entwickelte Vorrichtung unterstützt bei einer manuellen Montage und kann darüber hinaus in einen automatisierten Serienprozess überführt werden.

Reduktion der Taktzeit der Montage um 10 %

Durch den Einsatz der entwickelten Vorrichtungen konnte der in [27] beschriebene Prozess von 15 Minuten für die Montage der Hairpins in ein Statorblechpaket mit Nutgrundisolation durch erfahrenen Mitarbeiter auf 11 Minuten reduziert werden. Würde die Zusammenstellung des Hairpin-Wickelkorbes direkt von der Hairpin-Formung in die Vorrichtung erfolgen, ließe sich in einem manuellen Prozess der Wickelkorb in etwa 4 Minuten in das Blechpaket montieren. Vollautomatisiert könnte die Montage des Wickelkorbes in knapp 30 s erfolgen.

Befähigung der Kontaktierung von Formspulenwicklungen zum Serieneinsatz	<p>Ausgehend von einer Anforderungsanalyse und Verfahrensanalyse wurde das Laserstrahlschweißen als geeignete Technologie zur Kontaktierung von Formspulenwicklungen identifiziert. Da hierfür ein rückstandsfreier Lackabtrag die Grundvoraussetzung darstellt, wurden Abtragsverfahren in Parameterstudien verglichen, wobei sich insbesondere ein Laserverfahren als geeignet herausstellte. In Parameterstudien wurde der Laserschweißprozess analysiert und optimiert. Aus den erzielten Ergebnissen wurde ein Referenzprozess abgeleitet, der in einer Prozessfähigkeitsanalyse bewiesen hat, dass er sich zur industriellen Serienfertigung eignet.</p>
Reduktion der Taktzeit der Kontaktierung um 10 %	<p>Im Vergleich des laserbasierten Abtrags mit dem etablierten Bürstspanprozess zeigte sich, dass beim Bürstspanen die Prozesszeit zum Entfernen der Isolation im definierten Abtragsbereich mindestens 8 s in Anspruch nimmt. Hingegen liegt die Prozessdauer der als zielführend erachteten Laserabtragsprozesse bei maximal 1,2 s, was einer Reduktion um 85 % entspricht.</p> <p>Die Prozessdauer des zum Fügen abgeleiteten Laserstrahlschweißprozesses lag bei 0,126 s je Kontaktstelle. Zum Benchmark wurde die in [23][22] ermittelte Prozesszeit zur Kontaktierung von Formspulenwicklungen im WIG-Schweißverfahren von 1 s herangezogen. Dieser Benchmark ergibt eine Verkürzung der Prozesszeit um 87 %.</p>
Konzeption einer flexiblen Kontaktierungszelle	<p>Die Untersuchungsergebnisse wurden in einer Technologiezelle zusammengeführt, die neben der Kontaktierung auch den Lackabtrag vereint. Für diese wurde ein Fertigungsablauf definiert und konzeptuell Möglichkeiten zur Prozessüberwachung und Qualitätssicherung integriert. Da die konzipierte Zelle nur wenige Werkstückspezifische Komponenten enthält, die leicht umgerüstet werden können, ist diese als flexible zu bewerten.</p>



### 3 Verwendung bereitgestellter Mittel

Die bereitgestellten Mittel setzten sich aus Personalausgaben, sächlichen Verwaltungsausgaben sowie Gegenständen und Investitionen zusammen. Deren Verwendung im Projekt wird im Folgenden erläutert.

#### Personalausgaben

Die zugewiesenen Personalmittel stellen mit gut 90 % der gesamten Fördersumme den wichtigsten Posten dar. Dieser wurden zur Finanzierung wissenschaftlicher Mitarbeiter und wissenschaftlicher Hilfskräfte eingesetzt, wodurch die Durchführung der Forschungstätigkeiten mit Recherchen, Versuchen, Versuchsauswertungen, Veröffentlichungen, erst ermöglicht wurde.

#### Gegenstände und Investitionen

Zur Durchführung des Forschungsprojektes war es notwendig, Versuchsaufbauten und Vorrichtungen zu realisieren, deren Herstellung in Summe die Wertgrenze von 400 € überstiegen. Diese wurden nicht als Einheit beschafft, sondern am Lehrstuhl aufgebaut, wozu die Beschaffung von Halbzeugen, individuell gefertigten Bauteilen sowie Komponenten notwendig war. Die entsprechenden Vorrichtungen wurden als Einheit inventarisiert. Soweit möglich erfolgte die Bearbeitung von Dreh- und Frästeilen in der lehrstuhleigenen Werkstatt, komplexere Fertigungsaufträge wurden an die Zentralwerkstatt der Universität vergeben um diese kostengünstig umzusetzen.

Es wurden die folgenden Vorrichtungen bzw. Versuchsaufbauten realisiert:

- Spannvorrichtung zur Positionierung von Flachdrähten für Kontaktierungsversuche  
Die realisierte Vorrichtung ermöglicht ein Spannen von lackisolierten Leitern. Diese wurde im Rahmen der Kontaktierungsversuche im Laserstrahlschweißverfahren eingesetzt.
- Positionier- und Spannvorrichtung für Kontaktelemente  
Eine bereits am Lehrstuhl vorhandene Vorrichtung zur Aufnahme und Positionierung sowie dem Spannen von Kontaktelementen mit Wicklungsteilen wurde für das Projekt angepasst. Diese kam bei der Untersuchung der Kontaktierung von Sonder- und Schaltelementen zum Einsatz.
- Gesenkbiegevorrichtung für lackisolierte Flachleiter  
Die realisierte Vorrichtung besteht aus zwei aufeinander abgestimmten Gesenken und wurde bei der Durchführung von Grundlagenversuchen zum Gesenkbiegen von lackisolierten Kupferleitern verwendet.
- Vorrichtung zur Montage von Leitelementen  
Vorrichtung zur Durchführung von Montageversuchen die verwendet wurde, um den Prozess des Einbringens vorgeformter Leitelemente in das Blechpaket zu untersuchen.
- Vorrichtung zur Montage von Leitelementen mit speziellen Führungselementen  
Vorrichtung zur Durchführung von Montageversuchen die eingesetzt wurde, um den Prozess des Einbringens vorgeformter Leitelemente mit externer Führung in das Blechpaket zu untersuchen.

- Richtvorrichtung für rechteckigen Kupferdraht  
Anpassung einer am Lehrstuhl vorhandenen Vorrichtung zum Richten von Draht die eingesetzt wurde, um das Drahtmaterial für die Versuchsdurchführung richten zu können.

### **Sächliche Verwaltungsausgaben**

Mit den zur Verfügung gestellten Mittel wurden Mieten und Rechnerkosten beglichen. Diese resultierten aus Simulationslizenzen die eingesetzt wurden, um den Biegeprozess in FEM-Simulationen analysieren zu können und die Kinematik von Montagekonzepten zu validieren.

Des Weiteren wurden die Mittel eingesetzt um ein Fluoreszenz-Messgerät für einen definierten Zeitraum zu mieten. Dieses wurde verwendet, um die Eignung des Messprinzips zur Detektion von Isolationsrückständen zu validieren und die Abtragsqualität der in den Parameterstudien hergestellten Musterteile gegenüberstellen zu können.

Die als sonstige Verwaltungsausgaben zugeteilten Gelder wurden zur Beschaffung projektbezogener Verbrauchsmaterialien wie Versuchsteile, Materialien zur Herstellung von Schliffanalysen, einfache Vorrichtungen, Hilfsmittel zur Durchführung von Messungen sowie Halbzeuge für Versuchsaufbauten verwendet.

Im Rahmen des Projektes wurden Dienstreisen durchgeführt, die aus den zugewiesenen Mitteln finanziert wurden. Dabei handelte es sich neben den halbjährlich stattfindenden Konsortialtreffen um Reisen zu nationalen und internationalen Konferenzen zur Publikation der Ergebnisse. Darüber hinaus fanden Arbeitstreffen mit einzelnen Konsortialpartnern und Messebesuche zur Sammlung von Informationen über relevante Marktentwicklungen statt.

#### 4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Ziel des Förderprogramms „ELEKTRO POWER II: Elektromobilität - Positionierung der Wertschöpfungskette“ lag darin, Deutschland bei der Elektromobilität im internationalen Wettbewerb entscheidend voranzubringen. Konkret zielte das Programm unter anderem darauf ab

- die Gesamtkosten der Elektromobilität zu senken und
- die Hürden der industriellen Produktion zu senken.

Diese beiden Ziele unterstützen die im Teilvorhaben Automatisierte Fertigungstechnologien zum Biegen, Montieren und Schalten von innovativen Formspulenwicklungen erzielten Ergebnisse maßgeblich. [2]

So legte das Projekt die Grundlage zur Stärkung der elektromobilen Wertschöpfungskette in Deutschland. Dies wurde erreicht, indem die Technologie der Formspulenwicklung für den Einsatz in automobilen Traktionsantrieben fertigungsseitig grundlegend analysiert und Weiterentwickelt wurde. Im Ergebnis wurde eine komplexe Herstellungskette zur vollautomatischen Produktion entsprechender Statoren für unterschiedliche Stückzahl Szenarien entwickelt und validiert, die als Orientierungshilfe bei zukünftigen Industrialisierungsprojekten im Bereich der elektrischen Antriebstechnik dienen kann. Zusätzlich wurden für die anspruchsvollen Prozesse der Formgebung, Montage sowie Kontaktierung geeignete Technologien identifiziert, in Parameterstudien grundlegend analysiert und weiterentwickelt. Auch erfolgte die Identifikation und Qualifikation geeigneter Möglichkeiten zur Erfassung relevanter Qualitätskriterien. Durch die Dokumentation und Veröffentlichung der Ergebnisse wird die zukünftige Technologieauswahl und Prozessauslegung erheblich vereinfacht. Zusammenfassend senken die erzielten Ergebnisse die Hürden zur Realisierung einer vollautomatisierten Herstellung automobiler Traktionsantriebe mit stabilen Produktionsprozessen am Standort Deutschland. Neben der Sicherung der Wertschöpfung ertüchtigen die Projektergebnisse die deutsche Automobilindustrie zur großserientauglichen Herstellung von Antriebe bei verringerten Ausschussquoten, wodurch die Kosten für den Endkunden und somit die Gesamtkosten der Elektromobilität gesenkt werden können. Dies stellt einen Baustein zur Steigerung der Nutzerakzeptanz dar.

Darüber hinaus festigen die Projektergebnisse auch die Stellung Deutschlands als führenden Technologiestandort für Maschinen- und Anlagentechnik. So senken die erzielten Ergebnisse die Hürde, Herstellungsprozesse und –anlagen für zukünftige elektrische Antriebssysteme zu entwickeln und optimieren, wodurch der deutsche Maschinen- und Anlagenbau einen Wettbewerbsvorteil auf diesem Gebiet erzielen kann.

Die Betrachtung der Projektergebnisse vor dem Hintergrund des sich auch zu Projektabschluss dynamisch entwickelnden Umfelds der Elektromobilität mit einer Vielzahl an neu auftretenden Akteuren, insbesondere aus dem asiatischen Raum, belegt die Notwendigkeit der durchgeführten Arbeiten. Die Ergebnisse wurden unter Zuhilfenahme kostengünstiger Methoden wie z.B. Simulationen und einfacher Versuchsaufbauten erzielt und einem breiten Interessentenkreis zugänglich gemacht. Zusätzlich wurde der Aufwand durch die Zusammenstellung des Konsortiums, sodass auf einen breiten Erfahrungsschatz und vielfältige technologische Möglichkeiten zurückgegriffen werden konnte, reduziert. Vor diesem Hintergrund sind die geleistete Aufwendungen zur Erzielung der vorgestellten Ergebnisse als angemessen zu bewerten.

## 5 Nutzen und Verwertung der Vorhabensergebnisse

Der Lehrstuhl FAPS verfolgt als Körperschaft des öffentlichen Rechts keine dezidierten wirtschaftlichen Interessen. Dennoch kann und konnte durch die Überführung der Erkenntnisse in Lehre und Seminare, welche auch Unternehmen offenstehen, sowie wissenschaftlichen Veröffentlichungen das gesamtgesellschaftliche Ziel erreicht werden einen Technologietransfer in Gesellschaft und Wirtschaft durchzuführen. Auch konnten die Projektpartner durch enge Kooperation mit dem Lehrstuhl sowohl neue Prozessfähigkeiten qualifizieren als auch ihre Marktposition durch den Kompetenzzuwachs in der Statorfertigung festigen. Darüber hinaus konnten durch den Erfahrungs- und Fähigkeitszuwachs am Lehrstuhl neue Projektpartner gewonnen werden.

Durch die Beteiligung des Lehrstuhls FAPS konnte das antragsgemäße Ziel erreicht werden automatisierte Produktionsprozesse und Fertigungskonzepte für die Herstellung von Statoren für Traktionsantriebe weiterzuentwickeln und wissenschaftlich zu beschreiben.

Insbesondere wurden die Prozesse des Flachdrahtbiegens und –formen zu Hairpin-Geometrien, das Montieren von Hairpins in Statorblechpakete, das Abisolieren von Kupferlackdraht sowie das Laser-basierte Kontaktieren von Kupferwerkstoffen eingehend untersucht.

Die bereits erfolgte sowie folgende und geplante Verwertung der Ergebnisse des Teilprojekts am Lehrstuhl FAPS ist zusammenfassend in Tabelle 8 dargestellt. Dabei wird auch der zugehörige Zeithorizont dargestellt.

*Tabelle 8: Verwertung der Ergebnisse des Teilvorhabens*

Ergebnis	Verwertung	Zeithorizont
Analyse optimierter Wicklungssysteme	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transfer der Erkenntnisse in die Industrie in Kooperationen und Projekten</li> <li>• Transfer der Erkenntnisse an Nachwuchskräfte in der Vorlesung Elektromaschinenbau</li> </ul>	Seit 2018
Analyse des Einflusses der Fertigung auf Produkteigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Veröffentlichung der Ergebnisse des Einflusses von Biege- und Kontaktierungsvorgängen auf die Motorperformance als Konferenzbeitrag auf der E DPC 2019 (siehe auch Abschnitt 7)</li> </ul>	2019
Entwicklung und Validierung einer Prozesskette zur Herstellung von Hairpinwicklungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transfer der Erkenntnisse in die Industrie in Kooperationen und Projekten</li> </ul>	seit 2019
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transfer der Erkenntnisse an Nachwuchskräfte in der Vorlesung Elektromaschinenbau</li> </ul>	seit 2019
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Veröffentlichung zu einer abstrahierten, generischen Prozesskette zur Hairpinstator-Fertigung als Konferenzbeitrag auf der ICEMS 2018 (siehe auch Abschnitt 7)</li> </ul>	2018
Schaffung von FE-Simulationsmodellen für die Wicklungsherstellung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Veröffentlichungen zur virtuellen Absicherung und Isolationsprüfung E DPC 2017 und Magazin DRAHT 2018 (siehe auch Abschnitt 7)</li> </ul>	2017/2018
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transfer der Erkenntnisse in die Industrie in Kooperationen und Projekten</li> </ul>	Seit 2018
		Seit 2018

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transfer der Erkenntnisse an Nachwuchskräfte in der Vorlesung Elektromaschinenbau</li> </ul>	
Neuartige Fertigungstechnologien zum Biegen, Montieren und Kontaktieren entwickelt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Veröffentlichungen von Herausforderungen bei der Kontaktierung von Formspulenwicklungen und der Bewertung etablierter Kontaktierungsverfahren in der Zeitschrift ZWF (siehe auch Abschnitt 7)</li> <li>• Veröffentlichung von Ergebnissen der Parameterstudien zum Laserstrahlschweißen von Formspulenwicklungen als Konferenzbeitrag auf der E DPC 2017 (siehe auch Abschnitt 7)</li> <li>• Veröffentlichung von Ergebnissen der Parameterstudien zum Laserstrahlschweißen von Formspulenwicklungen als Konferenzbeitrag auf der LANE 2018 (siehe auch Abschnitt 7)</li> <li>• Veröffentlichung von Ergebnissen der Untersuchungen zum Abtrag der Isolation im Journal IJMERR (siehe auch Abschnitt 7)</li> <li>• Präsentation der Ergebnisse zur Ableitung eines industrialisierbaren Laserstrahlschweißprozesses als Konferenzbeitrag auf der ICESI 2019 (siehe auch Abschnitt 7)</li> </ul> <p>Abweichung zur ursprünglichen Planung: Nach Überprüfung der erzielten Ergebnisse im Hinblick auf Potentiale zur Anmeldung von Schutzrechten wurde dies als nicht zielführend erachtet.</p>	<p>2017</p> <p>2017</p> <p>2018</p> <p>2020</p> <p>2019</p>
Entwicklung einer Bewertungssystematik zur Gegenüberstellung von Fertigungskonzepten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transfer der Erkenntnisse in die Industrie in Kooperationen und Projekten</li> <li>• Transfer der Erkenntnisse an Nachwuchskräfte in der Vorlesung Elektromaschinenbau</li> </ul>	<p>seit 2019</p> <p>seit 2019</p>
Reduktion der Taktzeit des Biegens, Montieren und Kontaktierens um 10 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Erkenntnisse zur Reduktion der Taktzeit in den aufgeführten Technologien werden in direkten und öffentlich geförderten Forschungsprojekten an Industriepartner übertragen</li> </ul>	seit 2018
Erhöhung Kupferfüllgrad auf mindestens 60 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die ermittelten Möglichkeiten zur Erhöhung des Kupferfüllfaktors werden in direkten und öffentlich geförderten Forschungsprojekten an Industriepartner übertragen</li> <li>• Die Erkenntnisse zur Steigerung des Kupferfüllfaktors werden in der universitären Lehre in der Vorlesung Elektromaschinenbau an Studierende weitergegeben</li> </ul>	<p>seit 2018</p> <p>seit 2019</p>
Konzept für flexible Laserkontaktierungszelle ausgearbeitet	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die in der Kontaktierungszelle zusammengeführten Erkenntnisse werden in der universitären Forschung fortlaufend genutzt und an Industriepartner in Kooperationen weitergegeben</li> </ul>	seit 2018
Validierung Neuentwicklungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Ergebnisse werden erweitert um aufbauende Untersuchungen in einer Promotion veröffentlicht</li> </ul>	geplant: 2020

## 6 Während des Vorhabens bekannt gewordene relevante Fortschritte bei anderen Stellen

Wegen der hohen Relevanz der bearbeiteten Themenstellung ergaben sich während der Projektlaufzeit auch bei dritten Stellen Fortschritte im Forschungsgebiet der Herstellung von Statoren mit Formspulenwicklung. Diese traten vornehmlich während der zweiten Projekthälfte zu Tage. Aufgrund des Vorsprungs des Projektes Pro-E-Traktion und der im Projektkonsortium gebündelten Kompetenz war weder eine Anpassung der Projekthinhalte und -ziele notwendig, noch wurden Schutzrechte bekannt, die die Durchführung und den Erfolg des Projektes gefährdet haben. Im Bezug auf das Teilvorhaben des Lehrstuhls FAPS ergaben sich wenig Synergieeffekte aus den Veröffentlichungen anderer Institute, da der Detailgrad der Prozessuntersuchungen am Lehrstuhl FAPS deutlich höher war. Allerdings erzeugte das stark zunehmende Interesse an der Hairpin-Technologie von OEMs und Zulieferern einen Impetus, der insbesondere bei den beteiligten Unternehmen weitere Mittelfreigaben ermöglichte um etwa komplexere Prozessdemonstratoren aufzubauen. So konnte wiederum der Erfolg des Gesamtprojektes ausgebaut werden.

Im industriellen Bereich haben während der Projektlaufzeit zahlreiche Anbieter von Fertigungs- und -technologien begonnen, sich im Bereich der Produktion von Statoren mit Formspulenwicklung zu positionieren. Dabei handelt es sich beispielsweise um (nicht abschließend):

- Ameca Ltd. (BGR)
- WAFIOS AG (DEU)
- Tecnomatic S.p.A (ITA)
- copperING GmbH (DEU)
- ATOP S.p.A. (ITA)
- Aumann AG (DEU)
- Miba Automation Systems Ges.m.b.H. (AUT)
- Elmotec Statomat GmbH (DEU)
- Grob-Werke GmbH & Co. KG (DEU)
- Juli Automation Equipment Co.,Ltd. (CN)
- Felsomat GmbH & Co. KG (DEU)
- SMT Special Machine Tool Brescia srl (ITA)

Darüber hinaus wurde bekannt, dass sowohl zahlreiche deutsche als auch internationale Zulieferer und OEMs zunehmend elektrische Traktionsmaschinen mit Formspulenwicklung anbieten. Hier sind z.B. folgende Unternehmen aufzuführen (nicht abschließend):

- Mercedes-Benz AG (DEU)
- Volkswagen AG (DEU)
- Ford Motor Company (USA)
- General Motors Company (USA)
- Toyota Motor Corporation (JP)
- Robert Bosch GmbH (DEU)
- Schaeffler Technologies AG & Co. KG (DEU)
- ZF Friedrichshafen AG (DEU)
- Continental AG (DEU)
- Remy International Inc. (USA)

Im September 2017 startete am Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie das vom Land Baden-Württemberg geförderte Forschungsvorhaben „Anlagentechnik für Fertigung von Statoren mit Hairpin-Technologie“ (AnStaHa). Dessen Ziel ist es, Prozesswissen und Anlagentechnik für die Herstellung von Statoren mit Hairpinwicklungen speziell für mittelständische Zulieferer und Fabrikausrüster zu erarbeiten. [24]

Darüber hinaus wurden die im Folgenden aufgeführten wissenschaftlichen Veröffentlichungen mit ähnlichen Fragestellungen während der Projektdurchführung getätigt:



**2017**

- KAMPKER, A.; KREISKÖTHER, K.; BÜNING, M.K.; TREICHEL, P. und THEELEN, J.: Automotive quality requirements and process capability in the production of electric motors. In: Proceedings of 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Würzburg, 2017, S. 32-40  
Relevante Inhalte: Identifikation der Hairpintechnologie als geeignetes Mittel zur Realisierung stabiler Produktionsprozesse bei der Herstellung von Wicklungen im automobilen Umfeld
- KAMPKER, A.; KREISKÖTHER, K.D.; KLEINE BÜNING, M. und TREICHEL, P.: Herausforderung Hairpintechnologie. Technologieschub für OEMs und Anlagenbauer. In: ATZechnik, 2018, 13(5), S. 62-67  
Relevante Inhalte: Erläuterung produktionsseitiger Potentiale der Hairpintechnologie zur Verbesserung elektrischer Maschinen vor dem Hintergrund der Elektromobilität
- FLEISCHER, J.; HAAG, S. und HOFMANN, J.: Quo Vadis Wickeltechnik? Eine Studie zum aktuellen Stand der Technik und zur Recherche zukünftiger Trends im Automobilbau, 2017. Verfügbar unter: [https://www.wbk.kit.edu/downloads/2017\\_02\\_21\\_Studie\\_Wickeltechnik\\_final\\_DE.pdf](https://www.wbk.kit.edu/downloads/2017_02_21_Studie_Wickeltechnik_final_DE.pdf)  
Relevante Inhalte: Aufzeigen aktueller Entwicklungen im Bereich der Herstellung von Wicklungen und Identifikation der Formspulentechnologie als gut geeignetes Fertigungsverfahren, wobei die Kontaktierungsaufwendungen als herausfordernd einzustufen sind.

**2018**

- KAMPKER, A.; TREICHEL, P.; KREISKÖTHER, K.D.; KREBS, M. und KLEINE BÜNING, M.: Ex-Ante Process-FMEA for Hairpin Stator Production by Early Prototypical Production Concepts. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2018, S. 141-147
- Relevante Inhalte: Analyse und Bewertung von Fehlermöglichkeiten im Kontext der Herstellung von Formspulenwicklungen
- WIRTH, F.; KIRGÖR, T.; HOFMANN, J. und FLEISCHER, J.: FE-Based Simulation of Hairpin Shaping Processes for Traction Drives. Proceedings of 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2018, S. 149-153  
Relevante Inhalte: Simulative Abbildung der Biegeschritte zur Herstellung offener Formspulen aus rechteckigen Leiterquerschnitten

## 7 Veröffentlichung von Projektergebnissen

Der Lehrstuhl FAPS hat die folgenden Veröffentlichungen mit Projektbezug generiert:

### 2017

- Gläßel, Tobias und Franke, Jörg: Kontaktierung von Antrieben für die Elektromobilität. Innovative Vorgehensweisen, Prozessketten und Technologien. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2017, 112(5), S. 322-326
- Gläßel, Tobias; Seefried, Johannes und Franke, Jörg: Challenges in the Manufacturing of Hairpin Windings and Application Opportunities of Infrared Lasers for the Contacting Process. In: Proceedings of 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2017, S. 64-70
- Weigelt, Michael; Riedel, Andreas; Masuch, Michael; Mahr, Alexander; Gläßel, Tobias und Franke, Jörg. Potentials of an explicit finite element analysis of the bending processes for coated copper wires. In: 2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017, S. 1-5. ISBN 978-1-5386-1069-5

### 2018

- Gläßel, Tobias; Baat, Florian; Schwinghammer, Daniel; Seefried, Johannes; Kühl, Alexander; Franke, Jörg: Infrared laser based contacting of bar-wound windings in the field of electric drives production. In: Procedia CIRP, Volume 74: Proceedings of 10th CIRP Conference on Photonic Technologies (LANE). Amsterdam: Elsevier. 2018, S. 17-22
- Riedel, Andreas; Masuch, Michael; Weigelt, Michael; Gläßel, Tobias; Kühl, Alexander; Reinstein, Sebastian und Franke, Jörg: Challenges of the Hairpin Technology for Production Techniques. In: 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS): IEEE, 7. Oktober 2018 - 10. Oktober 2018, S. 2471-2476. ISBN 978-89-86510-20-1
- Weigelt, Michael; Fröschl, Christian; Masuch, Michael; Riedel, Andreas und Franke, Jörg: Erkenntnisse aus der Biegesimulation von Flachdraht [online]. Draht, 10. Januar 2018, 69(1/2018), 18-22. Verfügbar unter: [https://www.drahtmagazin.de/draht-forschung/erkenntnisse-aus-der%C2%A0biegesimulation-von%C2%A0flachdraht\\_34752\\_de/](https://www.drahtmagazin.de/draht-forschung/erkenntnisse-aus-der%C2%A0biegesimulation-von%C2%A0flachdraht_34752_de/)

### 2019

- Gläßel, Tobias; Seefried, Johannes; Masuch, Michael; Riedel, Andreas; Mayr, Andreas; Kühl, Alexander; Franke, Jörg: Process Reliable Laser Welding of Hairpin Windings for Automotive Traction Drives. In: Proceedings of International Conference on Engineering, Science, and Industrial Applications (ICESI): Tokyo. 2019
- Gläßel, Tobias; Bachinski Pinhal, Daniel; Masuch, Michael; Gerling, Dieter; Franke, Jörg: Manufacturing Influences on the Motor Performance of Traction Drives with Hairpin Winding. In: Proceedings of 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2019, im Druck

**2020**

- Gläsel, Tobias; Seefried, Johannes; Franke, Jörg: Skinning of Insulated Copper Wires within the Production Chain of Hairpin Windings for Electric Traction Drives. In: International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research (IJMERR) [online], 2020, 9(2)
- Masuch, Michael; Riedel, Andreas; Gläsel, Tobias; Mayr, Andreas; Weigelt, Michael; Dorsch, Patrick; Kühl, Alexander; Franke, Jörg: Concepts and Tools for the Assembly of Hairpins into Laminated Stator Cores. In: 8th CIRP Conference of Assembly Technology and Systems. Greece. 2020 (Angenommener Konferenzbeitrag)
- Kühl, Alexander; Riedel, Andreas; Vogel, Alexander; Hartl, Sebastian; Gläsel, Tobias; Masuch, Michael and Franke, Jörg: Robot-based Production of Electric Motors with Hairpin Winding Technology. In: *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2019 (WCECS)*, 257-256

## Literaturverzeichnis

- [1] Bundesregierung: Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. Verfügbar unter: [https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nep\\_09\\_bmu\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nep_09_bmu_bf.pdf). Überprüfungsdatum: 18. November 2019
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: ELEKTRO POWER II: Elektromobilität - Positionierung der Wertschöpfungskette. Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/elektromobilitaet-elektro-power-ii.html>. Überprüfungsdatum: 18.11.2019
- [3] FEV CONSULTING GMBH: Antrieb im Wandel. Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs von Fahrzeugen und ihre Auswirkung auf den Maschinen- und Anlagenbau und die Zulieferindustrie. Frankfurt am Main, 2018
- [4] H. Schilp, „Produktion von Komponenten des elektrischen Antriebs“ in E-Motive Expertenforum. Wolfsburg, 2014
- [5] Bickel, Benjamin; Hübner, Markus und Franke, Jörg: „Analyse des Optimierungspotenzials zur Erhöhung des Kupferfüllfaktors in elektrischen Maschinen“. in ant Journal, Nr. 2, 2014, S. 16-21
- [6] M. Owada, M. Kishi, M. Kasuya, M. Kano, Wire Winder and Motor. Veröffentlichungsnummer: JP2005130645A, 2005
- [7] R. Tzscheuschler, H. Olbrisch, W. Jordan, Technologie des Elektromaschinenbaus. Berlin: Verlag Technik GmbH, 1990
- [8] M. Tann, Projekt Bender. Lehrstuhl für Computer Aided Architectural Design, ETH Zürich, 2006
- [9] G. Müller, K. Vogt, B. Ponick, Berechnung elektrischer Maschinen. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.
- [10] T. Ishigami, Y. Tamaka, H. Homma, „Motor Stator with Thick Rectangular Wire Lap Winding for HEVs“, in International Power Electronics Conference. Hiroshima, 2014, S. 1880-1885
- [11] Rahman, K.M.; Jurkovic, S.; Stancu, C.; Morgante, J. und Savagian, P.J.: Design and Performance of Electrical Propulsion System of Extended Range Electric Vehicle (EREV) Chevrolet Volt. In: IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(3), S. 2479-2488
- [12] Gläsel, Tobias und Franke, Jörg: Kontaktierung von Antrieben für die Elektromobilität. Innovative Vorgehensweisen, Prozessketten und Technologien. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2017, 112(5), S. 322-326
- [13] Jung, D.: Method of binding stator coils of motor. Veröffentlichungsnummer: US2013/0300232A1, 2013
- [14] Rahman, K.M.; Jurkovic, S.; Hawkins, S.; Tarnowsky, S. und Savagian, P.: Propulsion System Design of a Battery Electric Vehicle. In: IEEE Electrification Magazine, 2014, 2(2), S. 14-24
- [15] Cai, W.; Fulton, D. und Congdon, C.L.: Multi-set rectangular copper hairpin winding for electric machines. Veröffentlichungsnummer: US7034428B2, 2006
- [16] Gläsel, Tobias; Bachinski Pinhal, Daniel; Masuch, Michael; Gerling, Dieter; Franke, Jörg: Manufacturing Influences on the Motor Performance of Traction Drives with Hairpin Winding. In: Proceedings of 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2019, im Druck
- [17] Gläsel, Tobias; Seefried, Johannes und Franke, Jörg: Challenges in the Manufacturing of Hairpin Windings and Application Opportunities of Infrared Lasers for the Contacting

- Process. In: Proceedings of 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2017, S. 64-70
- [18] Alter, L.; Heider, A. und Bergmann, J.-P.: Investigations on copper welding using a frequency-doubled disk laser and high welding speeds. In: Procedia CIRP, Volume 74: Proceedings of 10th CIRP Conference on Photonic Technologies (LANE). Amsterdam: Elsevier. 2018, S. 12-16
- [19] Leitz, A.: "Laserstrahlschweißen von Kupfer- und Aluminiumwerkstoffen in Mischverbindung". Dissertation, Herbert Utz Verlag GmbH, München, 2016
- [20] Gläsel, Tobias; Seefried, Johannes; Franke, Jörg: Skinning of Insulated Copper Wires within the Production Chain of Hairpin Windings for Electric Traction Drives. In: International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research (IJMERR) [online], 2020, 9(2)
- [21] Gläsel, Tobias; Baat, Florian; Schwinghammer, Daniel; Seefried, Johannes; Kühl, Alexander; Franke, Jörg: Infrared laser based contacting of bar-wound windings in the field of electric drives production. In: Procedia CIRP, Volume 74: Proceedings of 10th CIRP Conference on Photonic Technologies (LANE). Amsterdam: Elsevier. 2018, S. 17-22
- [22] Gläsel, Tobias; Seefried, Johannes; Masuch, Michael; Riedel, Andreas; Mayr, Andreas; Kühl, Alexander; Franke, Jörg: Process Reliable Laser Welding of Hairpin Windings for Automotive Traction Drives. In: Proceedings of International Conference on Engineering, Science, and Industrial Applications (ICESI): Tokyo. 2019
- [23] Ishigami, T.; Tanaka, Y. und Homma, H.: Motor Stator With Thick Rectangular Wire Lap Winding for HEVs. In: IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(4), S. 2917-2923
- [24] KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE: Flexible Fertigung von Elektromotoren für Fahrzeuge. Land fördert Projekt „AnStaHa“ am KIT mit 1,2 Millionen Euro – Forschung stärkt Zukunftsfähigkeit mittelständischer Unternehmen in Baden-Württemberg. Pressemeldung, 2017. Verfügbar unter: <https://www.wbk.kit.edu/3078.php>
- [25] Deutsches Institut für Normung, DIN 8586:2003-09, Fertigungsverfahren Biegeumformen. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [26] BMW Group Corporate Communications, Szene 1 von 6: E-Drive Component. [online] <https://www.press.bmwgroup.com/global/tvfootage/detail/PF0005720/bmw-group-prototype-production-edrivetrains/>. Letzter Zugriff: 30.07.2019.
- [27] Moore, Bill. GM's E-Motor Magic [online]. inFocus. EVWORLD.COM, 17. April 2013, 2013. Verfügbar unter: <https://web.archive.org/web/20130728235815/http://evworld.com/focus.cfm?cid=137>
- [28] Deutsches Institut für Normung. DIN EN ISO 7438, Metallische Werkstoffe - Biegeversuch. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [29] Michael Weigelt, Christian Fröschl, Michael Masuch, Andreas Riedel und Jörg Franke. Erkenntnisse aus der Biegesimulation von Flachdraht [online]. Draht, 10. Januar 2018, 69(1/2018), 18-22. Verfügbar unter: [https://www.drahtmagazin.de/draht-forschung/erkenntnisse-aus-der%C2%A0biegesimulation-von%C2%A0flach-draht\\_34752\\_de/](https://www.drahtmagazin.de/draht-forschung/erkenntnisse-aus-der%C2%A0biegesimulation-von%C2%A0flach-draht_34752_de/)
- [30] Andreas Riedel, Michael Masuch, Michael Weigelt, Tobias Gläsel, Alexander Kühl, Sebastian Reinstein und Jörg Franke. Challenges of the Hairpin Technology for Production Techniques. In: 2018 21st International Conference on Electrical Machines and

Systems (ICEMS): IEEE, 7. Oktober 2018 - 10. Oktober 2018, S. 2471-2476. ISBN 978-89-86510-20-1

- [31] Michael Weigelt, Andreas Riedel, Michael Masuch, Alexander Mahr, Tobias Gläsel und Jörg Franke. Potentials of an explicit finite element analysis of the bending processes for coated copper wires. In: 2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017, S. 1-5. ISBN 978-1-5386-1069-5