

Alexander Kühl

Flexible Automatisierung der Statorenmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik

Alexander Kühl

Flexible Automatisierung der Statorenmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik

Bericht aus dem Lehrstuhl für
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

FAPS

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 07. April 2014
Tag der Promotion: 30. Juli 2014
Dekan: Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker, RWTH Aachen

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten
sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISSN 1431-6226
ISBN 978-3-87525-367-2

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,
vorbehalten.
Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich
genannten Sonderfällen -, reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 2014
Herstellung: inprint GmbH, Erlangen
Printed in Germany

Flexible Automatisierung der Statorenmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik

Der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Alexander Kühl
aus Erlangen

Als Dissertation genehmigt von
der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 30.07.2014

Vorsitzende des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. habil. M. Merklein

Gutachter/in: Prof. Dr.-Ing. J. Franke
Prof. Dr.-Ing. A. Kampker

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein Dank gilt dem Leiter dieses Lehrstuhls, Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke und dem Gründer des Lehrstuhls, Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, die mir die Möglichkeit zur Promotion gegeben haben. Das entgegengebrachte Vertrauen, die wissenschaftlichen Freiräume und die vielen konstruktiven Anregungen förderten stets meine Forschungsarbeit. Darüber hinaus bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker und Herrn Prof. Dr. rer. nat. Lothar Frey für die Übernahme des Koreferats bzw. der Mitgliedschaft im Prüfungskollegium.

Ein sehr großer Dank gilt auch allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls FAPS, die im Laufe meiner Promotionszeit zu Freunden geworden sind. Die administrative, kaufmännische, technische und fachspezifische Unterstützung sowie die äußerst angenehme Arbeitsatmosphäre hat ganz entscheidend zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen.

Besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich während aller Phasen meines Lebens und meiner Ausbildung stets fördern, Rückhalt bieten und auch das Verständnis für Entbehrungen aufbringen.

Erlangen, im August 2014

Alexander Kühl

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielstellung	1
2	Verfahren zur Montage elektrischer Antriebe.....	3
2.1	Einzelprozesse zur Produktion elektrischer Antriebe.....	4
2.1.1	Prozesse zur Fertigung von Rotoren elektrischer Antriebe	5
2.1.2	Prozesse zur Fertigung von Statorn elektrischer Antriebe	6
2.1.3	Herausforderungen bei der Automatisierung der Statormontage.	13
2.2	Prozesszeiten bei der manuellen Montage von Statorn.....	15
2.2.1	Methoden zur Bestimmung manueller Arbeitszeiten	15
2.2.2	Analyse der manuellen Statormontage mittels MTM-UAS	18
2.2.3	Analyse der Wirtschaftlichkeit manueller Statormontage	22
2.2.4	Potential eines statorspezifischen MTM-UAS Prozessbausteins.	23
3	Ausarbeitung eines Systems für die robotergestützte Statormontage	26
3.1	Methodische Ausarbeitung der Prozesse zur automatisierten Statormontage	26
3.2	Kinematischer Aufbau unterschiedlicher Roboter	28
3.3	Methoden der robotergestützten Wicklungsmontage.....	29
3.4	Auswahl eines geeigneten Industrieroboters	30
3.5	Konzeptionierung einer Zelle zur flexiblen Statormontage.....	34
3.5.1	Übersicht der Komponenten der Zelle.....	34
3.5.2	Simulationsbasierte Planung der Zelle.....	36
3.5.3	Parameterbasierte Programmierung der Montagezelle	37
3.5.4	Ablauf der robotergestützten Statormontage	38
3.6	System zur robotergestützten Montage von Statorn.....	39

4	Gestaltung automatisierungsgerechter Vorrichtungen.....	40
4.1	Entwicklung einer robotergerechten Wickelschablone.....	40
4.2	Entwicklung einer spannzeitreduzierten Statoraufnahme	42
4.2.1	Zustandsanalyse der bestehenden Spannvorrichtung	42
4.2.2	Entwicklung von Lösungsalternativen zur Statoraufnahme.....	43
4.2.3	Komponenten der entwickelten Statoraufnahme	47
4.3	Vorrichtungen zur robotergestützten Montage von Statoren	49
5	Flexibel automatisierte Wicklungsmontage.....	50
5.1	Konzeption von Prozessen zur Montage von Wicklungen	50
5.1.1	Einräufeln von Wicklungen.....	50
5.1.2	Einziehen von Wicklungen	54
5.2	Material der Wicklung	57
5.3	Werkzeuge zur Montage von Wicklungen	57
5.3.1	Greifer zur Träufelmontage von Wicklungen.....	57
5.3.2	Greifer zum Durchziehen der angelegten Wicklung	59
5.3.3	Greifer für die Einziehmontage von Wicklungen	63
5.4	Automatisierte Montage von Wicklungen in den Stator	65
6	Robotergestützte Isolation von Wicklungen.....	67
6.1	Konzeptionierung von Prozessen zur Isolation der Wicklung	67
6.1.1	Montage von Deckschiebern.....	67
6.1.2	Substitution der Deckschieber	68
6.1.3	Imprägnierung von Wicklungen.....	68
6.2	Materialien zur Isolation der Wicklung	69
6.2.1	Anforderungen an Deckschiebermaterialien	69
6.2.2	Auswahl eines Materials zur Substitution des Deckschiebers.....	71

6.2.3	Auswahl eines Materials zur Wicklungsimprägnierung	76
6.3	Werkzeug zur Montage von Deckschiebern	77
6.3.1	Konzepte für ein Werkzeug zur Montage von Deckschiebern.....	78
6.3.2	Funktionsstruktur und Ausarbeitung des Montagewerkzeuges....	80
6.4	Werkzeug zur Substitution von Deckschiebern	84
6.4.1	Konzepte für ein Werkzeug zur Substitution der Deckschieber ...	85
6.4.2	Funktionsstruktur und Ausarbeitung des Dosierwerkzeuges	88
6.5	Integration des Imprägnierprozesses.....	91
6.6	Werkzeuge zur robotergestützten Isolation der Wicklung.....	92
7	Konzeptionierung anschließender Prozesse zur robotergestützten Statormontage.....	93
7.1	Kontaktieren der Einzelspulen	93
7.1.1	Handhabung der Wicklungsenden	93
7.1.2	Montagegerechte Ablage der Wicklungsenden.....	95
7.1.3	Werkzeuge für die robotergestützte Kontaktierung	96
7.2	Formen des Wickelkopfes	99
7.2.1	Konzepte für das robotergestützte Wickelkopfformen.....	99
7.2.2	Vorrichtung zur Formung von Wickelköpfen	100
7.3	CAD/CAM-Kette.....	101
7.3.1	Digitale Fabrik im Elektromaschinenbau	101
7.3.2	CAD/CAM-Kopplung zur robotergestützten Statormontage	103
7.3.3	3D-Kamerasysteme zur Überwachung des Prozesses	104
8	Evaluation und Projektierung des robotergestützten Montagesystems .	105
8.1	Methoden zur Analyse von Produktionssystemen	105
8.2	Darstellung der Einzelprozesse der Statorfertigung.....	107

8.2.1	Manuelles Montagesystem	107
8.2.2	Teilautomatisiertes Montagesystem.....	108
8.2.3	Vollautomatisiertes Montagesystem	109
8.2.4	Roboterassistiertes Montagesystem.....	109
8.3	Analyse der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Fertigungssysteme.....	110
8.4	Analyse der Prozessqualität der Statormontage.....	112
8.5	Analyse des Zeitbedarfs in der Statormontage.....	113
8.6	Simulative Optimierung des roboterassistierten Montagesystems	115
8.6.1	Vorbereitung des Simulationsmodells	116
8.6.2	Modellierung und Validierung der Simulation.....	117
8.6.3	Optimierung des roboterassistierten Montagesystems.....	118
8.7	Vergleich der verschiedenen Montagesysteme	120
9	Zusammenfassung	121
10	Summary.....	124
11	Abkürzungsverzeichnis	127
12	Literatur	128

1 Einleitung und Zielstellung

Der dänische Professor Hans Christian Ørsted beobachtete 1820 die Beeinflussung einer Magnethenkel durch einen stromdurchflossenen Leiter und initiierte damit die Forschung im Bereich des Elektromagnetismus [1]. Mit der Erfindung des Barlowschen Rads [2], welches mit Hilfe von Elektromagnetismus in eine Drehbewegung versetzt wird, existiert seit 1822 der erste Unipolarmotor [3]. In den vergangenen knapp 200 Jahren entwickelte sich der Elektromotor zu einer der wichtigsten Schlüsselkomponenten bei der Bewältigung der Megatrends der modernen Zeit [4]. Eine Konsequenz ist das kontinuierliche Wachstum in der globalen Produktion von Elektromotoren von erwarteten sechs Prozent jährlich bis in das Jahr 2020 [5]. Mit insgesamt 6,8 Milliarden US Dollar Exportvolumen liegt Deutschland im Bereich elektrischer Maschinen auf dem zweiten Rang hinter China [6]. Der wachsende Markt mit seinen immer breiter werdenden Anwendungsgebieten führt unweigerlich zu einer größer werdenden Anzahl von Varianten unterschiedlicher Leistungsklassen. Durch die erhöhte Individualität steigt auch die Komplexität der Montageprozesse. In Anbetracht der globalen Märkte stehen v.a. klein- und mittelständische Unternehmen aus Deutschland vor der Herausforderung, den Kunden wettbewerbsfähig mit spezialisierten Lösungen zu bedienen. Eine Lösung ist hierbei die Verlagerung von besonders aufwendigen manuellen Arbeitsinhalten, wie der Wicklungsmontage, in Länder mit geringerem Einkommensniveau. [7] [8]

In Süddeutschland, speziell in Bayern, herrscht eine heterogene Unternehmenslandschaft im Elektromaschinenbau. Großkonzerne, kleine und mittelständische Unternehmen sowie Handwerksbetriebe (133 zugelassene Handwerksbetriebe im Jahr 2010) teilen sich den Markt [9]. In diesem Spannungsfeld versuchen vornehmlich kleinere Betriebe ihre Marktposition durch eine kundenspezifische Fertigung zu sichern. Um hierbei die Variantenvielfalt zu beherrschen, ist die Entwicklung flexibler Montageprozesse wichtige Voraussetzung.

Da die Automatisierungslösungen bisher nur sehr starr realisiert werden, ist die geforderte Flexibilität meist lediglich durch die Erhöhung manueller Arbeitsanteile zu bewältigen. Manuelle Arbeitsprozesse sind jedoch nicht nur langsamer, sondern können oft auch qualitativ nicht mit automatisierten Prozessen Schritt halten. Eine Lösungsalternative zum Sondermaschinenbau, welcher lediglich auf statorspezifische Anlagen ausgerichtet ist, stellt die Integration automatisierter Roboterzellen in den Montagelinien dar. Freiheitsgrade durch Kinematiken mit bis zu 15 Achsen erlauben den Einsatz einer Zelle für diverse Montageoperationen. Die Investitionskosten liegen dabei unterhalb speziell entwickelter, unflexibler Sonderlösungen für einzelne Montageschritte, wie z.B. einer Flyerwickelmaschine (ca. 200.000 Euro Investitionsaufwand [10]).

Nach der Wahl der passenden Kinematik ist die größte Herausforderung die (Weiter-) Entwicklung von Werkzeugen und Vorrichtungen für die robotergestützte Montage. Die Verwendung vorhandener Werkzeuge automatischer Montagesysteme entfällt aufgrund der hohen Kosten und geringen Flexibilität. Die Nutzung der in der manuellen Montage eingesetzten Produktionsmittel hingegen setzt den Einsatz aller menschlichen Sinne voraus. Diese können daher zwar als Vorbild für eine automatisierte Lösung dienen, eine einfache Adaption an einen Roboter ist allerdings ausgeschlossen. Ein Beispiel stellen Träufelnadeln dar, die dem Werker das Einfädeln der Wicklung ermöglichen. Voraussetzung ist jedoch, dass die Arbeitskraft zunächst die biegeschlaffen Wicklungen mit seinen Augen erkennt, sie greift und anschließend an der Nut ausrichtet.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein robotergestütztes, flexibles Montagesystem vorgestellt, welches mit Fokus auf Variantenvielfalt und geringen Investitionskosten die Montage von Elektromotorstatoren automatisiert. Die Entwicklung der zugehörigen innovativen Montagetechnologien, -werkzeuge und -prozesse geht dabei mit der Systemplanung einher.

Neben der Einführung in die Prozesskette zur Montage von Asynchronmotoren werden in Kapitel 2 die Herausforderungen zur Automatisierung der manuellen Statormontage aufgeführt. Unter Anwendung einer technologischen und einer wirtschaftlichen Analyse mit Fokus auf den Prozesszeiten, kann das Optimierungspotential manueller Montagesysteme identifiziert werden. Nach der Beschreibung der fundierten Auswahl einer passenden Kinematik in Kapitel 3 wird in Kapitel 4 die Gestaltung von automatisierungsgerechten Vorrichtungen dargestellt. Die hier präsentierten Aufbauten ermöglichen durch genaue Positionierung von Material und Werkstücken eine kollisionsfreie und vorab kalkulierbare Bahnplanung. Die entwickelten Vorrichtungen sind flexibel einsetzbar und durch minimalen Aufwand zu rüsten.

Die größten Zeitanteile bei der Montage von Elektromotorstatoren stellen die Prozessschritte Einbringen der Wicklungen und Montage der Deckschieber dar. Im Rahmen der Kapitel 5 und 6 werden je zwei konzeptionierte Methoden und die entwickelten Werkzeuge für die robotergestützte Automatisierung dieser Prozesse vorgestellt. Um die Prozesskette der Statorfertigung zu schließen, werden im Kapitel 7 Lösungen für die Kontaktierung der Wicklungsenden und das Formen des Wickelkopfes aufgeführt.

Abschließend erfolgt in Kapitel 8 die Darstellung des projektierten Montagsystems, welches die entwickelten Einzelprozesse integriert. Unter Anwendung von Berechnungs- und Simulationsmethodiken werden die Analyse verschiedener Montagesysteme sowie deren Optimierungspotentiale aufgezeigt.

2 Verfahren zur Montage elektrischer Antriebe

Zur Einordnung der zu entwickelnden Montagetechnologien wird im folgenden Kapitel, nach einem kurzen Überblick über elektrische Antriebe, zunächst die entsprechende Produktionstechnik für Stator und Rotor dargestellt. Anschließend werden die Ergebnisse der Analyse der manuellen Montage von Statorn detailliert aufgezeigt.

Elektrische Maschinen sind Geräte zur Umformung elektrischer und mechanischer Energie, basierend auf den physikalischen Prinzipien der Elektrodynamik [11]. Die vielfältigen Topologien können grundsätzlich in ruhende, rotierende und Linearmaschinen oder weiterführend nach Art der Energieumformung, dargestellt in Bild 2.1, eingeteilt werden [12] [13].

Elektrische Maschinen				
elektrisch-elektrisch		elektrisch-mechanisch		
Transformator	Umformer	Kommutator		Drehfeld
Übersetzung von Strom, Spannung und Widerstand	Frequenzwandlung, variable Spannung ...	Gleichstrom	Wechselstrom	Transversalfluss-Asynchron-Synchronmaschine BLDC
		Reihenschlussmaschine		
		Nebenschluss-, Doppelschlussmaschine, Permanenterr.	Repulsionsmaschine, Kondensator-motor	rotatorisch
statisch		rotatorisch		linear

Bild 2.1: Elektrische Antriebe, gegliedert nach Art der Energieumformung

Rotierende elektrische Maschinen können als Motor (Umformung elektrischer in mechanische Energie) und als Generator (Umformung mechanischer in elektrische Energie) eingesetzt werden. Linearmaschinen hingegen werden fast ausschließlich als Motor betrieben. [13] Die drei Hauptbauformen rotierender elektrischer Maschinen sind die Drehstromsynchron-, die Drehstromasynchron- sowie die Gleichstrommaschinen. Die Hauptbestandteile einer rotierenden Maschine sind der feststehende Stator und der in der Ständerbohrung laufende Rotor (vgl. [14]). Je nach Typ sind Stator und Rotor unterschiedlich aufgebaut. Der in dieser Arbeit relevante Drehstromasynchronmotor besitzt einen Stator, bestehend aus einem Blechpaket und einer dreisträngigen Wechselstromwicklung [13] [14]. Dabei wird ein rotierendes Magnetfeld (Drehfeld) durch drei im Stator räumlich um 120° versetzt angeordnete Spulen erzeugt und an ein Drehstromnetz mit wiederum 120° phasenversetzten Wechselstrom angeschlossen. In dem erzeugten Drehfeld befindet sich ein Rotor, der keine elektrische Verbindung zum Stator besitzt und auch nicht über externe Klemmenanschlüsse verbunden wird [15].

Die Drehstromasynchronmaschine ist eine der wichtigsten elektrischen Maschinen im Bereich der Antriebstechnik. Es existieren Lösungen im so genannten Niederspannungs- (ca. 400 V) und Hochspannungsbereich (über 1000 V) mit einem Leistungsspektrum von einigen Watt bis zu mehreren Megawatt. Bei Kombination des Drehstromasynchronmotors mit einem Frequenzumrichter kann der Antrieb auch als drehzahlvariabler Antrieb verwendet werden. Größte Anwendungsargumente sind die geringe Wartungsanfälligkeit und die robuste Bauweise. [13] [14]

2.1 Einzelprozesse zur Produktion elektrischer Antriebe

Im Folgenden werden die Motorkomponenten sowie deren Montage anhand eines Asynchronmotors beschrieben. Der Drehstromasynchronmotor (Bild 2.2) besteht aus Stator und Rotor. Das Gehäuse, das Ständerblechpaket und die in dessen Nuten untergebrachte Ständerwicklung bilden den Stator. Auf die einzelnen Rotor-
komponenten wird in Kapitel 2.1.1 näher eingegangen.

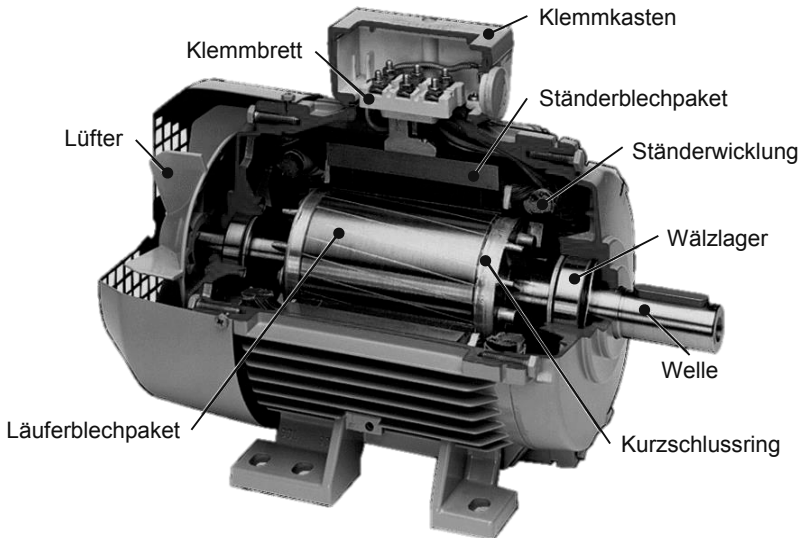


Bild 2.2: Schnittmodell eines Asynchronmotors (nach [16])

Der Lüfter führt die vom Motor erzeugte Wärme durch einen Luftstrom über das gerippte Gehäuse ab. Die drei Phasenanschlüsse der Ständerwicklung werden im Anschlusskasten am Klemmenbrett befestigt. Durch entsprechende Komponenten (Bremsen, Sensoren und verstärkte Lagerungen) kann das System für den Einsatz optimiert werden.

2.1.1 Prozesse zur Fertigung von Rotoren elektrischer Antriebe

Der Läufer eines Kurzschlussläufermotors besteht aus einer Welle, auf welche ein Paket von untereinander isolierten Elektroblechen geschoben wird. Das in der Serienfertigung übliche Verfahren zur Produktion der Bleche ist das Stanzen. Das Halbzeug ist zu einem Coil gewickelt und wird zur Minimierung der Schnittverluste in mehrere Bänder gespalten. Bei dünnen Blechen und kleinen Blechgrößen kann die gesamte Blechkontur in einem Arbeitsgang gestanzt werden, alternativ wird im Folgeschnittverfahren die Kontur der Bleche in mehreren Schritten produziert. In diesem Fall können einfache Werkzeuge verwendet werden, die sich nach Bedarf variieren lassen. In Bild 2.3 sind die einzelnen Schritte dargestellt. [17]

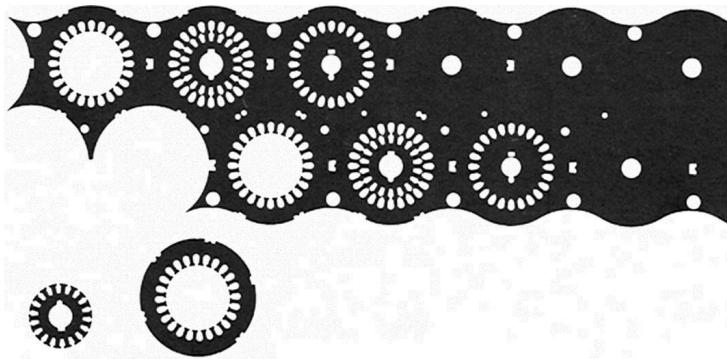


Bild 2.3: Folgeschnitt aus Spaltbändern [17]

Zunächst werden ein Zentrierloch und Löcher am oberen und unteren Rand, die zum Transport des Bandes dienen, gestanzt. Aus Materialspargründen sind die Ränder des Bandes schon an die Anordnung der Ausstanzungen angepasst, außerdem können Stator- und Rotorbleche gemeinsam ausgestanzt werden. Beim Stanzpaketieren drückt im letzten Stanzschritt der Stempel die Bleche durch das Werkzeug und stapelt diese auf Dornen. Alternative Verfahren sind beispielsweise das Laserschneiden oder die Bearbeitung mit einer Stanz-Nibbelmaschine. Nachdem die erforderliche Anzahl an Blechen auf einem Dorn gestapelt, gepresst und dann in einer Druckgießanlage in eine Gießform eingelegt wird, füllt die Aluminium- oder Kupferschmelze die Bohrung sowie die an den Stirnseiten des Blechpaketes gelegenen Kavitäten. Anschließend wird die Bohrung zur Aufnahme der Welle auf Maß gedreht, gegebenenfalls gehont und optional zur Verdrehsicherung eine Passfedernut geräumt (diese kann auch bereits im Stanzprozess erzeugt werden). Die Welle wird unter Erwärmung des Blechpaketes in dieses gedrückt. Abschließend wird der Läufer auf einer Richtbank bearbeitet, da es durch die Kräfte beim Eindringen zu Verformungen der Welle kommen kann.

Ergänzend kann zur Realisierung des Maßes des Luftspalts zwischen Läufer und Stator die Mantelfläche des Blechpaketes überdreht werden. Für einen vibrationsarmen Lauf des Motors ist zusätzlich die dynamische Wuchtung des Läufers möglich. Nach allen Prozessschritten erfolgt die Prüfung und Aufnahme der Maße und Toleranzen. [17] [18]

2.1.2 Prozesse zur Fertigung von Statorn elektrischer Antriebe

Die typischen Arbeitsgänge zur Montage des Stators, abgebildet in Bild 2.4, werden im Folgenden näher erläutert. Eine detailliere MTM-Analyse der Prozesskette ist in Kapitel 2.2.2 dargestellt. Die nötige Prozesszeit für das Einbringen der Deckschieber ist ablaufbedingt im Prozess Montieren der Einzelspulen berücksichtigt.

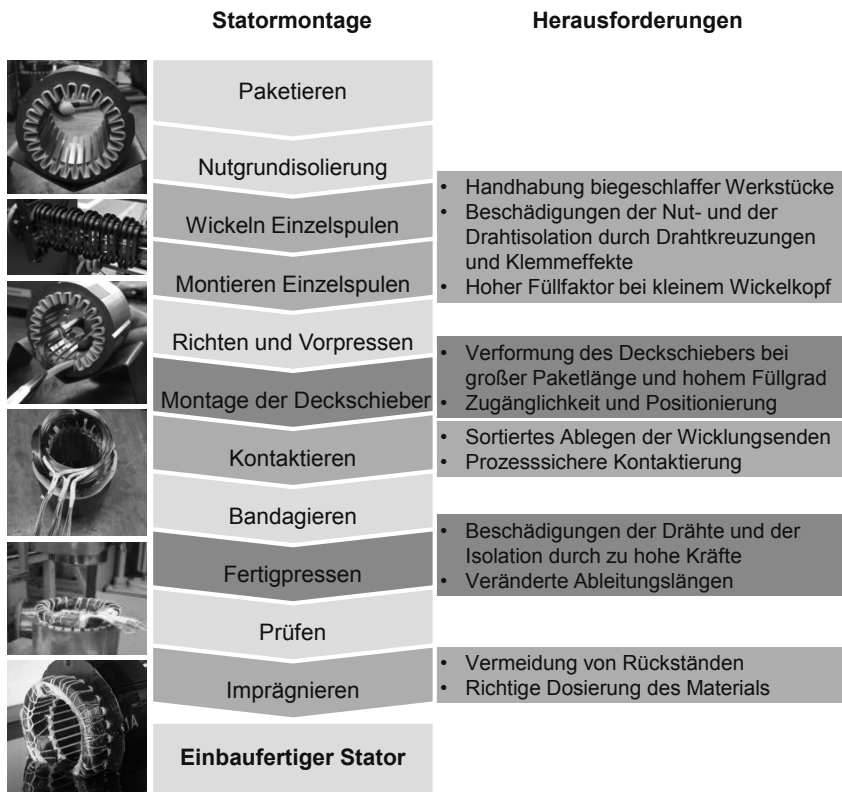


Bild 2.4: Prozesskette der Statorfertigung

Paketieren

Die Prozessschritte bis zum Einzelblech sind identisch mit denen des Rotors, erst in der Verarbeitung ergeben sich Unterschiede. Bleche, die nicht im Stanzpaketierverfahren weiter verarbeitet werden, sollten entgratet werden. Die einzelnen Bleche werden zur Vermeidung von Wirbelströmen im Paket, z.B. durch einseitige Lackierung, voneinander isoliert [18]. Beim Stanzen sollte daher der Stanzgrat auf der nicht lackierten Seite auftreten, damit dieser mit möglichst wenig Aufwand abgeschliffen werden kann.

Der Paketierprozess lässt sich über verschiedene Verfahren durchführen. Für Motoren, die in großer Serie gefertigt werden, bietet sich das Stanzpaketieren an. In einer Prozessvariante wird eine Durchsetzung geprägt, bei welcher während des Zusammenpressens des Blechstapels die nach außen geformte Durchsetzung in den Freiraum der zweiten Durchsetzung eingedrückt wird [18]. Die erreichte Kraft der Klemmverbindung ist so hoch, dass das Pakethandling möglich ist. Die endgültige Verbindung erfolgt anschließenden durch ein weiteres Verfahren, wie Nieten oder Schweißen. Eine weitere Variante ist das Stanz-Laser-Paketieren. [17]

Am weitesten verbreitet ist das Stanzen oder Laserschneiden der Einzelbleche, welche anschließend gestapelt und in der Regel durch Nieten, Schweißen oder Klammern verbunden werden. Die Bleche werden zunächst in kleine, um 180° verdrehte Pakete unterteilt, auf einem Dorn gestapelt, anschließend gepresst und gefügt. Bei dem alternativen Fügeverfahren glulock® der Firma Kienle + Spiess wird im Folgewerkzeug punktuell Klebstoff auf eine Seite des Bleches aufgetragen [19]. Auf weitere Verbindungsverfahren kann bei dieser Methode verzichtet werden. Der Stator muss jedoch in ein Motorgehäuse eingesetzt werden, um vor Scherbeanspruchung geschützt zu werden. Eine weitere Variante ist ein auf die einzelnen Bleche aufgetragener Backlack, welcher durch Wärmebehandlung der Bleche aktiviert wird. Beide Verfahren ermöglichen durch die fehlende Schweißnaht oder Klammer eine vollständige Isolierung der Bleche voneinander. [18]

Nutgrundisolierung

Zur Isolierung der im Betrieb thermisch stark belasteten Kupferdrähte gegenüber dem Blechpaket und der Nutausgänge wird zusätzlich zur Beschichtung der einzelnen Drähte eine Isolierung eingeschoben.

Beim automatisierten Prozess formt der Automat das Band, faltet die Isolationskragen, trennt es und schiebt es in die Nut ein. Qualitätsprobleme können auftreten, da die Grundisolation nicht fest mit dem Blechpaket verbunden ist. Der Kragen soll einerseits die Montagekräfte während des Einlegens der Wicklung aufnehmen, andererseits die Isolation mechanisch fixieren.

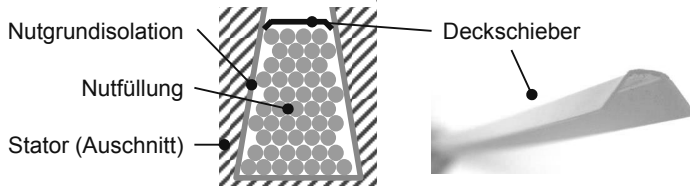


Bild 2.5: Lage der Grundisolation und des Deckschiebers in einer Nut

Montage der Wicklung

Für die Wicklungen wird in der Regel Kupferdraht verwendet. Dieser wird mehrfach durch Ziehsteine gezogen, bis der erforderliche Durchmesser, abhängig vom durchfließenden Strom, bis zu 0,01 mm erreicht ist. Zur Isolation durchläuft der verjüngte Draht anschließend wiederholt ein Lackbad. Bis zu 30 Lagen Polyester oder Polyesterimid können durch diesen Prozess auf den Draht beschichtet werden. Der anschließende Wickelprozess kann in Verfahrensschritte und Verfahrensvarianten eingeteilt werden. Der Gesamtvorgang lässt sich in die in Bild 2.6 dargestellten Schritte aufgliedern (die detaillierte MTM-Analyse ist in Kapitel 2.2.2 dargestellt):

Verfahrensschritte	Werkzeuge
Bereitstellen, Bevorraten, Lagern und Vorbereiten des Materials und der Werkstücke	<ul style="list-style-type: none"> • Ablängwerkzeug • Hubwerkzeuge
Wickeln der Einzelspulen	<ul style="list-style-type: none"> • Wickelschablone • Sicherungsklammern
Übertragen der Einzelspulen: Speichern, Umsetzen, Fügen, Positionieren	<ul style="list-style-type: none"> • Einträufelnadeln • Einziehwerkzeug
Umhüllen und Distanzieren der Wicklung	<ul style="list-style-type: none"> • Stabilisierendes und fixierendes Material
Formen und Festigen der Wicklungen	<ul style="list-style-type: none"> • Hammer oder Presse • Formkörper
Verbinden und ggf. Bandgieren der Wicklungen	<ul style="list-style-type: none"> • Bandagiernadeln • Fixierendes Material

Bild 2.6: Verfahrensschritte des Wickelprozesses [17]

Zunächst werden alle vorbereitenden Maßnahmen (Bereitstellung des Materials und der Arbeitsmittel, auftragsspezifische Einrichtung) durchgeführt. Im zweiten Schritt wird das Material aus dem Lieferzustand in den Ausgangszustand gewandelt. Beim Wickelprozess wird der Draht zu Spulen geformt.

Die hierfür nötige Relativbewegung zwischen Draht und Formkörper wird im maschinellen Fall durch ein geführtes Materialzuführsystem realisiert. Beim Übertragen werden die Einzelspulen von ihrem ursprünglichen Formkörper auf den endgültigen Trägerkörper transferiert. Automatisiert geschieht dies in der Regel durch Schablonen oder Speicherwerkzeuge. Im vierten Verfahrensschritt werden die Wicklungen komplett oder örtlich begrenzt von stabilisierenden, isolierenden und / oder thermisch belastbaren Bauteilen oder Materialien umhüllt. Verwendete Materialien können in Form von Pulvern (härtbare Harze), Granulaten (thermoplastisch) oder Flächenisolierstoffen (Papier, Folien, Gewebe oder Pressspan) eingesetzt werden und weisen besondere thermische (belastbar und / oder leitfähig), mechanische (stabilisierend) oder elektrische (Leitfähigkeit oder isolierend) Eigenschaften auf. [17] [20]

In Folge werden die Wicklungen, vor allem durch plastische Biegevorgänge, in die vorgegebene Form gebracht und verfestigt. Zum Schluss werden die Spulen schaltrechtlich verbunden. Je nach Verfahrensvariante werden einzelne Schritte ausgelassen oder getauscht. [17] [20]

Verfahrensvarianten

Das Rotationswickeln ist gekennzeichnet durch eine Relativbewegung zwischen Zuführung (in der Regel translatorisch) und Formkörper (in der Regel rotierend). Beim alternativen Flyerwickeln rotiert die Zuführung um einen feststehenden Formkörper. Beim Hub-Schwenk-Wickelverfahren wird das Blechpaket direkt, mit geschlossener Innenkontur, bewickelt. Die Drahtzuführung führt hierbei eine zyklische Folge alternierender Hubbewegungen aus und verlegt dabei windungsweise einen Draht. Eine weitere Variante ist das Umformen von Formspulen (oder -wicklungen) im Bereich der Spulenköpfe durch das sogenannte Formungsschrittverfahren. Unter dem Begriff Setzverfahren werden Varianten des Übertragens von vorgefertigten Spulen zusammengefasst. Dabei werden vorgewickelte Einzelspulen form- und kraftschlüssig in den Magnetkörper übertragen. [17]

Richten und Vorpressen

Als wichtiger Prozessschritt vor der Deckschiebermontage müssen die Drähte der Wicklung mit einem Nutstemmer möglichst beschädigungsfrei in die Nut gedrückt werden. Je nach Einsatzgebiet ist es außerdem erforderlich, im Bereich des Wickelkopfes durch Montage einer Phasenisolierung die verschiedenen Phasen elektrisch zu trennen.

Deckschieber einbringen

Bei der manuellen Vorgehensweise wird der Deckschieber von der Statorseite an der bereits mit Wicklung und Grundisolation bestückten Nut angesetzt und axial in die Nut eingeschoben [21]. Bei der Montage werden unter erhöhtem Kraftaufwand Windungen, die leicht aus dem Nutöffnungsschlitz ragen, in die Nut gedrückt.

Bei der teilautomatisierten Variante wird der Deckschieber zusammen mit den Windungen in die Nut gepresst (Bild 2.7 rechts). Das Werkzeug ist bereits mit den Deckschiebern und vorgewickelten Spulen bestückt.

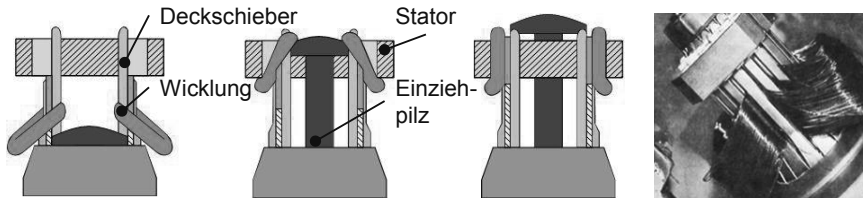


Bild 2.7: *Prinzipdarstellung der Phasen des Einziehens (links), Werkzeug zur gleichzeitigen Wicklungs- und Deckschiebermontage (rechts) [22]*

Nach definierter Positionierung des Stators schiebt der Einziehspitz die Wicklungen linear in die Nuten und zieht dabei die Deckschieber nach. Konische Geometrien und die Position der Drähte dienen als Führung für den Montageprozess und sind spezifisch auf die Kontur des Stators ausgelegt. [23]

In einer Offenlegungsschrift wird ein ähnlicher Prozess zur Deckschiebermontage beschrieben. Das Werkzeug besitzt jedoch eine andere Geometrie, welche die mechanische Belastung der Deckschieber verringert [22].

Eine weitere Möglichkeit stellt die einteilige Kombination aus Nutgrundisolation und Deckschieber dar (Bild 2.8 links). Das Kunststoffhohlprofil ist der Länge nach einseitig geöffnet und wird als Nutgrundisolation in die Nut eingelegt. Der Deckel wird nach der Wicklungsmontage geschlossen. [24][25]

Ebenfalls möglich ist die Montage mit Hilfe eines pistolenartigen Hilfsmittels zum axialen Einschieben des Deckschiebers. Von den magazinierten Deckschiebern wird der erste durch einen Stößel aus dem Werkzeug gedrückt, über eine Führungsbahn auf ein Querschnittsmaß kleiner als die Nutbreite verjüngt, an die Nut gesetzt und eingedrückt. [26]

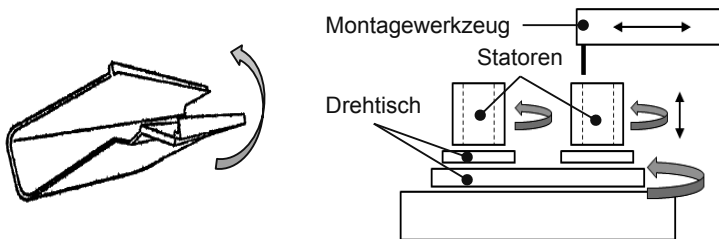


Bild 2.8: *Einteilige Nutisolation [24] (links); Drehtisch [27] (rechts)*

Ein weiteres flexibles Werkzeug stellt ein Drehtisch dar, der zwei um ihre Achse drehbare Statoren aufnehmen kann (Bild 2.8 rechts).

Nachdem das Werkzeug zur Montage den ersten Deckschieber in eine Nut gedrückt hat, dreht der Stator um einen Nutwinkel weiter. Ist der erste Stator komplett bestückt, wird der zweite Stator unter das Werkzeug bewegt. [27]

Unabhängig vom Verfahren gilt zusammenfassend, dass die Deckschieber starken mechanischen Montagebelastungen ausgesetzt sind, welche durch Werkzeuge reduziert werden müssen um ein Einreißen und damit das Risiko des Ausfalls des Stators zu minimieren.

Kontaktieren

Die Spulenden werden abisoliert, schaltrichtig verdreht und anschließend elektrisch kontaktiert. Beim Löten werden die Drähte über die Schmelztemperatur des Lotes erwärmt, so dass sich eine feste Verbindung zwischen Lot und Draht ergibt. Die Lötstellen werden durch Schläuche isoliert, phasensortiert (U, V, W) mit Kabelschuhen bestückt und in den Klemmenkasten des Motors montiert.

Die größte Herausforderung beim Kontaktierprozess (vgl. Bild 2.4) stellt die schaltrichtige Zuordnung (entsprechend Bild 2.9) der biegeschlaffen und undefiniert im Raum liegenden Spulenden dar, welche, ohne definierte Handhabung und Ablage der freien Wicklungsenden, nur manuell erfolgen kann. [17]

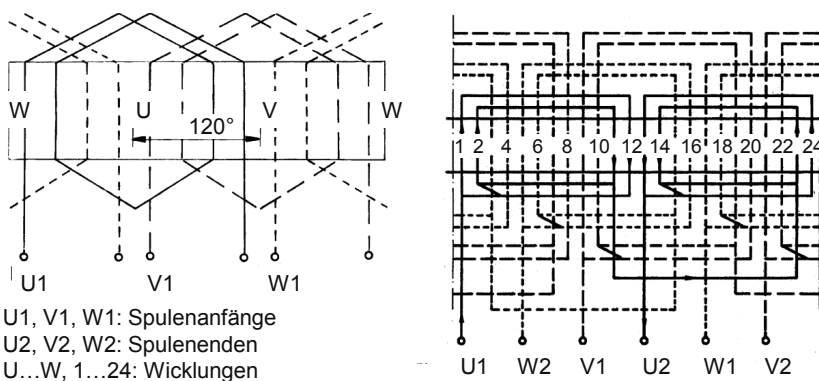


Bild 2.9: Zweipolige Wicklung mit Spulen gleicher Weite (links), vierpolige Wicklung mit konzentrischen Spulen (rechts) [28]

Abbinden, Bandagieren, Fertigpressen

Während des Betriebs muss auch der außerhalb der Nut liegende Wicklungsteil fixiert sein, um Kontakt mit dem Läufer zu vermeiden. Hierfür werden, bei im Einziehverfahren montierten Statorn, zunächst die Phasenanschlüsse angelegt und der Wickelkopf mit konischen Dornen vorgepresst.

Spulen, die in den Läuferbereich ragen, werden radial nach außen gedrückt, dabei verdichtet, zur Längsachse des Stators ausgerichtet und anschließend durch eine fortlaufend umschlingende Kordel bandagiert. Durch die schlingende Fadenumlenkung ergibt sich ein Reibschluss, welcher das Lockern des Fadens bis zur Verknotung verhindert. Zur Fadenführung wird eine gekrümmte Nadel aus Stahldraht verwendet. Nach dem Bandagieren werden die Wickelköpfe nochmals gepresst, um durch Minimierung von Hohlräumen eine gute Wärmeableitung zu gewährleisten und die vorgegebene äußere Form des Stators herzustellen. [17]

Prüfen

Nach den mechanisch beanspruchenden Prozessschritten muss der Stator zwischen Montage und Auslieferung auf Fehlerfreiheit geprüft werden. Einige Prüfprozesse für die Qualitätskontrolle von Wicklungen, wie die Teilentladungsmessungen nach IEC 60270 [29], die einfache Hochspannungsprüfung, die Stoßspannungsprüfung oder die Messung des Isolationswiderstandes, sind sowohl im Bereich industrieller Antriebe als auch im Automotive Sektor als Standard anerkannt. So gibt eine Teilentladungsmessung Rückschluss auf die Qualität der Wicklung: Bei ausbleibenden Teilentladungen handelt es sich um ein gutes Dielektrikum, im anderen Fall kann es durch die Bildung von Erosionskanälen zu einer Beschädigung des Isolierstoffes kommen, welche zu einem Durchschlag führen [30].

Imprägnieren

Durch das Einbringen eines Füllstoffes werden Hohlräume in den Nuten beseitigt und verschiedene Funktionen erfüllt [31]:

- Wärmeabfuhr aus den Nuten
- Erhöhung der Isolierfestigkeit
- Synthetisieren der Einzelwicklungen zu einem festen Körper
- Glimmererscheinungen vermeiden

Ziel ist hierbei die Erhöhung der elektrischen Festigkeit und damit die Verlängerung der Lebensdauer der elektrischen Maschine. Als Imprägniermittel kommen verschiedene Materialien zum Einsatz, die sich in Isolieröle, Isolierlacke und Isolierharze unterteilen lassen. Eine Prozessvariante ist das Eintauchen des vorgewärmten Stators in ein Tränklackbad. Die Prozesszeiten für das mehrmalige Tauchen liegen hierbei je nach Statorgröße bei bis zu 20 Minuten.

Beim Vakuumimprägnieren wird ein Unterdruckbehälter, in welchem sich der Stator befindet, evakuiert. Der hinzugegebene Imprägnierlack wird in dieser Atmosphäre in die Hohlräume gezogen. [17]

Stator in das Gehäuse setzen

Zuletzt wird der Stator in das vorgewärmte Motorgehäuse gepresst. Verkantungen und gequetschte Phasenanschlüsse müssen dabei vermieden werden. Zudem ist durch Flächenpressung, Verschweißen oder eine Schraubverbindung darauf zu achten, dass Stator und Gehäuse im Betrieb nicht zueinander verdrehen können.

2.1.3 Herausforderungen bei der Automatisierung der Statormontage

Eine wesentliche Aufgabe bei der Automatisierung von Prozessen ist die Planung der Automationstiefe. Bei der Montage von Statoren der Baugrößen IEC 112 bis IEC 250 [32] bestehen Lösungen der Umsetzung einzelner Prozesse (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Gängige Lösungen zur Prozessautomatisierung [10] [33] [34] [35]

	Automatisierte Prozesskette	Alternative Automatisierung der Einzelprozesse	
Nutgrund-isolieren <i>Anlagenkosten</i> <i>Werkzeugkosten</i>	Während des Einziehens	Nutgrund-isolierautomat <i>EUR 60.000</i> <i>EUR 25.000</i>	Pulverbeschichtung, Umspritzen oder Räumen <i>ab EUR 30.000</i>
Montieren der Wicklung <i>Anlagenkosten</i> <i>Werkzeugkosten</i>	Einziehautomat <i>EUR 740.000</i> <i>EUR 650.000</i>	Direktes Wickelverfahren <i>ab EUR 200.000</i>	Einziehverfahren <i>EUR 95.000</i> <i>EUR 25.000</i>
Richten und Vorpressen <i>Anlagenkosten</i> <i>Werkzeugkosten</i>	Während des Einziehens	Formpresse <i>EUR 30.000</i> <i>EUR 5.000</i>	
Montieren der Deckschieber	Während des Einziehens		
Kontaktieren <i>Anlagenkosten</i>	<i>nicht abgedeckt</i>	Kontaktieranlage <i>ab EUR 30.000</i>	
Abbinden	Wicklungsenden nach Einziehen ableiten		
Bandagieren <i>Anlagenkosten</i>	<i>Nicht abgedeckt</i>	Bandagiermaschine <i>EUR 30.000</i>	Alternative Isolationsscheibe <i>EUR 40.000</i>
Fertigpressen <i>Anlagenkosten</i> <i>Werkzeugkosten</i>	<i>Nicht abgedeckt</i>	Formpresse <i>EUR 40.000</i> <i>EUR 12.500</i>	

In vollautomatischen Linien werden die Prozesse Nutgrundisolieren, Wicklungsmontage, Richten und Vorpressen sowie Deckschiebermontage abgedeckt. Neben den hohen Anlagenkosten ist bei diesen Systemen die Werkzeugbeschaffung mit hohen Investitionskosten verbunden. Auch für die Automatisierung einzelner Prozessschritte bestehen Anlagen und Maschinen (Nutgrundisolierautomat, Wickelmaschinen, Formmaschinen, Kontaktier- und Bandagieranlagen).

Wie einleitend bereits beschrieben, bedingt die Verwendung manueller Werkzeuge den Einsatz der menschlichen Sinne. Der Werker ist durch seine visuellen und taktilen Fähigkeiten in der Lage, Gegenstände im freien Raum zu erkennen, die Bahnkurve seiner Arme zu berechnen, zu greifen, zu sortieren, zu manipulieren (Nachformen, Spannen oder Lage ändern) und in verschiedenen Einbausituationen feinmotorisch zu montieren.

Die Umsetzung einer robotergestützten Statormontage bedingt daher die Integration weiterer Sensorik, die Umstrukturierung bisheriger Prozessketten und eine flexible Programmierung.

Grundvoraussetzung ist hierbei eine saubere Ausrichtung des Montageobjektes (Blechkpaket) mit einer hohen Absolutgenauigkeit. Bisherige Lösungen [36] dienen als Montagehilfe lediglich zur Erleichterung der Arbeit. Eine genaue Positionierung oder Manipulation des Blechkpaketes ist nicht vorgesehen und für den manuellen Prozess auch nicht notwendig. Wichtiger ist der Aspekt der universellen Einsetzbarkeit: Blechkpakete verschiedener Länge und mit verschiedenen Durchmessern sollen ohne Tausch der Hilfsvorrichtungen an einem Arbeitsplatz fertigbar sein. Ebenso verhält es sich mit Schablonen zur Herstellung der Einzelspulen. Die Gestaltung dieser universellen Formkörper ist durch viele verschiedene Formelemente auf ein möglichst breites Spektrum verschiedener Spulengeometrien ausgelegt. Die geometrische Komplexität geht jedoch einher mit einer sehr schlechten Zugänglichkeit der Wicklung. Eine Programmierung von Kinematiken ist daher nur mit großem Aufwand realisierbar.

Die Handhabung der biegeschlaffen Wicklung stellt die größte Herausforderung dar. Sobald das zu handhabende Werkstück nicht mehr definiert geführt wird, muss die Lage und die Form neu erkannt werden. Die Detektion von freien Wicklungsenden mit einem Drahtdurchmesser von 0,5 mm - 1,0 mm bringt die moderne optische Messtechnik aufgrund der geringen geometrischen Abmessungen an ihre Grenzen. Um die Drähte, speziell die Isolationsschicht, während des Greifvorgangs nicht zu beschädigen, ist jedoch die Anfahrt genau berechneter Positionen wichtigste Bedingung. Auftretende Probleme sind dabei falsch positionierte Greifelemente, die durch Reibkontakte Windungen übereinander schieben. Unter Berücksichtigung der engen Toleranzen, die das Montageobjekt durch die kleinen Nutgeometrien vorgibt, wird das enorme Entwicklungspotential bei der Konzeption der Prozesse deutlich.

Aus Qualitätsgründen ist eine exakte Bahnplanung auch bei der Montage Bedingung für das beschädigungsfreie Einbringen der Wicklung in das Blechpaket, welches in den Bereichen des Nutanfangs und der Stege besonders scharfe Kanten besitzt. Ebenso bedeutend sind die sichere Fixierung und Führung der Wicklung durch die Aktoren. Nur eine ideal eingestellte Werkzeug / Material-Paarung ermöglicht einerseits ein prozesssicheres Greifen, andererseits aber auch ein reibungsfreies Freigeben des Drahtes.

Im Rahmen der Montage der biegeschlaffen Deckschieber kommen weitere Herausforderungen hinzu: Der Wickelkopf, wie auch aus der Nut ragende Wicklungen erschweren das Anfahren der Nut erheblich. Nach Erreichen der Montageposition muss der Deckschieber einerseits in den kleinen Bauraum zwischen Wicklung und Nutsteg eingefädelt werden, andererseits, um ein Abknicken zu vermeiden, kraftgeregelt über die Wicklung geschoben werden.

Die dargestellten Rahmenbedingungen stellen den Entwicklungsbedarf bei der Auslegung von Prozessen dar. Diese lassen sich grundsätzlich durch zwei Varianten lösen. Einerseits kann durch den Einsatz aktiver Sensorik, welche durch Kopplung mit der Robotersteuerung während des Prozesses die geplante Bahn manipuliert, auf Montagesituationen reagiert werden. Andererseits besteht die Möglichkeit durch vorherige Bahnplanung, welche zu jedem Zeitpunkt des Montageprozesses definierte Positionen von Material, Werkstücken und Montageobjekten voraussetzt, die Montage durchzuführen.

2.2 Prozesszeiten bei der manuellen Montage von Statoren¹

Ziel des folgenden Kapitels ist die Darstellung der ermittelten Einzelprozesszeiten der Statormontage, ausgehend von einem Blechpaket. Hierzu werden zunächst verschiedene Methoden gegenüber gestellt, eine davon ausgewählt und anschließend bei der Analyse der manuellen Prozesskette angewendet.

2.2.1 Methoden zur Bestimmung manueller Arbeitszeiten

Die Zeitwirtschaft hat aufgrund möglicher Rückschlüsse auf Wirtschaftlichkeit und Termintreue für Unternehmen eine hohe Bedeutung [37] [38]. Es bestehen verschiedene praktische und wissenschaftliche Methoden zur Bestimmung von Zeiten für Arbeitsprozesse. Die ermittelten Zeitdaten lassen sich dabei prinzipiell in Ist- und Sollzeiten unterteilen.

¹ Bei der Durchführung der Analyse der Arbeitszeiten wurde ich unterstützt von Herrn Florian Kubitschek.

Während sich die Istzeiten durch direkte Messung erfassen lassen, werden Sollzeiten durch Berücksichtigung von Einflussgrößen und Leistungsgraden aus den erfassten Istzeiten abgeleitet [39]. Aus den Sollzeiten können dann die Vorgabe- und Auftragszeiten definiert werden, welche nicht vorab bestimmbare Ablaufabschnitte berücksichtigen (z.B. Verteilzeiten) [38].

Die wichtigste Voraussetzung bei der Ermittlung von Istzeiten ist die Reproduzierbarkeit [40]. Die am weitesten verbreiteten Verfahren sind die Selbstaufschreibung, die Fremdaufschreibung (auch Zeitnahme nach REFA) [41], das Multimomentverfahren sowie das Befragen. Während beim Fremdaufschreiben ein ausgebildeter Zeitnehmer die Arbeitsabläufe misst, werden beim Selbstaufschreiben die Abläufe durch beteiligte Mitarbeiter (bzw. Betriebsmittel) nach Ausführung der Arbeit erfasst [39]. Die Methode der Selbstaufschreibung eignet sich sehr gut, sobald Arbeitsabläufe durch Fremdaufschreibung nur schwer erfassbar sind oder wenn Tätigkeiten noch nicht genau feststehen (z.B. bei Instandsetzungsaufgaben). [42]

Die Umsetzung der Methode geschieht über Tabellen, in denen Start- und Endzeitpunkte der Tätigkeiten eingetragen werden. Bei der Ermittlung durch Multimomentaufnahmen werden an Arbeitsplätzen in Stichproben Kurzzeitaufnahmen durchgeführt und die Tätigkeiten notiert. Das Verfahren eignet sich für die Erfassung von Verrichtungen, die nicht regelmäßig auftreten (Verteilzeiten oder Ausfälle) und im Falle der gleichzeitigen Beobachtung mehrerer Arbeitsplätze. Da jedoch keine Ursachen für aufgenommene Zeiten ermittelt werden, eignet sich das Verfahren nicht, um Vorgabezeiten zu ermitteln. [41] [43]

Eine Erfassung durch Befragung kann mündlich oder schriftlich erfolgen. Neben den Zeitdaten werden auch Verbesserungsprozesse und Mängel aufgedeckt. [42]

Weit verbreitete Methoden zur Ermittlung der Sollzeiten sind das Zusammensetzen, das Vergleichen und Schätzen sowie die Zeitaufnahme mit Leistungsbeurteilung nach REFA. Mit zuletzt genannter Methode erfolgt die Ermittlung der Sollzeit aus den gemessenen Istzeiten, multipliziert mit dem Leistungsgrad. Dieser berücksichtigt die Streuung der menschlichen Arbeitsleistung und berechnet sich aus dem Verhältnis der beeinflussbaren Istleistung zur vorgestellten Bezugsleistung, welcher die REFA-Normalleistung zugrunde liegt. Die Normalleistung kann von jedem eingearbeiteten und im erforderlichen Maße geeigneten und erhaltenen Mitarbeiter erbracht werden und basiert auf einer Bewegungsfolge, welche dem erfahrenen Beobachter natürlich sowie harmonisch erscheint [39]. Die Ermittlung des Leistungsgrades ist nur bei Bewegungsabläufen zu realisieren. Bei anderen Tätigkeiten werden die gemessenen, nicht nivellierten Istzeiten verwendet [44]. Vorteile des Verfahrens sind gleichzeitig entstehende Istzeiten, mit denen der aktuelle Leistungsstand beurteilt werden kann sowie das Aufdecken von Verbesserungspotentialen. Nachteilig ist, dass eine komplett objektive Beobachtung nicht möglich ist. Zudem besteht nur die Möglichkeit der Analyse an bestehenden Systemen. [40] [41]

Die Zeitermittlung nach der Methode des Vergleichens und Schätzens ermöglicht die Zeitnahme in frühen Phasen der Entstehung sowie bei Prozessen, bei denen Zeitmessung nicht möglich ist oder einen zu hohen Aufwand bedeutet. Ziel des Vergleichs ist dabei die Ermittlung eines dokumentierten Ablaufs, der mit dem Prozess, für welchen die Zeit zu ermitteln ist, am besten übereinstimmt. Aus diesem Vergleich lässt sich mittels Schätzen von Ab- und Zuschlägen die Sollzeit bestimmen. Die Schätzergebnisse können hierbei durch Methoden wie dem Zeitklassenschätzen oder der Delphi-Methode verbessert werden. [39] [44]

Beim Zusammensetzen werden Zeiten für manuelle Arbeitsabläufe durch eine Addition von Bewegungselementen berechnet. Es bestehen verschiedene sogenannte Systeme vorbestimmter Zeiten. Beim Methods-Time-Measurement-Verfahren (MTM) werden als beeinflussende Faktoren sowohl quantitative als auch qualitative Faktoren berücksichtigt. Beim Work-Faktor Verfahren hingegen werden lediglich quantitative Faktoren berücksichtigt. [42] [40]

Ziel der Verfahren ist neben der Zeitermittlung auch die Verbesserung oder Veränderung von Arbeitsbedingungen und Prozessen. Anwenden lassen sich diese Methoden sowohl auf existierende als auch auf noch nicht bestehende Prozesse (Planungsphase). [39] [44]

Das am weitesten verbreitete System ist MTM. Es basiert auf dem Aufgliedern des Arbeitsablaufes in Bewegungselemente. Diesen können definierte Werte aus der Normzeitkarte zugeordnet werden. Die Zeitwerte werden in Time-Measurement Units (TMU) angegeben (1 TMU = 1/100.000 Stunde). Es bestehen unterschiedliche Bausteinsysteme, die je nach Prozessstyp (Mengenfertigung, Serienfertigung und Einzelfertigung) und den Merkmalen Zyklus, Ablauf, Arbeitsplatz, Versorgung und Arbeitsweise ausgewählt werden. Beim MTM-1 Grundverfahren (basiert auf Prozessstyp 1 - Mengenfertigung) werden die Bewegungen in die Grundbewegungen Hinlangen, Greifen, Bringen, Fügen und Loslassen zerlegt. Der Grundzyklus wird bei einem Arm-Hand-System um die Elemente Drehen, Drücken und Trennen ergänzt. Zudem existieren Blickelemente sowie Körper-, Bein-, und Fußbewegungen. Die Bewegungselemente sind mit Zeiteinflussgrößen und Anwendungsregeln verknüpft. Zur Reduzierung des Analyseaufwands kann das MTM-1 Grundverfahren durch Kombination einzelner Grundbewegungen in Grundvorgänge zu anderen Bausteinsystemen weiterentwickelt werden. Diese sind das Universelles Analysier-System (UAS) und MTM für Einzel- und Kleinserienfertigung (MEK). Hierbei werden nicht mehr einzelne Bewegungsabläufe, sondern Aufgabensequenzen analysiert und in Grund- (wie Platzieren, Betätigen, visuelle Kontrolle) bzw. Standardvorgänge (wie Auspacken, Prüfen und Messen, Transportieren) gegliedert. [42] [45]

Für eine Analyse nach MTM muss das Arbeitssystem abgegrenzt und der Ablauf in sinnvolle Abschnitte gegliedert werden.

Im Anschluss werden die Grundelemente aufgelistet und Einflussgrößen ermittelt, die entsprechenden Zeitwerte zugeordnet und zur Ermittlung der Sollzeit addiert. [46]

Für die Auswahl der Methode ist grundlegend, dass der aufgenommene Prozess zur Montage von Statorn einerseits einen sehr hohen Anteil manueller Arbeitsprozesse beinhaltet, andererseits eine Zeitaufnahme nicht möglich war. Es eignet sich das MTM-Verfahren, auch aufgrund der weiten Verbreitung. Da die manuelle Fertigung von Statorn im Bereich kleiner bis mittlerer Stückzahlen angewendet wird, ist eine Bestimmung nach MTM-1 nicht zielführend. Bei bestehenden manuellen Fertigungssystemen werden begrenzt längere zyklische Bewegungsfolgen ausgeführt, bei denen die Arbeitsweise eine mittlere Streuung aufweist. Daher werden die vorgesehenen Methodenbausteine nach UAS (für Prozesstyp 2 – Serienfertigung) verwendet. [47]

2.2.2 Analyse der manuellen Statormontage mittels MTM-UAS

Für die Durchführung der MTM-UAS Analyse der manuellen Statormontage wurden Daten bei der Montage eines Stator (IEC 112/4.103 [32]) in einem mittelständischen Unternehmen aufgenommen. Das Vorgehen einer MTM Analyse mittels UAS ist in Bild 2.10 dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung des Bewegungsablaufes ist bei dieser Methode nicht notwendig.

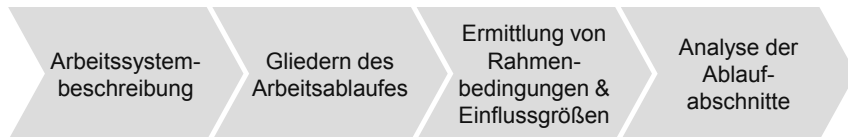


Bild 2.10: Vorgehen einer MTM-UAS Analyse [44] [46]

Im Rahmen der Arbeitssystembeschreibung wird die Arbeitsaufgabe detailliert beschrieben. Die Daten werden inklusive einer Skizze des Layouts des Fertigungssystems in ein entsprechendes Formblatt übertragen. Die Nummern im in Bild 2.11 abgebildeten Layout entsprechen den Prozessschritten und zeigen sowohl die Prozessreihenfolge als auch die Orte der einzelnen Arbeitsschritte auf.

Der Werker transportiert zunächst die gefalteten Nutgrundisolationen zum manuellen Arbeitsplatz. Anschließend wird das Blechpaket in einer Haltevorrichtung positioniert und die Nutgrundisolation eingedrückt. Im nächsten Schritt werden die Einzelspulen in drei Kammern gleichzeitig mit einer Linearwickelmaschine gewickelt, zum Arbeitsplatz transportiert und dort in das Blechpaket übertragen. Im folgenden Prozessschritt werden die Wickelköpfe mit einem Hammer und Formklotz vorgeformt, anschließend die freien Drahtenden schaltrichtig verdrillt und abgebunden. Nach der Bandage der Wickelköpfe werden die Phasenanschlüsse angeschweißt und abschließend erfolgt in einer Presse das Formen der Wickelköpfe.

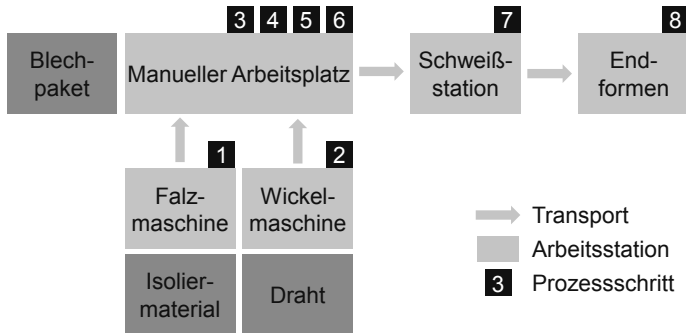


Bild 2.11: Layout des manuellen Fertigungssystems [47]

Bei der Gliederung des Arbeitsablaufes wird dieser in Abschnitte eingeteilt, die möglichst oft im Unternehmen wiederverwendet werden. Diese unternehmensspezifischen Bausteine werden ebenfalls in einem Formblatt dokumentiert. Im Fall der Statormontage entspricht die Gliederung den aufgeführten Prozessen.

Vor der Analyse müssen relevante Einflussgrößen und Rahmenbedingungen ermittelt werden. Hierzu zählen die Reihenfolge der Tätigkeiten, der Aufbau des Arbeitsplatzes oder auch Angaben zu Werkzeugen, Werkstücken (Eigenschaften des Blechpakets) und Vorrichtungen (Gewicht, Abmessungen,...). [46]

Auch die Rahmenbedingungen werden gegliedert nach beteiligtem Objekt, verrichteten Tätigkeiten und eingesetztem Hilfsmittel sowie den Prozessschritten erfasst. Tabelle 2.2 zeigt die erfassten Rahmenbedingungen für den Arbeitsschritt Wickeln der Einzelspulen.

Den ersten Schritt der abschließenden Analyse stellt die Aufteilung der Einzelprozessschritte in Teilabschnitte dar, so dass Grund- bzw. Standardvorgänge des UAS-Bausteins beschrieben werden können. Unter Beachtung der ermittelten Anwendungsregeln und Rahmenbedingungen (z.B. Entfernungen, Kräfte, Genauigkeiten) können die Zeitwerte aus der Normwertzeitkarte bestimmt werden.

Durch Multiplikation und Addition der Einzelzeiten wird die Gesamtzeit des Ablaufabschnitts bestimmt [44]. Tabelle 2.3 stellt die Analyse für das Wickeln der Einzelspulen dar.

Die Einzelprozesszeiten sind in Bild 2.12 dargestellt. Bei insgesamt 73423 TMU ergibt sich eine Gesamtprozesszeit von 49 Minuten für die manuelle Montage eines Stators. Mit 21 Minuten stellt das Einlegen der Einzelspulen und der Deckschieber den zeitaufwendigsten Prozessschritt dar.

Tabelle 2.2: Arbeitsblatt zum Erfassen der Rahmenbedingungen für den Ablaufabschnitt Wickeln der Einzelspulen (nach [44]) [47]

Objekt	Verrichtung	Hilfsmittel	Entfernungsbereich	zusätzlicher Weg [m]	Zugänglichkeit	Gewicht/Dimension	Platziergenauigkeit	Anzahl/Verbaureate	Teile gleichzeitig	Prozesszeit [TMU]	Bemerkung
Was?	Wie?	Womit?									
Spulen	Gang zur Wickelmaschine	ohne		9				6			
	Wickelprozess	ohne						6		1389	Es werden Dreifachspulen gewickelt
	Anbringen der Sicherungskammern	ohne	2		A (\cong bis 1kg)	A (\cong bis 1kg)	L (\cong lose)	36			Standardvorgang M-CEA "Eindrücken von Clips ohne Ausrichten"
	Transport der Spulen zum AP und Ablegen am AP	ohne	2	9				6			

Tabelle 2.3: Prozessbausteinanalyse des Wickelns der Einzelspulen [46] [47], mit A für die Anzahl und H für die Häufigkeit

Nr.	Bezeichnung	Code	TMU	A x H	Gesamt TMU
1.	Transport der Spulen	BA	25	9 x 12	2700
2.	Maschinenzeit	-	1389	6 x 1	8333
3.	Aufnehmen der Spulen und ablegen	AA1	20	6 x 3	360
4.	Anbringen der Sicherungskammern	M-CEA	75	6 x 6	2700
				Summe	14093
				in min	8,5

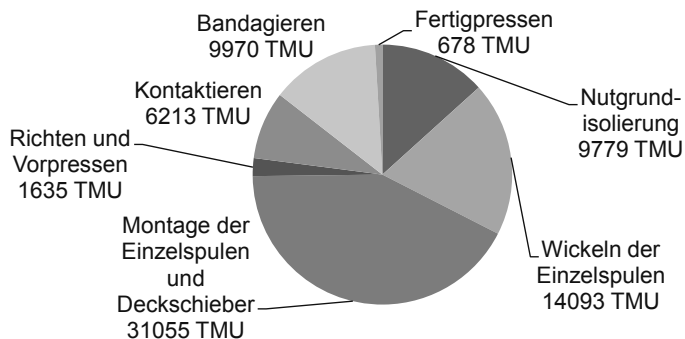


Bild 2.12: Zeiten der Einzelprozess in der Statormontage nach MTM-UAS

Für die Ermittlung der Zeit je Einheit müssen zudem Verteilzeiten (pauschal 12%) sowie Rüstzeiten berücksichtigt werden. Die Rüstzeiten werden durch Messung und Mitarbeiterbefragung auf insgesamt 6 Minuten festgelegt.

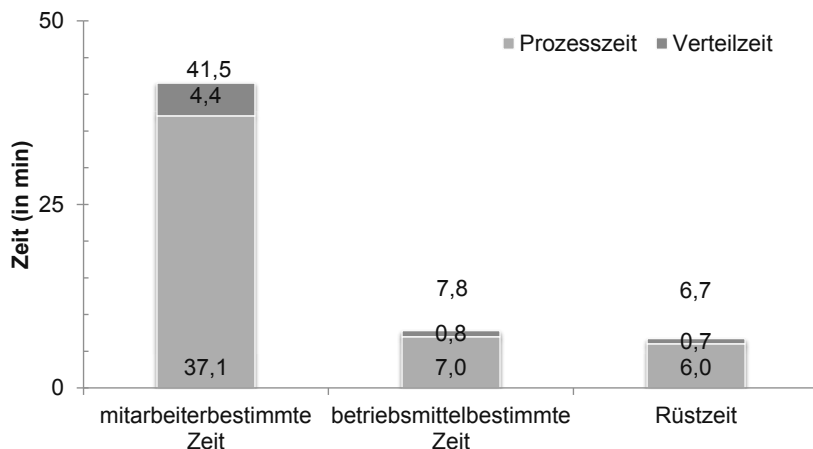


Bild 2.13: Verteilung der Gesamtprozesszeit bei der Statorenmontage [47]

Die Ergebnisse der MTM-Analyse konnte durch Ermittlung der Zeiten einer Musterfertigung in einem mittelständischen Unternehmen verifiziert werden. Als insgesamt aufwendigster Prozess hat sich die Fertigung und Montage der Wicklungen herausgestellt. Durch eine flexible Automatisierung dieses Schrittes kann insbesondere die mitarbeiterbestimmte Zeit bei der Produktion von Statoren deutlich gesenkt werden.

2.2.3 Analyse der Wirtschaftlichkeit manueller Statormontage

Zur Analyse der Wirtschaftlichkeit der manuellen Montage, speziell der Einzelprozesse, kommt eine kostenorientierte Analyse zum Einsatz. Auf Basis der bereits ermittelten Zeiten erfolgt das Vorgehen zur wirtschaftlichen Bewertung von Prozessketten wie in Bild 2.14 beschrieben. Berücksichtigt werden die entstehenden Gesamtkosten pro Periode, in diesem Fall die Kosten eines Jahres. Rahmenbedingungen für die Analyse bilden 200 Arbeitstage pro Jahr in einem zwei-Schicht-Betrieb mit je acht Arbeitsstunden. Die Gesamtprozesszeit für einen Stator liegt bei 49,3 min (vgl. Kapitel 2.2.2), für die kalkulierten Materialkosten werden 58,00 Euro veranschlagt. Jedes Montagesystem kann von fünf Mitarbeitern genutzt werden und besteht, nach Bild 2.11, aus den vier Anlagen Wickelmaschine, Falzmaschine, Schweißgerät und Wickelkopfpresse. Die Gesamtkosten setzen sich zusammen aus den Einzel- und den Gemeinkosten. [48]

Im Fall der manuellen Statorfertigung haben die mitarbeiterbestimmten- und die maschinenabhängigen Kosten (Maschinen und Werkzeuge) den höchsten Einfluss.

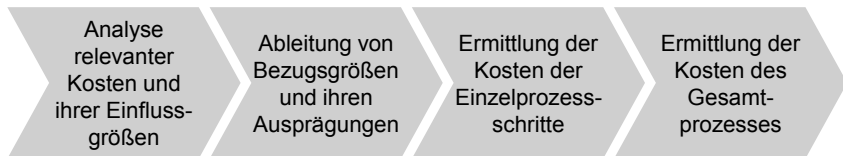


Bild 2.14: Vorgehen zur wirtschaftlichen Bewertung von Prozessketten [49]

Beide werden von der Ausbringungsmenge beeinflusst, daher werden diese als Bezugsgrößen festgelegt. Anhand dieser Bezugsgrößen werden anschließend die Kosten der Einzelprozessschritte berechnet. Für die Berechnung der maschinenabhängigen Kosten bietet sich die Maschinenstundensatzrechnung an. Der Maschinenstundensatz setzt sich zusammen aus der jährlichen Summe der kalkulatorischen Abschreibungskosten, kalkulatorischen Zinskosten, Raumkosten, Energiekosten und Instandhaltungskosten, bezogen auf die jährliche Lastlaufzeit [50].

Für die Berechnung der prozessspezifischen Personalkosten wird der Personalkostensatz berechnet, der den Stundensatz auf eine Minutenbasis umrechnet. Die Einzelprozesskosten errechnen sich dann nach Formel 2.1:

$$K_{EP(\text{Stück})} = \frac{K_P + K_M + K_{WZ}}{N} \quad (2.1)$$

mit K_{EP} : Einzelprozesskosten, K_P : Personalkosten,

K_M : Maschinenkosten, K_{WZ} : Werkzeugkosten und N : Ausbringungsmenge

Im letzten Schritt wird für die Ermittlung der Kosten der Gesamtprozesskette die Summe der Einzelprozesskosten und die bisher nicht berücksichtigten Gemeinkosten (z.B. Arbeitsplatzausstattungen, Materialkosten, Instandhaltungskosten, Rüstkosten und Ausschusskosten) gebildet.

Bei einer Produktionsmenge von 1.000 Statorn pro Jahr betragen die Gesamtkosten 87.911 Euro. Davon entfallen 58.000 Euro auf Materialkosten und 25.886 Euro auf die Einzelprozesskosten. Die prozentuale Verteilung der Kosten der Einzelprozesse ist in Bild 2.15 dargestellt. Mit mehr als 14 Euro werden 56% der Stückkosten durch die Prozessschritte Wickeln und Deckschiebermontage verursacht. Die Tatsache, dass gerade beim Einlegen der Spulen nur Personalkosten in die Berechnung einfließen, unterstreicht die große Bedeutung dieser Prozessschritte. [47]

Eine einleitend erwähnte [7] Verlagerung dieser Tätigkeiten in Länder mit einem fünffach kleineren Einkommensniveau [8] führt in diesem Fall zu einer Ersparnis bei den Montagekosten von bis zu 40%.

Berücksichtigt werden müssen in diesem Fall jedoch die mit der Qualifizierung der Mitarbeiter verbundene höhere Ausschussrate und auch Logistikkosten, die je nach Losgröße die reduzierten Montagekosten ausgleichen.

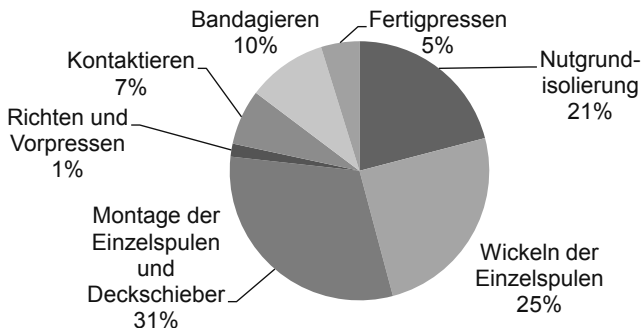


Bild 2.15: Verteilung der direkt zurechenbaren Kosten auf die Einzelprozesse

Zur Einordnung dieser Kosten erfolgt in Kapitel 8.3 der wirtschaftliche Vergleich manueller zu teilautomatisierten, automatisierten und flexibel automatisierten Montagesystemen.

2.2.4 Potential eines statorspezifischen MTM-UAS Prozessbausteins

Die detaillierte Analyse der Prozessschritte stellt bereits vor der Fertigung des ersten Stators die Zeit- und Wirtschaftlichkeitsdaten bereit.

Der Analyseaufwand kann durch Einsatz des UAS-Verfahrens, welches einzelne Grundbewegungen kombiniert, deutlich reduziert werden. Statt Bewegungsabläufen werden, unter Beachtung von Rahmenbedingungen und Einflussgrößen, entsprechende Aufgabensequenzen näher betrachtet und anschließend Grundvorgänge definiert. Aus diesen werden zur weiteren Verdichtung die Standardvorgänge (z.B. Auspacken, Markieren, Prüfen) definiert.

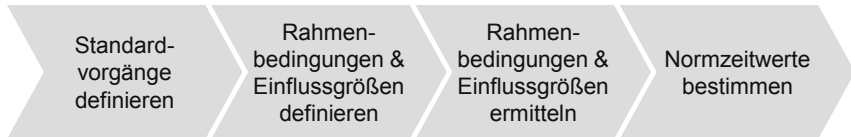


Bild 2.16: Vorgehen zur Erstellung eines MTM-UAS Statorbausteins

Dennoch ergeben sich bei der Analyse einzelner Prozessschritte (z.B. das Bandagieren des Wickelkopfes) große Formblätter mit Aufsummierungen von Zeiten. Zur Erhöhung der Analysegeschwindigkeit ist die Einführung von spezifischen Standardvorgängen (Statorvorgänge) als ergänzender Baustein für das MTM-UAS Verfahren notwendig. Hierfür werden zunächst Standardvorgänge definiert. Im Fall der Statormontage empfiehlt sich die Aufgliederung nach den Prozessschritten. Im nächsten Schritt müssen Rahmenbedingungen und Einflussgrößen definiert werden. In Tabelle 2.4 sind maßgebliche Einflussgrößen dargestellt. Neben den Eigenschaften des Stators bezüglich Geometrie und Gewicht sind Prozesseigenschaften und die geforderten Genauigkeiten relevant.

Tabelle 2.4: Rahmenbedingungen und Einflussgrößen auf die Statormontage

Geometrie des Stators	Statorlänge	
	Statordurchmesser	
	Abstand zwischen den Arbeitsstationen	
	Zugänglichkeit	
	Anzahl, Form und Geometrie der Nuten	
Gewicht- / Kraftaufwand	Gewicht des Stators	
	Gewicht der Werkzeuge	
Aufnehmen	Leicht	Allein liegender Gegenstand
	Schwierig	Vermischt liegender Gegenstand
	Hand voll	Gehäufte / gestapelte Gegenstände
Platziergenauigkeit	Ungefähr	Spiel größer 12 mm oder gegen Anschlag
	Lose	Spiel kleiner 12 mm, ohne Druck und / oder erkennbarer Verzögerung am Ziel
	Eng	Spiel kleiner 12 mm, mit Druck und / oder erkennbarer Verzögerung am Ziel

Anschließend werden den Größen quantitative Werte hinterlegt, z.B. durch eine Einteilung nach Statorgewicht. Aus dieser Einteilung werden die Normzeitwerte durch eine einmalige MTM UAS Berechnung generiert. Als Beispiel ist der Statorvorgang „Nutgrundisolation einlegen“ in Tabelle 2.5 dargestellt. Für diesen Vorgang sind die Einflussgrößen Statorgewicht (Positionieren des Stators), Statorlänge (Bewegung Nutgrundisolation einlegen) sowie die Nutform inkl. Anzahl der Nuten maßgebend.

Hieran anschließend ist die Überführung des Prozessbausteins in einen Netzwerkbaustein der Software Plant Simulation möglich. Mit Hilfe dieser objektorientierten Software zur Simulation von Abläufen können verschiedene Grundbausteine angelegt oder importiert werden, z.B. auch Systeme vorbestimmter Zeiten. Hierfür existieren 15 Grundbausteine (z.B. Greifen, Bringen, Gehen und Hinlangen), die einen Prozess über die entsprechende Aneinanderreihung im Netzwerk nachbilden. Diese Netzwerke können gespeichert und anschließend als Netzwerkbaustein in ein neues Netzwerk integriert werden. [51]

Nach diesem Prinzip ist auch die Programmierung und Integration der definierten MTM-UAS-Statormontage-Bausteine in einen Plant Simulation Baukasten eine zielführende Erweiterung. Durch eine parametrisierte Auswahlmaske können Prozesszeiten vorab aufwandsarm ermittelt werden.

Tabelle 2.5: Normzeitkarte für den Statorvorgang Nutgrundisolation einbringen

		Nutform	Trapez		Oval		Rechteckig	
		Nutzanzahl	24	36	24	36	24	36
Code	Statorgewicht	Statorlänge						
NI1	≤ 1kg	≤ 200 mm	6667	9699	6307	9339	6667	9699
NI2		> 200 mm	6847	9879	6487	9519	6847	9879
NI3	>1 bis ≤ 8kg	≤ 200 mm	6692	9724	6332	9364	6692	9724
NI4		> 200 mm	6872	9904	6512	9544	6872	9904
NI5	>8 bis ≤ 22kg	≤ 200 mm	6748	9779	6388	9419	6748	9779
NI6		> 200 mm	6928	9959	6568	9599	6928	9959

Die vollständige Definition der Einflussgrößen und die Berechnung aller Statorvorgänge sowie die softwaretechnische Umsetzung stehen noch aus. Das Potential des konzeptionierten Statorbausteins ist jedoch für die betriebswirtschaftliche Planung eines neuen Produkts enorm.

3 Ausarbeitung eines Systems für die robotergestützte Statormontage

In der Automatisierungstechnik ist der Einsatz von Robotern ein zentrales Thema. Seine Aufgaben beziehen sich dabei auf Gebiete, die einerseits von Werkern nur bedingt oder gar nicht durchführbar sind und andererseits den Menschen unterstützen. Im Rahmen des folgenden Kapitels werden zunächst unterschiedliche Kinematiken und Prozesse für eine robotergestützte Automatisierung im Bereich des Elektromaschinenbaus aufgezeigt. Nach einer begründeten Auswahl einer Roboterkinematik erfolgt die Darstellung der Komponenten des im Rahmen dieser Forschungsarbeit aufgebauten Demonstrationssystems.

3.1 Methodische Ausarbeitung der Prozesse zur automatisierten Statormontage

Die Konzeptionierung des Montageprozesses sollte zur Sicherung der Produktqualität und Verbesserung des Montageablaufs idealerweise parallel zur Konstruktion des Montageobjektes erfolgen [52]. Der grundsätzliche Ablauf bei der Ausarbeitung der Montage ist in Bild 3.1 beschrieben. Die verschiedenen Phasen können dabei iterativ durchlaufen werden.

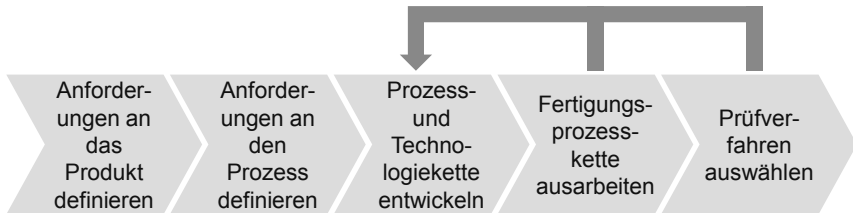


Bild 3.1: Prozessschritte der Montageprozesskonzeptionierung [52]

Zunächst sind die Anforderungen an den Prozess zu definieren. Diese lassen sich aus den Eigenschaften und den Anforderungen des Montageobjektes ableiten. Beispiele dafür sind die Statorgeometrie, das Wickelbild und die verwendeten Materialien. Aus diesen Rahmenbedingungen werden die Technologien und Prozessvarianten zur Statormontage ermittelt sowie die entsprechenden Prozesse und Werkzeuge entwickelt. Diese Konzeptionierung erfolgt analog zur in Bild 3.2 dargestellten Konstruktionsmethodik nach Pahl / Beitz [52]. Diese setzt sich aus den Schritten Planen, Entwerfen, Konzipieren und Ausarbeiten zusammen. Aus den Rahmenbedingungen der Montageaufgabe werden die Anforderungen an Prozess und Werkzeug abgeleitet. Diese werden in Festforderungen und tolerierte Forderungen eingeteilt.

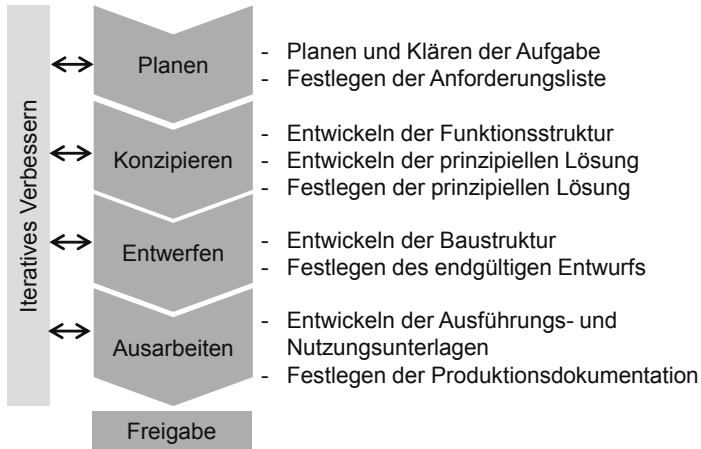


Bild 3.2: Konstruktionsmethodik nach Pahl / Beitz [52]

Es folgt die schrittweise Entwicklung der Gesamtlösung durch Untergliederung der Aufgabe in Teilfunktionen. Für die Einzelfunktionen werden Wirkprinzipien ermittelt und verschiedene Varianten von Teillösungen entwickelt und die am besten geeignete konkretisiert. Nach anschließender Bewertung wird die Gesamtlösung bestimmt und innerhalb der Entwurfsphase ausgearbeitet. Der Entwurf findet iterativ statt und lässt sich in die Arbeitsschritte Grobgestalten, Feingestalten, Vervollständigen und Kontrollieren unterteilen. Hierbei entsteht zunächst die Baustruktur. Die einzelnen Funktionsstrukturen werden zu einem Gesamtentwurf zusammengefasst, welcher anschließend auf Funktion und räumliche Verträglichkeit geprüft werden kann. Im letzten Schritt erfolgt die Ausarbeitung. [52]

Vor Ausarbeitung der Prozesskette ist zunächst die Verträglichkeit zwischen Fertigungskonzept und Stator zu prüfen. Wichtigstes Kriterium ist hierbei die Eignung des Montageverfahrens für die Statornmontage (z.B. bezüglich der zu handhabenden Drähte, der Nutbreite, des Statordurchmessers). Weitere wichtige Punkte sind die Analyse der Zugänglichkeit für die Werkzeuge und die Fragestellung, ob die verwendeten Werkstoffe alle Anforderungen (z.B. Isolierung) erfüllen können. Entstehen hierbei Widersprüche, müssen die im vorhergehenden Prozessschritt entwickelten Technologien überdacht werden. Bestehen keine Hindernisse zum Einsatz der Verfahren, kann die Prozesskette ausgearbeitet werden. Hierfür werden den einzelnen, ausgewählten Prozessen Werkzeuge und Anlagen zugeordnet und die Parameter festgelegt (z.B. Statordurchmesser, Anzahl der Nuten und Montagekräfte). [53]

Im letzten Schritt werden passende Prüfverfahren ausgewählt (z.B. optische oder elektrische). Neben dem Produkt soll hier auch die Prüfung der Prozesse geplant werden. Beim Auftritt von Diskrepanzen müssen die entwickelten Technologien nochmals überarbeitet werden. Als Resultat der methodischen Ausarbeitung liegen, neben den Fertigungsunterlagen, auch die vollständige Prozessdokumentation sowie Betriebsmittel und Werkzeuge vor.

3.2 Kinematischer Aufbau unterschiedlicher Roboter

Industrieroboter gelten als Handhabungsgeräte [54]. Handhaben ist nach VDI-Richtlinie 2860 definiert als „das Schaffen, definiertes Verändern oder vorübergehendes Aufrechterhalten vorgegebener räumlicher Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern“ [55]. Der Einsatz kann hierbei sowohl wirtschaftliche, als auch technische Ziele verfolgen. Technisch ist v.a. die, gegenüber dem manuellen Werker, hohe Leistungsfähigkeit (keine Ermüdung, Handhabung hoher Lasten, Genauigkeit, Wiederholgenauigkeiten...) zu nennen. Ein weiterer Grund ist die Einsatzmöglichkeit in Umgebungen, die für Menschen gesundheits- oder sicherheitsgefährdend sind, z.B. bei Lackieraufgaben oder der Begutachtung von Schäden in zerstörten Kernkraftwerken [56]. Angesichts steigender Lohnkosten stellt die Möglichkeit die Ausbringungsmenge durch Robotereinsatz zu steigern, einen wichtigen wirtschaftlichen Faktor dar. [57] [58]

Tabelle 3.1: Vergleich verschiedener Kinematiken [59] [60] (Abbildungen [61])

Portalroboter	Schwenkarmroboter (SCARA)	Knickarmroboter	Parallelkinematik
			
<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Programmierung • Hohe mechanische Belastbarkeit • Großer Arbeitsraum 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Fügekräfte möglich • Hohe Genauigkeit • Hohe Verfahrensgeschwindigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringer Platzbedarf • Hohe Gelenkigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr hohe Verfahrensgeschwindigkeiten • Hohe Genauigkeit • Hohe Beschleunigungen

Die unterschiedlichen Einsatzgebiete und Aufgaben, sowie die daraus resultierenden Arbeitsräume haben zur Ausprägung verschiedener Bauarten von Industrierobotern geführt, welche in Tabelle 3.1 dargestellt werden.

Ein Roboterprogramm ist „eine Folge von Steuerbefehlen, die den Industrieroboter veranlassen, eine Aufgabe zu erfüllen“ [54]. Die Aufgabe des Bedieners ist es daher aus der Bewegungsaufgabe Sequenzen zu erstellen und diese als Steuerbefehle zur Verfügung stellen. Die verschiedenen Programmierverfahren lassen sich in Online- (direkte Programmierung) und Offline-Verfahren (indirekte Programmierung) unterteilen. Während bei der Programmierung direkt am Roboter dieser seine Arbeit unterbrechen muss (je nach Komplexität der Aufgabe mehrere Arbeitstage), ist die Anlage bei einer Offline-Programmierung voll einsetzbar. [58]

3.3 Methoden der robotergestützten Wicklungsmontage

Die aktuellen Marktanforderungen, wie steigender Kostendruck, kleine Losgrößen und flexiblere Produktion, sind mit den klassischen Wicklungsmethoden aufgrund der widersprechenden Ziele nur sehr schwer zu bewältigen [62].

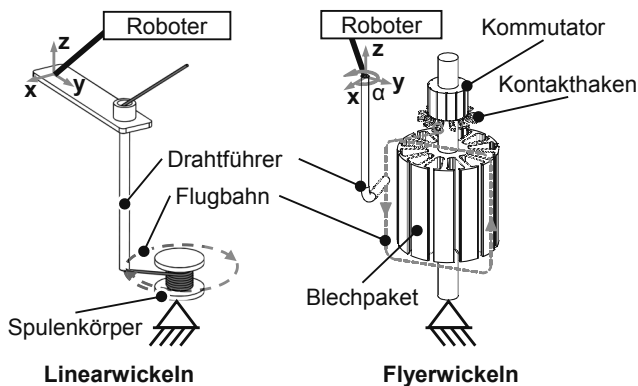


Bild 3.3: Prozessalternativen des robotergestützten Wickelns [63]

Die Produktion kleiner Losgrößen auf automatischen Anlagen, wie z.B. Flyerwickelmaschinen, ist durch die hohen Investitionskosten [10] weder kostengünstig noch flexibel. Im Fokus der Forschung und Entwicklung stehen bisher hauptsächlich die Entwicklung von Prozessen und Werkzeugen für die direkte, robotergestützte Wicklungsmontage, beispielsweise zur Wicklung von segmentierten Statoren [64]. Zur Anwendung kommt hierbei das Nadelwickelverfahren, welches eine hohe Anwendungsflexibilität ermöglicht (siehe Bild 3.3). Einen weiteren Ansatz stellt die robotergestützte direkte Montage von Drähten in Linearstatoren dar [65].

Die Verwendung von Standard-Industrierobotern reduziert nötige Kosten und Zeiten in der Entwicklung und Beschaffung [66]. Weitere Vorteile sind die ortsfeste Position des Formkörpers, da die Drahtverlegung durch eine vom Roboter geführte Bewegung des Drahtverlegewerkzeuges erfolgt, sowie die Verkürzung der Prozesskette, da etwaige Anschlussprozesse ohne weitere Handhabung in der gleichen Anlage durchgeführt werden können. [67].

So kann der Kontaktier- und der Montageprozess bei einem Einzelzahnstator in einem Aufbau integriert werden [68]. Bild 3.4 stellt den Prozess dar: Es wird zunächst der erste Einzelzahn bewickelt. Über eine Schablone führt der Roboter anschließend den Draht, dem Schaltbild entsprechend, zum nächsten Einzelzahn oder Anschlusspin. Nachdem alle Einzelzähne bewickelt sind, können die kontaktieren Einzelzähne von der horizontalen Wickelposition in die vertikale Einzelposition aufgerichtet und fixiert werden.

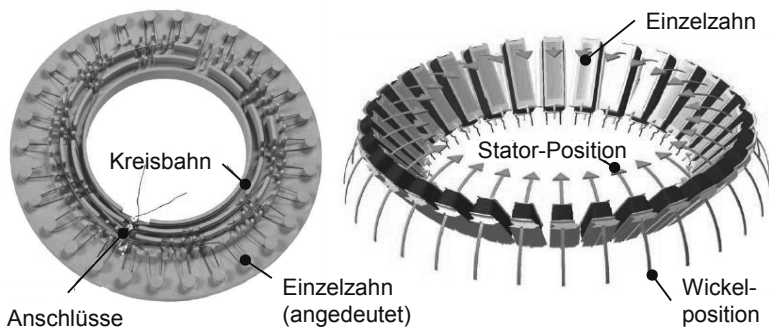


Bild 3.4: *Integration von Kontaktier- (links) und Montageprozess (rechts) bei Einzelzahnwicklungen [68]*

3.4 Auswahl eines geeigneten Industrieroboters

Aus den dargestellten Kinematiken soll nun die für die in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Prozesskette geeignete ausgewählt werden. Hierzu müssen der Einsatz des Roboters sowie die Kriterien der Arbeitszelle strukturiert ausgearbeitet werden. Die wichtigsten Rahmenbedingungen sind mit dem Einsatzszenario der Kinematik verknüpft: Die Aufgabe der zu gestaltenden Zelle ist die Montage von Statoren. Die Beschickung der Zelle mit Statoren ist Aufgabe des Werkers. Die aufzubringenden Kräfte leiten sich daher nur aus der Prozesskette der Elektromotorenmontage ab. Mit einem Kraftaufwand von bis zu 100 N (vgl. Kapitel 6.3.2) stellt die Montage des Deckschiebers den kraftintensivsten Prozessschritt dar.

Mit dem zu handhabenden Greifer muss der Roboter daher maximal 20 kg Last aufbringen können. Die Handhabung von Drähten von bis zu 1,0 mm Durchmesser sowie die Montage der Spulen und Deckschieber in Nuten mit Öffnungen von 2,0 mm - 3,0 mm, bedingen Anfahrgeauigkeiten der Kinematik von mindestens 1,0 mm.

Tabelle 3.2: Morphologische Matrix zur Auswahl der Kinematik

Kriterium	Auswahl			Begründung
	Fest	Freie Programmierung	Dynamische Programmwahl	
Programmierung	Fest	Freie Programmierung	Dynamische Programmwahl	Unterschiedliche Statoren und Prozesse
Aufgabenteilung	Eine Anlage pro Aufgabe	Mehrere Anlage für mehrere Aufgaben	Eine Anlage für alle Handhabungsaufgaben	Beschickung von Wickelmaschine und Statoraufspannung
Bewegungsart	Linear	Rotatorisch		Enger, zugleich großer Arbeitsraum
Grundachsen	Translatorisch	Rotatorisch		Nicht-lineare Bewegungen
Aufgaben	Handhabung	Handhabung und Montage	Montage	Handhabung und Montage von Drähten, Deckschiebern, ...: Montagekräfte bis 100 N, Nutbreite von ca. 2 mm
Werkzeuge	Adaption bestehender Werkzeuge	Weiterentwicklung bestehender Werkzeuge	Neuentwicklung der Werkzeuge	Adaption vorhandener manueller Werkzeuge
Schnittstellen / Anschlüsse	Keine	Standard I/O	Komplex	Kommunikation mit Greifern und anderen Anlagen

Die gewählte Kinematik steht bezüglich des Zellenlayouts in der Mitte und nimmt steuerungstechnisch die zentrale Rolle ein. Zugehörige Anlagen und Vorrichtungen müssen von mehreren Seiten erreicht und beschickt werden. Durch diesen kompakten Aufbau resultiert als Anforderung eine hohe Beweglichkeit des Roboters. Tabelle 3.2 stellt die Auswahlkriterien in Form eines morphologischen Kastens dar. Diese schließen die Verwendung von Portalrobotern, Schwenkarmrobotern und Parallelkinematiken aus. In Frage kommt daher nur ein Kickarmroboter.

Die aufgrund des weiten Arbeitsraums geforderte große Achszahl, sowie die gleichzeitigen Bearbeitung des Stators von beiden Seiten, bedingen den Aufbau der Zelle mit mindestens zwei kooperierenden Kinematiken.

Die nur sehr starr automatisierten Montagesysteme zur Produktion elektrischer Motoren bestehen zum größten Teil aus technologisch anspruchsvollen mechatronischen Vorrichtungen, die nur sehr spezifisch einsetzbar sind. Werkzeuge und Vorrichtungen im Bereich der manuellen Montage, wie Montagehammer oder Eisspannwerkzeuge, sind hingegen deutlich flexibler einsetzbar, verlangen jedoch zum Teil paralleles Arbeiten an mehreren Orten. Die gewählte Kinematik sollte daher durch ihren Aufbau in der Lage sein, diese Werkzeuge und Vorrichtungen möglichst ohne Weiterentwicklung anzuwenden und einzusetzen. Zudem sollten bereits qualifizierte Methoden und Prozesse einfach auf das flexible Montagesystem übertragbar sein. Daher empfiehlt sich der Einsatz eines Roboters, der dem Bewegungsapparat eines menschlichen Werkers möglichst nahe kommt.

Ein Dualraumroboter eignet sich durch menschenähnliche Dimensionen und die Möglichkeit mehrere Objekte parallel zu manipulieren besonders, um sogenannte „bi-manual tasks“ – Tätigkeiten, bei denen beide Arme notwendig sind (wie Halten und Reinigen eines Bauteils, Handhabung biegeschlaffer Teile) – auszuführen. Neben den beschriebenen kooperativen Tätigkeiten ist zudem eine Parallelisierung verschiedener Prozesse möglich. Ebenfalls vorteilhaft ist der durch den kompakten Aufbau gegebene, kleine Platzbedarf bei gleichzeitig großer Reichweite. Hierbei ermöglicht eine Steuerung, welche bis zu 15 Achsen (auf einem Sockel) kontrolliert, die flexible Anfahrt einer großen Anzahl an Raumpunkten.

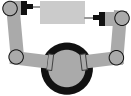

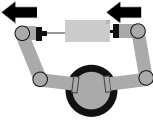
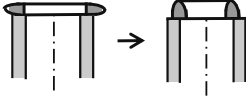
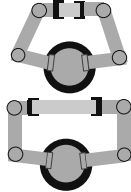
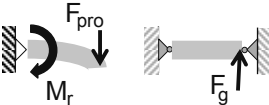
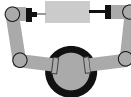
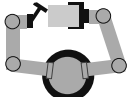
ABB spezialisiert sich mit dem „Frida-Roboter“ auf das Thema Mensch-Maschine Kooperation [69]. Schwache Antriebe und große Pufferzonen ermöglichen den Betrieb ohne zusätzliche Absicherung und Sensorik. Der „Pi4-Workerbot“ von pi4 integriert zwei Kameras und ist daher auf Inspektionsaufgaben und Qualitätssicherung spezialisiert [70]. Ein Einsatz zur Sortierung ist ebenfalls denkbar. Der von Rethink Robotics entwickelte „baxter“ kann mit der umfangreich integrierten Sensorik (z.B. Sonar und Kameras) sein Umfeld erkennen und die Arbeitsabläufe entsprechend anpassen [71].

Die Mobilität und Intelligenz, sowie der niedrige Anschaffungspreis erlauben Tätigkeiten der Roboter auch in haushaltsnahen Anwendungen. Mit ähnlich strategischer Ausrichtung platziert sich auch der von Meka entwickelte „Meka M1“ [72]. Die von Universal Robots angebotenen „UR 5 double“ bzw. „UR 6 double“ sind zwei nebeneinander montierte, leichte und flexible Sechs-Achs-Kinematiken, die ebenfalls eigensicher bis zum Flansch sind. Die Programmierung erfolgt durch zwei separate Steuerungen und Programmierhandgeräte (PHG) [73].

Einen Ausblick liefert das Deutsche Forschungs-zentrum für künstliche Intelligenz durch die Forschungsplattform AILA mit 32 Freiheitsgraden und dem Ziel Mobilität, Manipulation und Wahrnehmung in einem geschlossenen System in den Mittelpunkt zu stellen [74].

Speziell für Handhabungs- und Montageaufgaben eignen sich die von Yaskawa angebotenen „SDA 10“ und „SDA 20“ Roboter mit bis zu 20 kg Traglast. Steuerungstechnisch handelt es sich bei dieser Kinematik um zwei kooperierende Sieben-Achs- Roboter, die auf einer beweglichen 15. Achse miteinander verbunden werden. Hauptnutzer ist momentan, auch aufgrund der Arbeitsschutzvorschriften, die japanische Automobilindustrie. Ein weiteres Einsatzszenario ist die Arbeit in sterilen Räumen in der Medizintechnik zur vollautomatisierten Handhabung von Blutproben [75]. Aber auch im Elektromaschinenbau bringt der Einsatz dieser Robotereinheit hohe Potentiale mit sich. Die Handhabung biegeschlaffer Teile kann durch die Fixierung der freien Drahtenden an beiden Roboterarmen deutlich vereinfacht werden. Ein weiterer Vorteil liegt in der möglichen Prozessparallelisierung durch Adaption verschiedener Werkzeuge. Während der eine Roboterarm Wicklungen einzieht, kann der zweite Roboterarm bereits die Deckschieber einbringen.

Tabelle 3.3: Vorteile eines Zwei-Arm-Roboters bei der Statorfertigung [76]

<p>Prozess-parallelisierung</p> 	<p>Handhabung biegeschlaffer Teile</p> 
<p>Prozess-synchronisierung</p> 	<p>Umformen von Wickelköpfen</p> 
<p>Größenausgleich</p> 	<p>Aufnahme von Kräften und Momenten</p> 
<p>Handhabung von Werkzeug und Werkstück</p> 	<p>Entwicklung von alternativen Prozesskonzepten</p> 

Der parallele Prozess kann jedoch auch die Handhabung des Werkstückes sein und der Roboter damit nötige Vorrichtungen ersetzen. Weitere Einsatzgebiete sind Größenausgleich in der flexiblen Montage, sowie umformenden Tätigkeiten. Die beschriebenen Anforderungen und Vorteile führten zur Auswahl eines Dualarmroboters für die Ausführung der Statormontage.

Aufgrund der hohen möglichen Fügekräfte und Traglasten sowie der ausreichenden Genauigkeit wurde der Yaskawa Motoman SDA 20 in die Montagezelle integriert.

3.5 Konzeptionierung einer Zelle zur flexiblen Statormontage

3.5.1 Übersicht der Komponenten der Zelle

Zur Umsetzung der Prozesskette soll die Wicklung zunächst auf einer Schablone im Schablonenwickler hergestellt werden. Diese wird von der ausgewählten ambidexteren Kinematik übernommen, in den Stator montiert, nachgeformt undiefert. Der Stator ist während der Prozesse in einem Träger aufgespannt. [33]

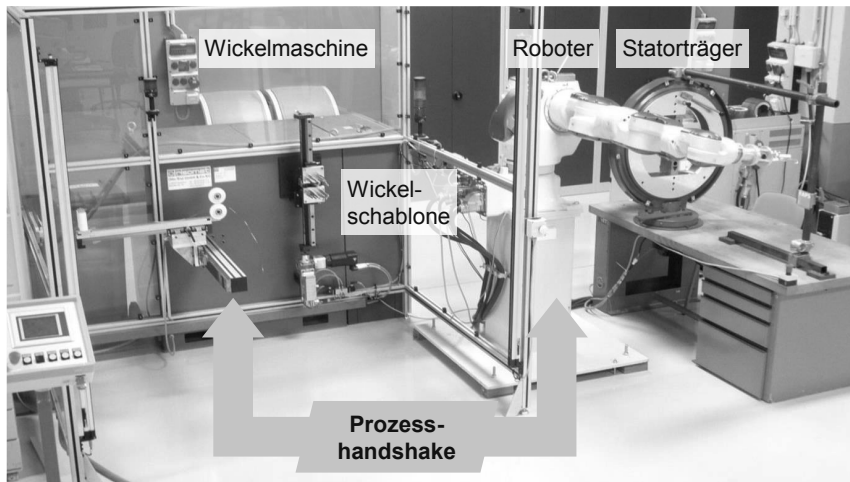


Bild 3.5: Zelle zur flexiblen, robotergestützten Statormontage [33]

Handhabungsgerät

Der Roboter der Firma Yaskawa besteht aus zwei Sieben-Achs-Industrierobotern, die über ein gemeinsames Gelenk mit einem drehbaren Fuß verbunden sind. Durch diese Bewegungsfreiheit und die integrierte Medienzuführung ist diese Kinematik gut geeignet für Montage, Teileübergabe, Maschinenbeschickung und andere Handlingsaufgaben, die früher nur von Menschen ausgeführt werden konnten.

Wie bereits beschrieben, können beide Roboterarme synchron zusammenarbeiten oder gleichzeitig unterschiedliche Aufgaben ausführen. Dank der kompakten Aufstellfläche kann die Kinematik in engen Bereichen eingesetzt werden und ist so ideal zur Realisierung vorrichtungsarmer Montage-prozesse geeignet.

Durch diese ambidextere Kinematik wird es ermöglicht, sich bei den Montageprozessen stark an den bisher manuell durchgeführten Tätigkeiten zu orientieren. Der Roboter wird durch eine Steuerung kontrolliert, die bis zu 72 Achsen (8 Roboter) synchronisiert. Der Controller soll auch die Ansteuerung der anderen Zellenkomponenten übernehmen. Hierzu muss eine datentechnische Kommunikation zwischen Robotersteuerung, Statorträger und Wickelmaschine realisiert werden [33]. Das Programmierkonzept wird in Kapitel 3.5.3 näher dargestellt.

Schablonenwickler

Bei der automatischen Spulenwickelmaschine handelt es sich um eine Einspindelwickelmaschine mit umlaufender Schablone des Herstellers Risomat. Die Kinematik dient zur Herstellung der Einzelspulen und verfügt über einen symmetrisch verstellbaren Doppelschlitten, an dessen Befestigungspunkten und Passstiftbohrungen die mehrteiligen Schablonen angebracht werden. Der Doppelschlittenantrieb wird von der Hauptspindel rotatorisch angetrieben, wodurch die beim Herstellen der Wicklungen erforderliche Rotationsbewegung der Wickelschablone realisiert wird. Sowohl die Drehzahl, als auch der Stellbereich des Doppelschlittens sind variabel einstellbar.

Neben dem Beschleunigungsverhalten der Hauptspindel bei Prozessende und -beginn ist der Übergang in die nächste Stufe (veränderter Durchmesser) programmierbar. Die Drahtführungsschiene ermöglicht die Zuführung von maximal 30 parallelen Runddrähten mit Durchmessern von 0,25 mm bis 1,20 mm bei Wickeldrehzahlen zwischen 2.400 und 15.000 U/min. Ausstattungsmerkmale sind eine einfache Filzbremse und eine separate Drahrissdetektion.

Statoraufnahme

Die existierende Vorrichtung zur Aufnahme des Stators ist Grundbestandteil eines Spuleneinziehgerätes (SEG). Ein Innenring (Innendurchmesser 640 mm) ist drehbar in einem Außenring gelagert. Die Außenseite dieses Innenringes besitzt eine Nut für die Radiallagerung und eine Verzahnung, in die ein Kegelrad, welches auf einem Servomotor sitzt, greift. Der Innenring und das gespannte Werkstück (Stator) können daher von einem Motor gedreht werden. Die Aufspannung erfolgt über drei bis vier manuell zu bedienende, nicht gekoppelte, zweistufige Spannscheren, die am Innenring fixiert sind und erlaubt das Aufnehmen von Statoren mit Außendurchmessern von 50 mm bis 400 mm. Das konzentrische Einspannen der Statoren ist hierbei ein äußerst aufwändiger Vorgang (siehe Kapitel 4.2.1).

3.5.2 Simulationsbasierte Planung der Zelle²

Auf Basis der vorgestellten Komponenten wurde ein kinematisches Modell der potentiellen Zelle entwickelt. Neben verschiedenen Anordnungsvarianten gelingt es durch dieses Modell Zugänglichkeiten abzubilden und zu evaluieren. Softwareprodukte wie Famos Robotics (Carat Robotics Industries), Delmia (Dessault Systems) oder Tecnomatix (Siemens) beinhalten keine mathematischen Modelle des eingesetzten Dualarmroboters. Da dies aber wichtigste Voraussetzung für eine mögliche Offline-Programmierung der Anlage ist, wird zur Modellierung der Anlage die Yaskawa eigene Software MotoSim verwendet.

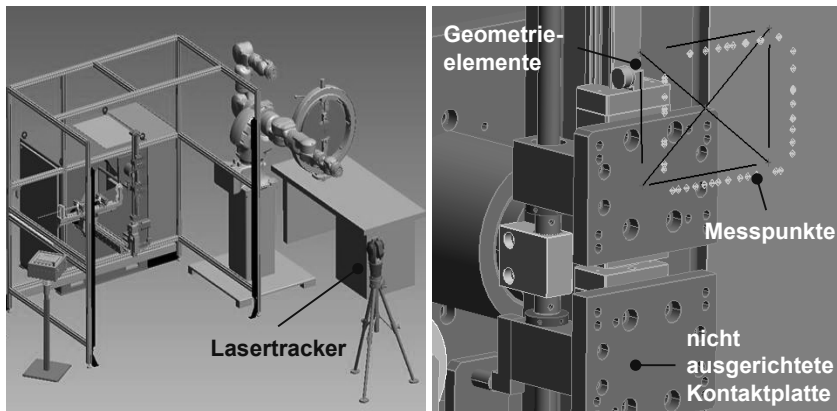


Bild 3.6: Ausgerichtetes CAD-Modell der Anlage (links), Bestimmung der realen Position der Kontaktplatte (rechts)

Um die Offline-Programmierung zu gewährleisten, muss nach Modellierung der Zelle der reale Aufbau und das Simulationsmodell aufeinander angepasst werden. Hierzu wird zunächst die reale Zelle entsprechend des Modells aufgebaut. Anschließend müssen die exakten Positionen und Abmessungen der realen Komponenten eingemessen werden. Dies geschieht unter Anwendung eines Lasertrackers der Firma API. Dieser zählt zur Kategorie der optischen 3D-Koordinatenmesstechnik und kombiniert einen Theodolit (basierend auf Triangulation) und ein Laserinterferometer. Mittels Triangulation werden Marken, die auf ein Messobjekt aufgetragen sind, aus verschiedenen Richtungen aufgenommen.

² Bei der Erstellung des CAD-Simulationsmodells der Zelle wurde ich unterstützt von Herrn Roland Weinzierl.

Die Raumkoordinaten werden anschließend mittels Winkelmessung berechnet. Der vom Interferometer erzeugte Laserstrahl lässt sich durch angetriebene Winkelachsen hochgenau im Raum führen. Sobald er eine Messmarke detektiert hat, wird diese verfolgt („getrackt“) und die Position mittels zweier hochgenauer Winkelmesssysteme berechnet. [77]

Durch diese Methode lässt sich in kurzer Zeit eine große Punktwolke aufnehmen. Nach Kalibrierung des Lasertrackers wird der Ist-Zustand des Gesamtaufbaus bestimmt. Durch die gemessenen Positionen kann das CAD-Modell an den realen Versuchsaufbau angepasst werden. Dies erfolgt in der Konstruktionssoftware, in welcher das CAD-Modell erstellt wurde (CATIA V5). Die gemessenen Geometrie-elemente stellen den realen Versuchsaufbau dar und werden als Step-Datei importiert. Die modellierten CAD-Daten werden mit Hilfe von Verknüpfungen, wie Flächenkontakt und Konzentrizität, exakt darüber gelegt. Der reale Nullpunkt wird bei der Kontaktplatte auf den Nullpunkt der CAD-Datei gelegt. Sobald alle Komponenten miteinander verknüpft sind, kann das korrigierte CAD-Modell in die Lasertracker-Software geladen und die neue Position der Statorhalterung erneut gemessen werden. [78]

3.5.3 Parameterbasierte Programmierung der Montagezelle

Das Programmier-Konzept soll nach einmaliger Zuweisung und Parametrierung eines neuen Stortypes in die Parameterdatenbank der Robotersteuerung das schnelle Rüsten der Anlage erlauben. Dabei wählt der Bediener nach Start des Roboterprogrammes zunächst den Stortyp aus. Anschließend werden die in der Datenbank hinterlegten Werte den zuvor programmierten Variablen im Roboter- und Greiferjob zugewiesen und so die Fahrwege der Kinematik und der Werkzeuge automatisch auf die geometrischen Gegebenheiten des eingelegten Stators angepasst. [33]

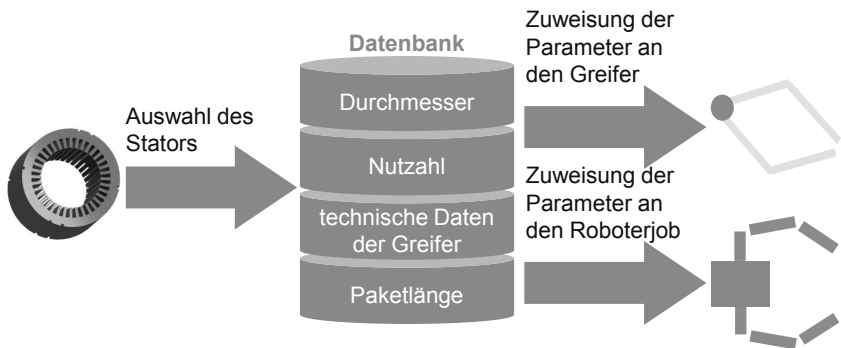


Bild 3.7: Parameterdatenbank der Robotersteuerung [33]

3.5.4 Ablauf der robotergestützten Statormontage

Die Prozesskette wird in Kapitel 8.2.4 näher erläutert und ist hier zusammenfassend dargestellt. Zunächst erfolgt die Wicklungsmontage wie in Bild 3.8 dargestellt. Sobald alle Nuten gefüllt sind, werden die Roboterarme umgerüstet.

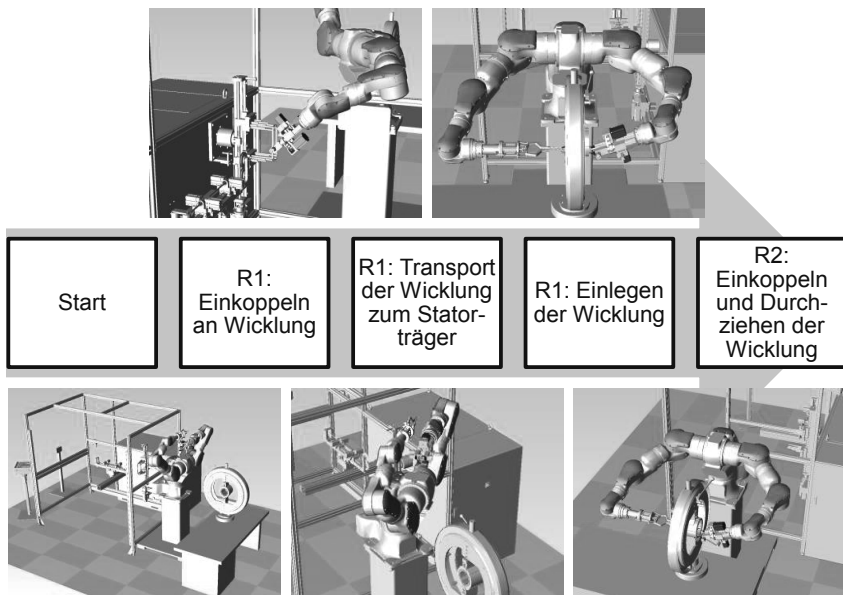


Bild 3.8: Automatisierter Ablauf der robotergestützten Wicklungsmontage [33]

Der linke Roboterarm übernimmt die Kontaktierung der Wicklungsenden, der rechte die Montage der Deckschieber. Nach einem weiteren Umrüstprozess wird der Wickelkopf geformt und alles wieder auf Ausgang gerüstet.

Der Ablauf wird zentral gesteuert. Dies kann durch eine separate Recheneinheit erfolgen. Alternativ stehen die Steuerungen der integrierten Anlagen (Wickelmaschine, Roboter) zur Verfügung, um über Ein- und Ausgänge eine Kommunikationsstruktur aufzubauen. Aufgrund erhoffter Zeitvorteile und dem geringeren Wartungsaufwand wird im Rahmen der Umsetzung der Demonstrationszelle die Robotersteuerung die Ansteuerung externer Werkzeuge, Antriebe und der Wickelmaschine übernehmen.

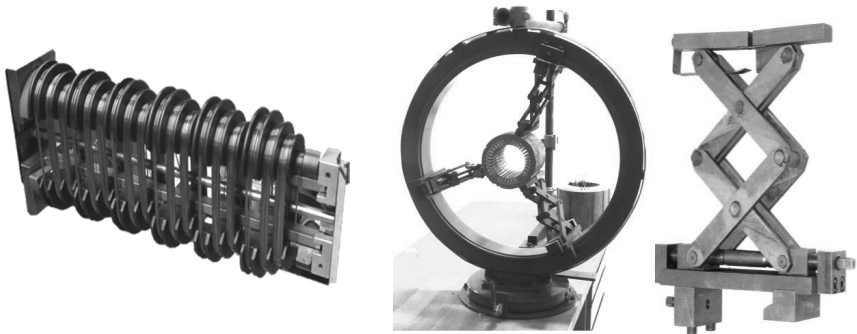
3.6 System zur robotergestützten Montage von Statoren

Nach Analyse der am Markt vorhandenen Kinematiken und Abstimmung auf die dargestellten Anforderungen, ist ein Dualarmroboter mit 15 Achsen und mit einer Traglast von bis zu 2 x 20 kg für die Aufgabe der Statormontage gewählt worden. Der Roboter erfüllt alle Anforderungen und zeichnet sich v.a. durch die Möglichkeit, manuelle Prozesse und Werkzeuge weiterverwenden zu können, aus.

Durch die steuerungstechnische Option, sowohl synchronisierte als auch parallele Prozesse durchzuführen, werden neben geringeren Entwicklungszeiten auch verringerte Prozesszeiten erreicht. Die Steuerung der Kinematik kontrolliert die Handhabung des Drahtes, die Montage der Wicklung und Deckschieber, die Kontaktierung, das Wickelkopfpresen sowie die Steuerung der Statoraufspannung und der Wickelmaschine. Das Programmierkonzept ist parameterorientiert. Nach einmaliger Einrichtung eines Stators, ist die Übertragung auf neue Statoren durch Ergänzen der entsprechenden Parameter in der Datenbank effizient möglich.

4 Gestaltung automatisierungsgerechter Vorrichtungen

Die zunächst verwendeten Vorrichtungen zeigen sich im Verlauf der ersten Prozessversuche mit einigen Nachteilen behaftet. Die Wiederholgenauigkeit beim Einlegen von Statorn ist ungenügend und der Wechsel auf einen anderen Stator durchmesser verlangt aufwändige Rüst- und Messarbeiten. Zudem ist die Zugänglichkeit einer universellen Wickelschablone mit einem Robotergreifer nur sehr schwierig zu realisieren. Durch die im folgenden Kapitel dargestellten Entwicklungen werden die auf dem Markt verfügbaren Vorrichtungen erweitert. Die ausgewählte Vorrichtung soll unter anderem Reproduzierbarkeit garantieren und möglichst alle Anforderungen an eine ergonomische Gestaltung erfüllen. Zudem soll die Montagevorrichtung es erlauben, unter Anwendung einer ambidexteren Kinematik, Wicklungen in Statorn verschiedener Baugrößen zu montieren. Anschließend wird die Entwicklung einer kostengünstigen, für die Roboter leicht zugänglichen, Schablone für das Wickeln der Einzelspulen aufgezeigt.



*Bild 4.1: Universelle Wickelschablone (links),
 Spuleneinziehgerät mit Spannscheren (rechts)*

4.1 Entwicklung einer robotergerechten Wickelschablone³

Die höhere Prozesssicherheit und geringere Neigung zu Drahtkreuzungen führen für die Produktion der Einzelspulen zu einer Bevorzugung des Linearwickeln gegenüber der Direktwickel- und der Flyerwickelmethode. Die zugehörige Schablone ist universell einsetzbar.

³ Bei dem Aufbau der Wickelschablone und des Einziehgreifers wurde ich unterstützt von Herrn Andreas Heyder und Herrn Holger Grünsteudel.

Verschiedene geometrische Elemente erlauben die Produktion von Wicklungen für eine große Anzahl unterschiedlicher Statoren. Diese geometrische Komplexität der Schablone, abgebildet in Bild 4.1 links, geht jedoch mit einer nur sehr schwierigen Erreichbarkeit der Wicklung für robotergeführte Werkzeuge einher [79]. Um die Zugänglichkeit zu garantieren, bestehen die Möglichkeiten der Auslegung einer Einkammerschablone oder die Auslegung einer Dreikammerschablone, mit welcher die Wicklung von drei parallelen Spulen möglich ist.

Rechteckige Einkammerschablone

Während der ersten Versuchsreihe kommt eine sehr einfache Schablone zum Einsatz. Diese rechteckige Schablone besteht aus lediglich einer Kammer, welche durch Stehbolzen, die horizontal und vertikal in Profilen verschiebbar sind, realisiert wird. Die Schablone kann durch einen Roboter von der Wickelmaschine abgenommen, die Wicklung auf der Schablone zum Stator transportiert und die Wicklung montiert werden. Diese Möglichkeiten stellen die Hauptvorteile dieses Konzeptes dar. Nachteilig sind jedoch die einzelne Kammer, sowie die ungünstige, rechteckige Wickelkopfform mit gerundeten Ecken. Zudem sind geometrische Anpassungen auf andere Nuten oder Statoren nur durch manuelles Rüsten möglich.

Dreikammerschablone mit dreieckigen Wickelkopfseiten

Die rechteckige Schablone, deren Formen langgestreckten Waben entsprechen, ist um zwei Kammern erweitert. Für den Aufbau werden auf 15 mm starken Rechteckaluminiumplatten geschliffene Stäbe aus Rundstahl in unterschiedlichen Anordnungen, Längen und Durchmessern mittels versenkten, rückseitig angebrachten Innensechskantschrauben angebracht, welche die Kammerform definieren. Die Spulenweiten entsprechen hierbei den geometrischen Abständen des entsprechenden Nutmittelpunktes.

Die Anordnung der Kammern ermöglicht die Wicklung von konzentrischen Spulengruppen. Festgelegt wird die Wickelkopfausladung auf 15 mm und die Mindestlänge der Spulenseite auf die Länge des Stators. Die dreieckigen Wickelkopfseiten erfüllen die folgenden Funktionen: Der Kupferverbrauch wird durch Verkleinerung des Wickelkopfes reduziert und ein einfaches Einlegen in das Einziehwerkzeug realisiert. Positiver Nebeneffekt ist der reduzierte Kraftaufwand beim Einziehen, da bei kleineren Wickelköpfen auch die zu leistende Formarbeit am Wickelkopf abnimmt.

Dreikammerschablone mit parallelen Wickelkopfenden

Durch die Ergänzung von zwei parallelen Seiten im Bereich der Wickelköpfe, wird ein paralleles Greifen von drei Spulen ermöglicht. Um eine einfache Form einsetzen zu können, sind die Abstände der Seiten zueinander identisch. Das Werkzeug schiebt die Spulen in eine Ebene und greift die Wicklungen dann an der parallelen Seite.

Zur Erhöhung der Steifigkeit kommen bei der ersten Variante Verbindungselemente zwischen den Stangen zum Einsatz. Diese führen jedoch bei den Versuchen zu dem fehlerhaften Schieben der Spulen in eine gemeinsame Ebene. Die Kammern eins und zwei werden daher mit polierten, angespitzten Stäben aus nichtrostendem Stahl ausgestattet, damit die Wicklung beschädigungsfrei abgeleitet werden kann. Durch Schrägstellen der Stäbe wird die Biegungen durch die Wicklung kompensiert.

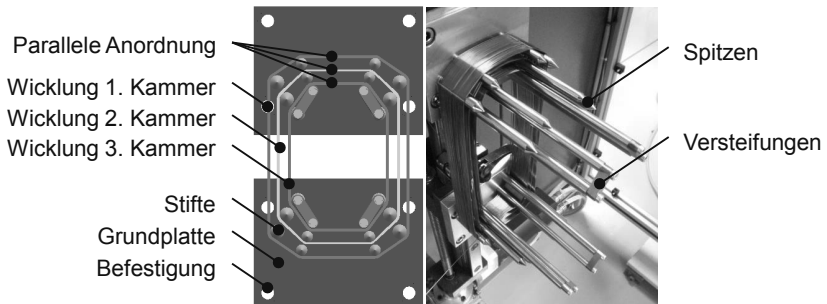


Bild 4.2: Statorspezifische Dreikammern-Wickelschablone mit parallelen Wickelköpfen [80]

Verschiedene Statorlängen sind durch den variablen Abstand zwischen den Schablonenhälften realisierbar. Die Grundplatte ist mittels weniger Schraubverbindungen an der Wickelmaschine fixierbar [81]. Das entwickelte Konzept ist kostengünstig und ermöglicht die Realisierung schneller Umrüstzeiten. Diese Schablonenform (Bild 4.2) wird in der Demonstrationszelle realisiert. [82]

4.2 Entwicklung einer spannzeitreduzierten Statoraufnahme⁴

4.2.1 Zustandsanalyse der bestehenden Spannvorrichtung

Vorrichtungen sind technische Hilfsmittel für die Serienfertigung, die an Werkstücke gebunden sind [83]. Die Statoraufnahme der Firma Elmotec Statomat wurde bereits in Kapitel 3.5.1 beschrieben. Vorteile der vorhandenen Vorrichtung sind die gute Erreichbarkeit für den Roboter, der einfache Aufbau und die universelle Einsetzbarkeit der Spannscheren. Die Hubbewegungen der Spannscheren sind kinematisch nicht miteinander gekoppelt. Beim konzentrischen Einspannen werden zunächst alle drei Spannscheren soweit ausgefahren, dass der Stator nicht herausrutschen kann.

⁴ Bei dem Aufbau der Statoraufnahme wurde ich unterstützt von Herrn Thomas Schulz

Die Spannscheren werden nach Einlegen des Stators sukzessive angehoben, bis der Stator fest sitzt. Die Konzentrität kann dann mit einer Messuhr geprüft und durch Lösen und Anspannen verschiedener Spannscheren angepasst werden. Beim Spannen von Statoren mit gleicher Größe ist darauf zu achten, dass nur eine definierte Spannschere, ideal in oberer Position, bewegt wird und nach Aufspannung die Konzentrität geprüft wird. Der Statorring sollte hierbei immer in der gleichen Lage stehen. Der Prozess ist äußerst zeitaufwendig. Ein weiterer Nachteil ist die fehlende Möglichkeit, den Stator axial zu positionieren. Auch diese Position ist bei jedem Einlegeprozess zu prüfen und ggf. zu korrigieren. Insgesamt erfordert der Rüstprozess in Verbindung mit einer robotergestützten Automatisierung neben Zeit auch Konzentration des Werkers. Ungenauigkeiten nach dem Spannen wirken sich direkt auf die nachfolgenden Prozesse aus (Wicklungen die zwischen Nuten oder in falschen Nuten montiert werden könnten, sowie falsch abgelegte Wicklungsenden). Eine Lösungsvariante ist das Abtasten und Erfassen des Stators durch die Robotersteuerung vor dem ersten Montageschritt. Bei diesem zusätzlichen, nicht wertschöpfenden und manuellen Prozessschritt, besteht zudem die Gefahr einer Kollision bei zu großen Einspannabweichungen. Die Verwendung bestehender Drehfutter-Lösungen entfällt aufgrund des hohen Gewichts und der großen Durchmesser (630 mm Außendurchmesser, 300 kg Gewicht) [84] ebenfalls. Daher wird eine neue Einspannvorrichtung konzeptioniert und umgesetzt. [85]

4.2.2 Entwicklung von Lösungsalternativen zur Statoraufnahme

Eine Lösungsvariante ist die Synchronisierung der vorhandenen Spannscheren. Dies kann einerseits durch das Nachrüsten von geregelten Servomotoren erfolgen, andererseits mechanisch, durch Kopplung über Zahnriemen. Die vorhandenen Spannscheren werden hierbei weiterverwendet und sind nach wie vor um 120° versetzt angeordnet. Die beiden Varianten sind flexibel für verschiedene Statorgrößen einsetzbar.

Die Kopplung der, für Lösungsvariante 1 nötigen Motoren an die Spannscheren kann direkt oder über Getriebe erfolgen. Um die Antriebe gegen Überlastungen (durch Fahrten in die Endlage oder gegen den zu spannenden Stator) zu schützen, wird ein Steuergerät eingesetzt, welches die Motorströme überwacht. Zu beachten ist, dass im ungünstigen Fall eine Spannschere alleine das Gewicht des Stators zu tragen hat und sich dementsprechend eine unsymmetrische Verteilung der nötigen Motorströme ergibt. Zudem sind aufgrund der elektrischen Verbindungen keine Drehungen des Stators in der Aufnahme um $> 360^\circ$ realisierbar. Hingegen ermöglicht die Integration der Motoren eine spätere Automatisierung des Einspannens.

Bei Lösungsvariante 2 wird von der Spindel, welche mit zwei Zahnriemenscheiben belegt ist, der in der Mitte liegenden Spannschere zu den Spindeln der anderen Scheren jeweils ein Zahnriemen geführt. Zusätzliche Rollen spannen den Zahnriemen.

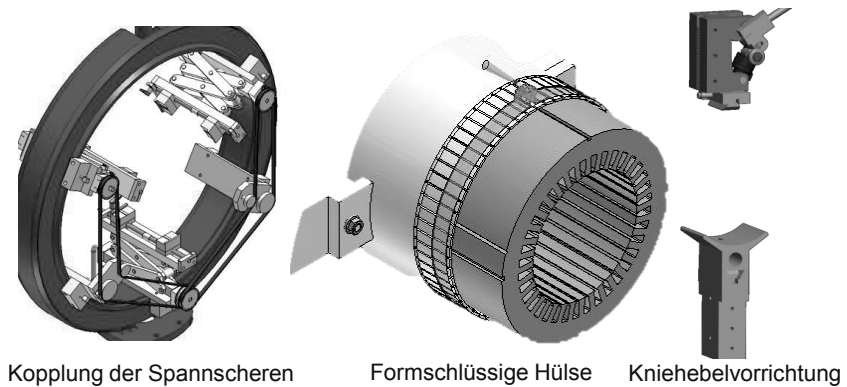


Bild 4.3: Ergänzung der Statoraufnahme: Lösungsvarianten 2-4

Die Gegenseite der mittigen Spindel ist mit einer abnehmbaren Handkurbel ausgerüstet, welche durch manuelles Betätigen zu einer synchronen Zustellung aller Spannelemente führt. Durch die Kopplung mittels Riemen kann auf den zusätzlichen Aufwand, die Verfahrenswege aufzunehmen, verzichtet werden. Da die Motoren entfallen, sind zudem die Sicherheitsanforderungen geringer als bei der der ersten Lösungsvariante. Nachteilig ist hingegen der hohe Aufwand beim Umrüsten des Werkzeugs. Wichtigstes Kriterium bei beiden Varianten ist die Spielfreiheit. Die axiale Positionierung kann mittels Prismen erfolgen, welche Anschlagplatten für die Stirnfläche des Stators integrieren. Dies ermöglicht die Darstellung einer Bezugsebene, der sich der Roboter ohne Kollisionsgefahr annähern kann.

Bei der formschlüssigen Lösungsalternative 3 wird der Stator in eine Hülse eingeschoben. Die Hülse, deren Innendurchmesser dem Außendurchmesser des Stators entspricht, wird an Haltern befestigt, die um 180° versetzt am Einziehgerät montiert sind. Die Hülse muss vor Inbetriebnahme, aufgrund der Konzentrizität, sorgfältig ausgerichtet und fixiert werden. Durch einen Indikator, der in die Nut des Stators greift, wird der Stator vorzentriert und radial ausgerichtet. Ein Anschlag sorgt für die korrekte axiale Ausrichtung des Stators. Nachteilig an dem Konzept ist einerseits das Spiel zwischen Hülse und Stator, andererseits ist pro Stator-durchmesser eine eigene Hülse erforderlich.

Vorteile liegen in der Möglichkeit der Automatisierung, der niedrigen Anzahl an Einzelteilen sowie dem schnellen Statorwechsel.

Mit Hilfe der Kniehebel Vorrichtung in Lösungsvariante 4 spannt der Werker einen Stator zwischen einer starren unteren und einer, mittels Kniehebel beweglichen, oberen Schale.

Eigenschaften des Kniehebelprinzips sind die zu Beginn großen Verfahrswege bei kleinen Hebelbewegungen und die hohen Schließkräfte bei geringem Kraftaufwand. Für eine exakte und dauerhafte Ausrichtung werden die genannten Spannelemente auf zwei Ronden befestigt, welche wiederum auf den Innenring des Einziehgerätes montiert werden.

Die Länge der Schale ist unabhängig vom Stator. Zur Ausrichtung kommt, wie auch bei „Lösungsvariante 3“, ein Indikator zum Einsatz. Axial wird, wie bei den anderen Varianten, ein Anschlag für die Definition der Bezugsebene eingesetzt.

Der Kniehebel ist mit einer Feinjustierung ausgestattet, die es erlaubt die Endlage um bis zu 3,0 mm zu korrigieren, um eventuelle Fertigungsungenauigkeiten bei der Produktion der Schalen ausgleichen zu können. Auch bei diesem Konzept sind statorspezifische Spannschalen pro Statorradius erforderlich. Diese sind allerdings schnell zu wechseln. Vorteile der Lösungsvariante sind der schnelle Statorwechsel, die optionale Automatisierbarkeit und die gute Bedienbarkeit. [85]

Nach der Konzeptionierung verschiedener Lösungsalternativen erfolgt die Auswahl. Die hier verwendeten Verfahren zur technischen-wirtschaftlichen Bewertung beruhen auf einer von Kesselring vorgestellten Methodik. Die Kriterien werden nach ihrer Wichtigkeit für den Montageprozess mit dem Gewichtungsfaktor W von eins bis zehn eingeschätzt. Die verschiedenen Konzepte werden dann nach Erfüllung des Kriteriums mit der Maßzahl von null (unbrauchbar) bis vier (sehr gut) bewertet. Es resultiert die Wertungszahl als Multiplikation zwischen Gewichtungsfaktor W und Maßzahl. Abschließend werden Wertigkeit (Summe der Wertungszahlen des Konzeptes) und die technische Wertigkeit (Wertigkeit / theoretisches Ideal) berechnet, um die Rangfolge zu ermitteln. [86] [87].

Variante 4, unter Anwendung des Kniehebelprinzips, schneidet bei der Bewertung, v.a. in den hoch gewichteten Bereichen Einsatz und Funktionalität, am besten ab. Der hohe Gestaltungsaufwand führt zwar zu einigen Abzügen, dennoch wird diese Alternative zur Ausarbeitung und Integration ausgewählt. [85]

Tabelle 4.1: Technische Bewertung der Lösungsalternativen zur Statoraufnahme

Bewertungs- kriterien	W	Elektrische Kopplung		Mechanische Kopplung		Hülse		Kniehebel	
		Maß- zahl	Wer- tungs- zahl	Maß- zahl	Wer- tungs- zahl	Maß- zahl	Wer- tungs- zahl	Maß- zahl	Wer- tungs- zahl
Automatisierbarkeit	1	4	4	0	0	1	1	3	3
Integrierbarkeit	2	1	2	2	4	2	4	1	2
Anzahl Normteile	3	1	3	1	3	2	6	2	6
Zeit für Werkzeug- wechsel.	3	4	12	4	12	2	6	3	9
Durchmesser	4	4	16	4	16	3	12	3	12
Instandhaltung	4	1	4	2	8	2	8	3	12
Investitionskosten	5	1	5	3	15	2	10	1	5
Masse	6	0	0	2	12	3	18	2	12
Wartung und Pflege	6	0	0	1	6	3	18	3	18
Greiffreiheit	7	1	7	1	7	3	21	4	28
Bedienbarkeit, Kraftaufwand	8	3	24	2	16	3	24	4	32
Bedienzeit, Zeit für Werkstückwechsel	8	1	8	1	8	4	32	4	32
Steifigkeit	8	1	8	1	8	2	16	4	32
Arbeitsschutz, Sicherheit	10	0	0	3	30	3	30	4	40
Bewegungsfreiheit	10	4	40	4	40	4	40	4	40
Positionswiederhol- genauigkeit	10	1	10	1	10	4	40	4	40
Zuverlässigkeit	10	1	10	1	10	3	30	4	40
Wertigkeiten		153		205		316		363	
Technische Wertigkeiten		0,36		0,49		0,75		0,86	
Rangfolge		4		3		2		1	

4.2.3 Komponenten der entwickelten Statoraufnahme

Basis für die dreiteilige Vorrichtung bilden die Ronden, die für die Ausrichtung der Auflagen zuständig sind und zudem den Großteil der Spannkkräfte aufnehmen. Eine weitere wichtige Baugruppe ist die Klemmeinrichtung, welche Knie- und Handhebel integriert. Ergänzt wird das System um die starre untere Auflage, die zudem als Widerlager für die Klemmung dient. Auf diese Auflagen werden die zum Stator passenden Schalen montiert. Der Aufbau ist referenziert auf den Mittelpunkt des Innenringes der Statorhalterung.

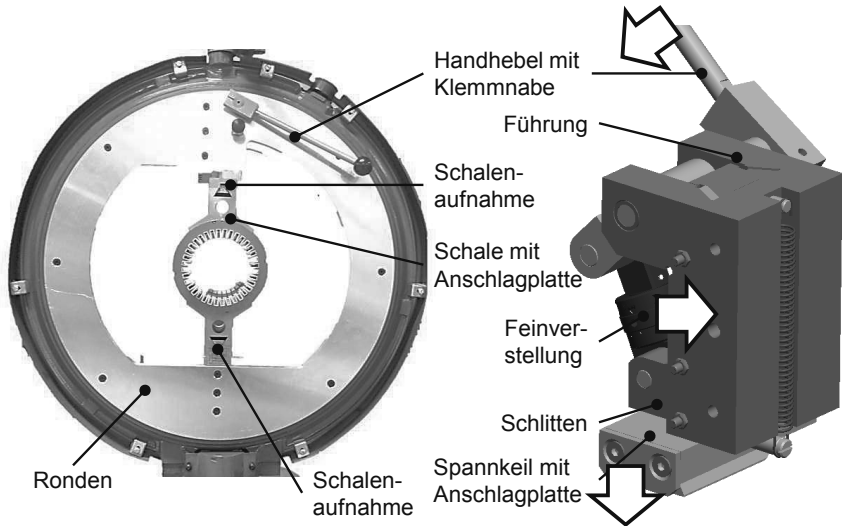


Bild 4.4: Modifizierte Statoraufnahme (links); Aufbau des Kniehebels (rechts)

Die Ronden (Außendurchmesser $d_A = 646,5$ mm, Dicke $b = 15,0$ mm) bestehen aus einer Aluminium-Magnesium-Legierung und sind, bis auf einige Form- und Funktionselemente, achssymmetrisch. Mittels Distanzbolzen werden die Ronden auf den Innenring gestützt.

Die Auflagen bestehen aus dem Basisteil, dem Spannkeil und der Anschlagplatte. Sie haben die Aufgabe die Schalen und Spannkkräfte aufzunehmen. Der Spannkeil ist in einer Nut im Basisteil geführt und lässt sich, aufgrund des geringen Spieles, ohne Verkippen vertikal bewegen. Nach Aufschieben der Schale bis zur Anschlagplatte, kann diese durch eine Befestigungsschraube fixiert werden. Die Schwalbenschwanzführung sorgt hierbei für eine Fixierung und Zentrierung.

Das Kniehebelelement erfüllt zwei Funktionen. Einerseits hält es mittels Klemmkraft den Stator zwischen den Schalen, andererseits gewährt es durch den Zustellweg von bis zu 20,0 mm die Zugänglichkeit beim Statorwechsel. Um eine möglichst große Bandbreite an Statoren einspannen zu können, muss das Element entsprechend kompakt sein. Der Spannkeil mit Anschlagplatte wird an der Unterseite angebracht und zur Befestigung der Schalen mit einem Innenloch mit Gewinde versehen. Wie bereits erwähnt, dient die Feinverstellung dazu, die untere Endlage bei einem Statorwechsel zu variieren und ist ursprünglich eingesetzt bei Handkniehebelpressen (Presskraft bis 5000 N). Ein Rastbolzen sichert die Endlage gegen zufälliges Lösen und ist selbst durch einen Gewindestift gesichert. [85]

Die Führung stützt den oberen Hebel ab und überträgt das Drehmoment vom Werker an den Hebel. Sie lagert in zwei Gleitlagerbuchsen die Welle, welche gegen axiale Verschiebung mit einem Gewindestift gesichert ist. Der Formschluss wird nach DIN 6885 erreicht durch eine Passfeder mit einer Nutbreite von 4,0 mm [88].

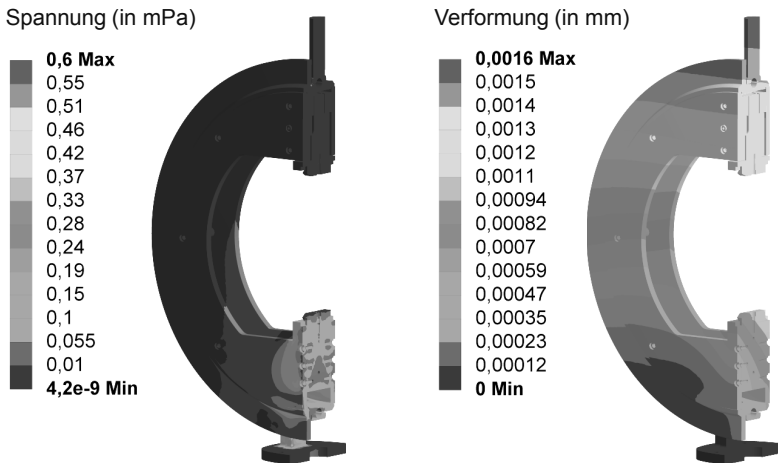


Bild 4.5: FEM Simulation des Verlaufs der Deformation (links) und der von Mises Vergleichsspannung (rechts) am Einspanning

Die Schalen umfassen das Blechpaket. Für Statoren mit kleineren Durchmessern müssen sie aufgrund der konzentrischen Einspannung in einer entsprechend größeren Höhe gefertigt werden. Um die Masse dennoch nicht zu groß werden zu lassen, werden Bohrungen eingebracht. An der Stirnseite wird über drei Gewindesacklöcher eine Anschlagplatte montiert, welche eine axiale Positionierung des Stators ermöglicht. Auf der Oberfläche wird ein Langloch eingebracht, in welches der V-Nut Indikator integriert wird.

Dieser dient zur radialen Positionierung des Statorbleches, wird von unten verschraubt und muss aufgrund der mechanischen Belastung aus einem sehr harten Material sein. Zudem wird eine 7,0 mm Durchgangsbohrung eingebracht, um die Schalen durch Schrauben auf dem Spannkeil zu befestigen. [85]

Die zum Abschluss der Konzeptionierung durchgeführte FEM-Analyse bestätigt die Funktionalität des umgesetzten Aufbaus. Bild 4.5 stellt den Verlauf der Deformation und der Spannung des symmetrischen Einspannrings dar, bei der Aufspannung eines Stators mit dem Außendurchmesser von 240 mm und einem Gewicht von 55,2 kg. Mit einer maximalen Deformation von 0,002 mm am obersten Rand ist eine geometrische Veränderung der Vorrichtung nicht messbar.

4.3 Vorrichtungen zur robotergestützten Montage von Statoren

Für eine robotergestützte Montage von Statoren sind höhere Genauigkeiten und geringere Toleranzen erforderlich, als bei Nutzung der identischen Werkzeuge für eine manuelle Montage. Mit Hilfe der dargestellten Schablone ist es möglich, die Wickelmaschine mit Hilfe eines Roboters kollisionsfrei zu rüsten und anzufahren. Die dargestellte Einspannlösung für den Stator ermöglicht das konzentrische Einlegen mit einer hohen Positionierwiederholgenauigkeit unter geringem Zeit- und Kraftaufwand. Die gestalteten Werkzeuge sind flexibel für die definierten Baugrößen einsetzbar und durch minimalen Aufwand zu rüsten.

5 Flexibel automatisierte Wicklungsmontage

Ausgehend von einem nutgrundisolierten Stator ist der erste Prozessschritt das Wickeln der Einzelspulen. Im Fokus dieses Prozessschrittes steht der Schutz der Drähte vor Beschädigungen, die durch hohe Zugkräfte und Drahtkreuzungen entstehen können. Zudem muss die Überkreuzung von Drahtenden für eine problemlose Übergabe an den nächsten Prozessschritt vermieden werden [79].

Zur Übertragung der Einzelspulen werden sogenannte Setzverfahren untersucht, bei denen die Einzelspulen form- und kraftschlüssig auf den Magnetkörper übertragen werden (vgl. [17]). Es existieren aktuell zwei Standardmethoden: Die Wicklung kann automatisch mit Hilfe von Einziehwerkzeugen verteilt eingezogen oder manuell einträufelt werden. Der wichtigste Punkt ist hierbei, die Drähte vor Beschädigungen zu schützen. Zudem stellt die Handhabung biegeschlaffer Teile, wie z.B. Drähten, mit Hilfe von Robotern eine große Herausforderung dar. Spezielle Werkzeuge und Vorrichtungen für diese Aufgabe existieren bisher nicht und müssen zunächst entwickelt werden [33].

Die Darstellung der entwickelten Konzepte und Werkzeuge ist Inhalt des folgenden Kapitels. Zum Einsatz kommen die in 3.5.1 bereits vorgestellten Komponenten der Zelle. Der ambidextere Roboter Yaskawa SDA 20D übernimmt die Handhabung und Montage der in der Wickelmaschine der Firma Risomat gewickelten Einzelspulen. Der Stator ist in der unter 4.2 vorgestellten Statoraufnahme fixiert.

5.1 Konzeption von Prozessen zur Montage von Wicklungen

Für die Übertragung von Einzelspulen in Nuten eignen sich die Setzmethoden Einlegen („Träufeln“) und Einziehen.

5.1.1 Einträufeln von Wicklungen

Die einfachere Variante ist das ausschließlich manuell anwendbare Träufelverfahren, bei dem die Spulen durch wirbelnde Handbewegungen einzeln, radial in die Nut eingelegt werden [89]. Zur Erhöhung des Füllgrades der Nut werden die Drähte durch axiales Ziehen und radiales Drücken verdichtet. Aus Qualitätsgründen muss bei dem Prozess darauf geachtet werden, dass die Drähte nicht unter die Nutgrundisolation montiert und kreuzungsfrei gelegt werden. Zudem soll während des Prozesses die Lackschicht an den scharfkantigen Nutöffnungen nicht beschädigt werden. Das Verfahren ist sehr flexibel und kann spezifisch an die Wicklung sowie den Stator angepasst werden. Übliche manuelle Hilfsmittel sind ein Hammer und Formkeile sowie eine Träufelnadel, mit welcher die Wicklungen am Nutschlitz separiert werden können. Die Lackschicht wird hierbei nicht beschädigt. [17]

Für die Umsetzung mit Hilfe eines Roboters werden zunächst verschiedene Konzepte aufgestellt.

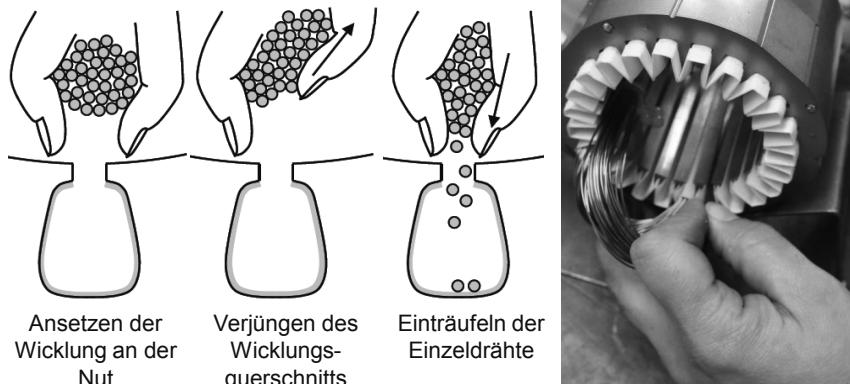


Bild 5.1: Einräufeln einer Wicklung [89]

Die erste Variante ist die in Kapitel 4.1 bereits beschriebene Kombination von Wickelschablone und Greifer. Die Spulen werden von vier sich spreizenden Spannbolzen aufgenommen. Die Beweglichkeit ermöglicht eine einfache Anpassung an unterschiedliche Statorgrößen. Das bewickelte Werkzeug wird vom Roboter axial in den Stator befördert und die Wicklung durch eine zum Stator radiale Bewegung montiert. [33]

Durch die Realisierung mit einem Werkzeug wird nur ein Roboterarm benötigt. Dies ermöglicht eine Prozesszeitoptimierung durch den zweiten Arm. Das Werkzeug ist zudem einfach aufgebaut und kann gleichzeitig als Wickelschablone eingesetzt werden. Ein wesentlicher Nachteil ist die aufwendige Justierung der Bolzen zur Anpassung auf Nutgeometrien. Einerseits muss der y-Abstand der Bolzen auf den Nutabstand eingestellt, andererseits der x-Abstand nachgeregelt werden, um den Draht nicht zu beschädigen. Da das Werkzeug immer vollständig in den Stator eingebracht werden muss, begrenzt der innere Statordurchmesser den Bauraum.

Die Nachteile des Konzeptes mit Spannbolzen sollen durch das zweite Konzept mit um die x-Achse rotierbaren Doppelzangengreifern ausgeräumt werden. Hierbei wird die Einzelspule an der kurzen Seite eingespannt und durch den Stator bewegt. Auf der anderen Seite greift der zweite Roboterarm das freie Ende der Spule. Beide Arme montieren die Spule anschließend durch eine synchrone Bewegung in radialer Statorrichtung. [33] [79]

Vorteile des Konzepts sind die Flexibilität gegenüber verschiedenen Statorgrößen. Zudem befinden sich die Werkzeuge während des gesamten Prozesses außerhalb des Stators.

Schwierigster Prozessschritt ist bei diesem Konzept das Greifen der freien Wicklungsenden mit dem zweiten Greifer. Durch die biegeschlaffen Eigenschaften ist die Position des zweiten Spulenkopfs nicht definiert. Zudem besteht die Möglichkeit der Drahtkreuzungen und -beschädigungen durch Verdrehen der Wicklungen am Wicklungsende. Ein weiterer Nachteil ist die Einstellung der Backenspannkraft. Einerseits müssen die Windungen genügend Bewegungsfreiraum während des Formens besitzen, andererseits darf ihre saubere Lageanordnung nicht verloren gehen.

Tabelle 5.1: Konzepte für das robotergestützte Träufelverfahren [33]

Konzept i	Konzept ii	Konzept iii	Konzept iv
Spannbolzen	Doppelzangen	Spannbacken	Kombination mit Einziehverfahren
<p>Bolzen</p> <p>winkelverstellbar</p> <p>Basisplatte</p>	<p>Doppelzangengreifer</p> <p>Zange 1</p> <p>Zange 2</p>	<p>Spannbacken</p> <p>Stempel</p>	<p>Spannbacken</p> <p>Stempel</p>

Im dritten Konzept fixiert der Greifer die Windungen über ihre gesamte Länge mit Hilfe von jeweils zwei Spannbacken. Die Spannbackenpaare können den Abstand und Winkel bezogen zur Nutgeometrie einstellen. Die Spannbacken öffnen sich auf Nutbreite, sodass diese während des Einschiebens der Drähte mit Hilfe von jeweils einem Stempel als Führung fungieren können [79]. Vorteil des Konzepts ist die Realisierung mit nur einem Werkzeug. Entsprechend ist auch bei diesem Konzept eine Prozesszeitenoptimierung durch den zweiten Roboterarm möglich.

Da zudem die Spulen permanent fixiert sind, besteht nur eine geringe Gefahr des Verlustes der Lagenanordnung. Nachteilig ist allerdings einerseits die genaue Anpassung des Werkzeugs an die Spulengeometrie, was zu einer geringen Flexibilität führt. Andererseits muss auch hier das Werkzeug vollständig in den Stator eingebracht werden. Der innere Stator Durchmesser begrenzt daher den Bauraum.

Als letztes Konzept ist die Kombination aus Einzieh- und Einträufelprozess angedacht. Die Einzelspulen werden durch zwei rotierbare Greifer, deren Abstand zueinander einstellbar ist, zum Stator transportiert. Die Wicklung wird diagonal zu den entsprechenden Nuten ausgerichtet, angelegt und an der einen Stirnfläche des Stators eingeschoben. Von der anderen Seite des Blechpakets wird ein Werkzeug eingeführt, welches das freie Ende der Wicklung greift und dieses anschließend durch den Stator und dabei in die Nuten zieht. Da sich das komplexe Werkzeug außerhalb des Stators bewegt, ergibt sich eine hohe Größenflexibilität. Es besteht jedoch die Gefahr, dass sich die freien Enden durch das einseitige Greifen verdrillen. [79]

Tabelle 5.2: Technische Bewertung der Konzepte zur Träufelmontage [79] [90]

Bewertungs-kriterien	W	Spann-bolzen		Doppel-zangen		Spann-backen		Kombi-nation	
		Maß-zahl	Wer-tungs-zahl	Maß-zahl	Wer-tungs-zahl	Maß-zahl	Wer-tungs-zahl	Maß-zahl	Wer-tungs-zahl
Definierte Aufnahme der Spulen	3	1	3	1	3	3	9	3	9
Zuverlässigkeit, Reproduzierbarkeit	4	1	4	1	4	3	12	3	12
Technische Komplexität	6	1	6	2	12	2	12	3	18
Größenvariabilität	8	2	16	3	24	1	8	3	24
Einträufelprozess	9	1	9	1	9	3	27	4	36
Wertigkeiten		38		52		68		99	
Technische Wertigkeiten		0,32		0,43		0,57		0,83	
Rangfolge		4		3		2		1	

Nach der Konzeptionierung können die maßgeblichen Kriterien für die Bewertung aufgestellt und die jeweiligen Wertigkeiten mit Hilfe einer gewichteten Bewertung nach Kesselring ermittelt werden (siehe Kapitel 4.2.2) [86]. Anhand der dabei entstehenden Ergebnisse können anschließend die verschiedenen Varianten quantitativ verglichen werden. Die ausführliche technische Bewertung der Konzepte des Gesamtsystems mit der Beschreibung aller Kriterien ist [33] zu entnehmen. In Tabelle 5.2 ist die Berechnung der einzelnen Wertigkeiten zusammengefasst aufgeführt. Wie der Bewertung zu entnehmen ist, eignet sich die Lösungsvariante am besten für die Umsetzung der vorliegenden Aufgabe, welche die Verfahren Einträufeln und Einziehen kombiniert. [90]

5.1.2 Einziehen von Wicklungen

Bei automatisierten oder teilautomatisierten Montagesystemen wird, neben direkten Wickelmethoden, das Einziehverfahren eingesetzt.

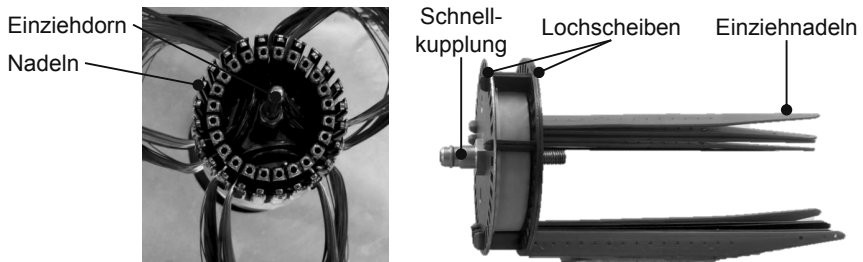
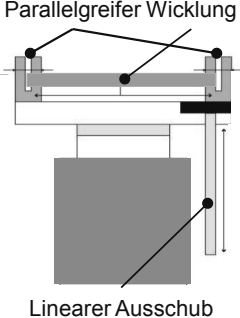
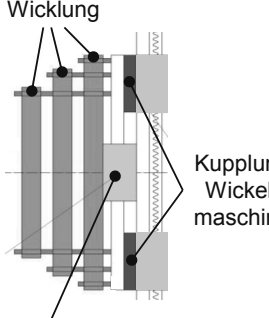
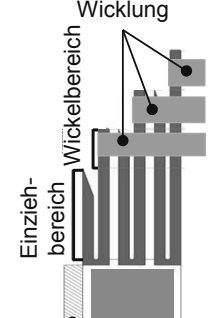


Bild 5.2: Einziehwerkzeuge: statorspezifisch, automatisiert (links); universell, manuell (rechts)

Die Einzelspulen werden auf die Nadeln des Einziehorns transportiert und so abgelegt, dass die Schlaufen die den Wickelkopf bilden innen und die Anschlusspunkte außerhalb liegen (Bild 5.2 links). Der Stator wird über dem Dorn positioniert. Beim axialen Ausfahren des Einziehpilzes wird Druck auf die Windungen aufgebaut, diese werden in die Nuten des Stators gedrückt und dabei verdichtet. Es folgt der automatisierte Prozess der Deckschiebermontage. [17]

Die Basis für die Umsetzung mit Industrierobotern bildet ein universelles Einziehwerkzeugsystem (Bild 5.2 rechts) [91]. Wichtigster Bestandteil sind die Einziehnadeln. Die Nadelgröße hängt von Statorinnendurchmesser, -länge und Nutabmessungen (Nutschlitzbreite und Steghöhe) ab. Sie sind zweiteilig aufgebaut und werden mit statorspezifischen Lochscheiben angeordnet. Nicht abgebildet ist der Einziehpilz, der die Wicklung durch den Stator drückt.

Tabelle 5.3: Konzepte für das robotergestützte Einziehverfahren [82]

Konzept I	Konzept II	Konzept III
Übertragungswerkzeug	Kombination von Übertragungswerkzeug und Wickelschablone	Bewickeltes Einziehwerkzeug
<p>Parallelgreifer Wicklung</p>  <p>Linearer Ausschub</p>	<p>Wicklung</p>  <p>Kupplung Wickelmaschine</p> <p>Kupplung Roboter</p>	<p>Wicklung</p>  <p>Einziehbereich</p> <p>Wickelbereich</p> <p>Kupplung Roboter</p> <p>Kupplung Wickelmaschine</p>

Die Wicklungsmontage erfolgt in den folgenden Schritten:

- Einfahren der vorgewickelten Spulen in das Einziehwerkzeug
- Drücken des Werkzeugs durch den Stator und Einziehen der Spulen
- Entfernen und neu Positionieren des Werkzeugs im Stator

Hinsichtlich der robotergestützten Wicklungsmontage werden die Prozessschritte Aufnehmen, Übertragen und Ablegen der Spulengruppen im Einziehwerkzeug als am kritischsten angesehen. [82]

Innerhalb des Konzeptes I wird das Ziel verfolgt, die beschriebene, manuelle Vorgehensweise auf die robotergestützte Lösung zu transferieren. Dabei müssen die vorgewickelten Einzelspulen von der Wickelschablone mittels Übertragungs- bzw. Greifwerkzeug in die Nadeln des Einziehwerkzeuges transferiert und dort form-, sowie lagerichtig positioniert werden. Vorteile sind die Flexibilität, der kostengünstige Aufbau und die geringe Masse. Nachteilig ist, dass die Einziehnadeln für die manuelle Montage ausgelegt wurden und das Greifen einer gesamten Spulengruppe problematisch ist.

Konzept II integriert das Übertragungswerkzeug in die Schablone. Hierbei werden Übertragungsfehlerquellen eliminiert und die kombinierte Größenverstellung von Schablone und Werkzeug gewährleistet. Vorteile des Konzepts sind die schnelle Wicklungsaufnahme sowie die prozesssichere Übertragung der Spulen. Jedoch muss zunächst ein geeignetes Kupplungssystem entwickelt werden. Zudem sind der Bauraum und das Gewicht des Werkzeugs groß.

Tabelle 5.4: Technische Bewertung der Konzepte zur Einziehmontage

Bewertungs-kriterien	W	Übertragungs-werkzeug		Kombination von Übertra-gungswerkzeug und Schablone		Bewickeltes Einziehwerk-zeug	
		Maß-zahl	Wer-tungs-zahl	Maß-zahl	Wer-tungs-zahl	Maß-zahl	Wer-tungs-zahl
Definierte Aufnahme der Spulen	3	1	3	3	9	4	12
Zuverlässigkeit, Reproduzier-barkeit	5	2	10	2	10	4	20
Technische Komplexität	7	4	28	2	14	2	14
Größenvariabilität	8	3	24	2	16	2	16
Einziehprozess	10	4	40	3	30	3	30
Wertigkeiten		105		79		92	
Technische Wertigkeiten		0,80		0,60		0,70	
Rangfolge		1		3		2	

Bei Konzept III wird direkt auf das Einziehwerkzeug gewickelt. Die Prozessschritte Entnehmen, Transport und Einlegen der Einzelspulen entfallen hierbei und mit ihnen auch die potentiellen Fehler durch Übertragungsschritte (Formverluste oder Drahtkreuzungen). Das Einziehwerkzeug wird auf der oberen Schablone des Linearwicklers angebracht. Um das Bewickeln der Spulen zu ermöglichen, muss das Nadelpaar aus zwei, der Wicklungsbreite entsprechenden, unterschiedlich langen, stabilen Nadel bestehen. Nach dem Wickelprozess wird das Werkzeug vom Roboter aufgenommen, im Stator positioniert und durch den Stator geschoben.

Auch dieses Konzept ermöglicht die prozesssichere Übertragung der Spulen. Nachteilig sind jedoch der hohe Entwicklungsaufwand und der kostenintensive Aufbau.

Nach Konzeptionierung werden die gewichteten Bewertungen ermittelt. Beim Konzept mit dem Übertragungswerkzeug wird der geringste Zeit- und Investitionsaufwand erwartet. Zudem ist eine gute Flexibilität, bezogen auf verschiedene Statortypen, gegeben. Bei dem Konzept, welches Übertragungswerkzeug und Wickelschablone kombiniert, ist der Aufwand der Umsetzung zu hoch. Beim konzeptionierten bewickelten Übertragungswerkzeug ergeben sich durch den komplexen Aufbau weitere Probleme, wie der Ankuppelprozess oder die Auslegung der Nadeln. [82]

5.2 Material der Wicklung

Der zu verarbeitende Draht wird im Datenblatt des Stators als „Cu 01,0 Grad 2“ beschrieben. Unter dieser Bezeichnung wird Kupferlackdraht mit Nenndurchmesser 1,0 mm gelistet. Der Außendurchmesser liegt aufgrund des verwendeten Kupferlacks bei der Klasse „Grad 2“ nach DIN EN 60317-0-1 im Bereich von 0,118 mm bis 0,125 mm. [92]

5.3 Werkzeuge zur Montage von Wicklungen

Beim ausgewählten Konzept der Träufelmethode muss zwischen den beiden erforderlichen Werkzeugen „Träufelgreifer“ und „Einziehgreifer“ unterschieden werden. Bei dem Konzept unter Anwendung der Einziehmethode werden ein Werkzeug zur Aufnahme des Einzugwerkzeuges und ein Werkzeug zur Handhabung der Wicklung benötigt.

5.3.1 Greifer zur Träufelmontage von Wicklungen⁵

Für das weitere Vorgehen sind zunächst die Anforderungen an das Greiferwerkzeug zu definieren. Orientiert an der Flexibilität zwischen verschiedenen Spulen- und Statorgeometrien werden die Mindestmaße für die Spannbacken abgeleitet. Prozessgetrieben müssen die Windungen in einem Winkel von 45° zum Statoransatzpunkt des Werkzeugs versetzt gegriffen werden. Anhand der Wicklungsbreite und der führenden Eigenschaft der Spannbacken wird die Spannbackenlänge auf 30,0 mm festgesetzt. Der Abstand zwischen den Spannbacken, und damit auch der Spannhub, muss mindestens 4,0 mm betragen.

⁵ Bei dem Aufbau des Träufelgreifers wurde ich unterstützt von Herrn Thomas Dippold und Herrn Tobias Grimme.

Die maximalen Auslenkungen von 0° bis 110° ergeben sich aus den Wickelbildern und der Geometrie der Statoren. Aufgrund der engen geometrischen Abmessungen werden die Toleranzen für Abstand zwischen den Greifern und Abstand der Spannbackenöffnungen auf maximal 0,1 mm, die Toleranz für den Neigungswinkel der Greifer auf maximal $1,0^\circ$ festgelegt.

Zu beachten sind außerdem die Anlagenvorgaben zum Anschluss eines Werkzeugs. Für elektrische Bauteile können zwei acht-polige Kabel (max. 1,0 A), für pneumatische Bauteile zwei Schläuche mit dem Durchmesser $d_A = 6,0$ mm (max. 4,9 bar) verwendet werden. Das Gesamtgewicht muss unter 20 kg liegen. Aus den dargestellten Anforderungen werden die Ausprägungen der Merkmale abgeleitet. Eine Bewegung und Justierung der Wagen auf der Linearschiene erfolgt indirekt über zwei gelenkig angebundene Arme, die wiederum in Deltaform über ein Drehgelenk an einem gemeinsamen Schlitten angebracht sind. Mittels eines winkeligesteuerten Elektromotors kann über die Rotation der Gewindestange die Höhe des Schlittens variiert und somit der Zwischenraum zwischen den Wagen definiert reguliert werden. Die Antriebe werden als kompakte und gegenüber Servomotoren kostengünstige Schrittmotoren ausgeführt [93].

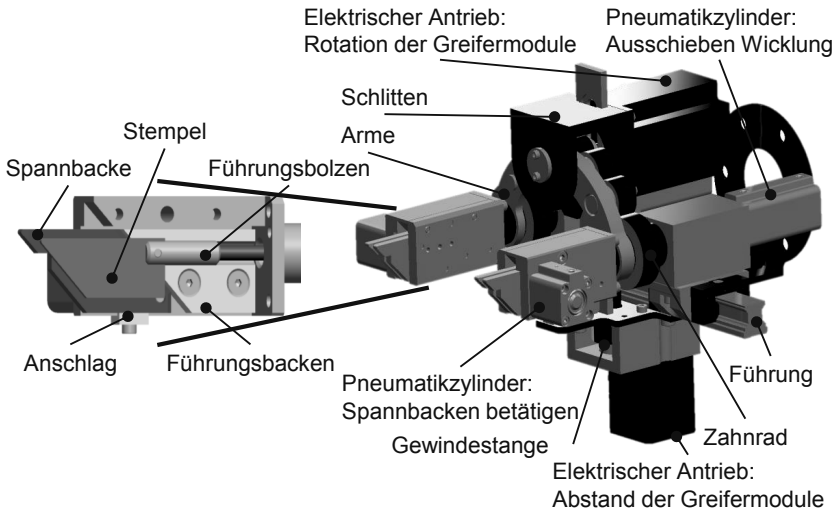


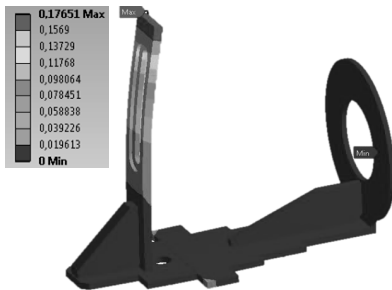
Bild 5.3: Darstellung des Träufelgreifers [33] [90]

Zwei pneumatische Zylinder öffnen und schließen die Spannelemente, zwei weitere können über eine Hohlwelle mit einem Stempel die Wicklung in die Statornuten schieben. Die Führung der Spannmodule erfolgt über Bolzen.

Die genaue Funktionsweise des Greifers sowie die detaillierte Beschreibung des Aufbaus kann [33] entnommen werden. Der Entwurf wird anschließend bezüglich der räumlichen Verträglichkeit und Festigkeit überprüft. Hierbei wird das Gestell in einer statischen Festigkeitssimulation modelliert. Das Gestell wird fest am Flansch eingespannt und mit einer Gewichtskraft von 60 N (Position Kugelschiene), welche den Massen der Greifermodule und den Prozesskräften entspricht, belastet. Zudem wird ein Drehmoment von 0,7 Nm in 125 mm Höhe beaufschlagt, was dem Gewicht des Motors und seinem Schwerpunktabstand entspricht.

Die Gesamtdeformation am höchsten Punkt der Führungssäule beträgt 0,18 mm. Angesichts der kleinen Deformationen der Grundplatte liegt die Konstruktion im Rahmen der geforderten Toleranzen. Die Spannung liegt bei maximal 21,4 MPa in dem nicht kritischen Bereich einer Schweißnaht zwischen Rippe und Bodenblech und resultiert aus einer Spannungssingularität [94]. [90]

Verformung (in mm)



Spannung (in mPa)

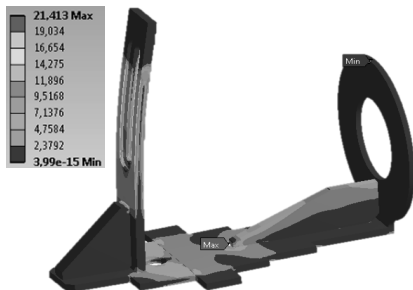


Bild 5.4: FEM Simulation des Verlaufs der Deformation (links) und der von Mises Vergleichsspannung (rechts) am Werkzeug [90]

5.3.2 Greifer zum Durchziehen der angelegten Wicklung⁶

Nach der Konzeptionierung des Träufelgreifers muss das passende Einziehwerkzeug entwickelt werden. Es besteht aus den Hauptkomponenten Drahtaufnahme, Antrieb und Kinematik.

⁶ Bei dem Aufbau des Greifers zum Durchziehen der Wicklung wurde ich unterstützt von Herrn Florian Faltus.

Tabelle 5.5: Morphologische Matrix für die Merkmale des Hakenwerkzeuges

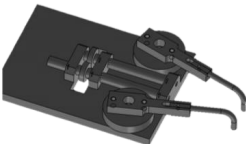
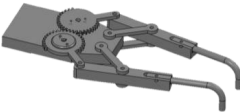

Kriterium	Lösungsvariante		
	Drahtaufnahme	Halb gebogene Nadel	Voll gebogene Nadel
Antriebsform	Pneumatisch	Elektrisch	Hydraulisch
Kinematik	Translatorisch	Rotatorisch	Mischform
Anzahl bewegter Greifarme	Eins	Zwei	

Die vollgebogene Nadel bietet Vorteile durch eine bessere Fixierung des Drahtes. Die ausgewählte, halb gebogene Nadel zeichnet sich jedoch durch ein besonders leichtes Ein- und Ausfädeln des Drahtes aus, wodurch die spätere Programmierung vereinfacht wird. Der Parallelgreifer ist, verglichen mit den Nadeln, mit zu hohen Zusatzkosten (System und Programmierung) beaufschlagt.

Die Bewegungserzeugung mit Hilfe von elektrischen Antrieben wird gewählt, da durch den Roboter bereits eine Stromversorgung durch die Arme vorgegeben ist. Elektrische Antriebe sind sehr genau steuerbar, allerdings gibt es ohne zusätzliche Verkabelung einige Einschränkungen im Bereich der Kraftaufnahme, da die Versorgung durch den Arm limitiert ist. Eine pneumatische Bewegungserzeugung bietet sich ebenfalls an, da bereits eine Druckluft-Versorgung zur Verfügung steht. Eine genaue Bewegung auf mehrere Positionen ist aber bei pneumatischen Systemen problematisch. Die hydraulische Alternative scheidet aufgrund der hohen Systemkosten aus.

Durch die geforderte geringe Systembreite verfahren die beiden Greifnadeln rotatorisch. Sie sind um einen gemeinsamen Drehpunkt gelagert und bewegen sich auf einer halbkreisförmigen Bahn. [95]

Tabelle 5.6: Konzepte für den Hakengreifer [95]

Konzept a	Konzept b	Konzept c
Rotatorische Bewegung durch einen Schneckenantrieb	Überlagerte translatorische und rotatorische Bewegung	Rotatorische Bewegung durch gemeinsamen Drehpunkt
		

Ein translatorischer Aufbau wäre zu breit, eine Mischform, bei der sich nur eine Nadel bewegt, zu aufwändig zu regeln. Auf Basis der Auswahl werden verschiedene Konzepte in Tabelle 5.6 näher vorgestellt.

Beim Konzept mit einem Schneckenantrieb wird mit Hilfe von zwei Drehpunkten eine rotatorische Bewegung der Werkzeugarme ermöglicht. Zahnräder teilen die Bewegung des Motors auf zwei Schnecken auf und geben sie dann an den Arm weiter. Das System ist durch den Einsatz der Schnecken selbsthemmend, allerdings fehleranfällig und durch den hohen Anteil an Sonderteilen kostenintensiv. Die zwei Drehpunkte erhöhen zudem die Breite des Systems deutlich. Vorteile sind der günstige Kraftfluss, die Selbsthemmung der Arme sowie die Möglichkeit der genauen Ansteuerung. Das Konzept ist jedoch teuer und fehleranfällig. Zudem wird sowohl ein breiter Grundkörper als auch eine Schmierung der Komponenten benötigt.

Beim Konzept b wird die Bewegung eines Antriebs auf zwei Zahnräder übertragen, welche die beiden Nadeln um zwei sich bewegende Drehpunkte positionieren. Durch diese Drehpunkte kann die Breite deutlich reduziert werden. Diese überlagerte rotatorische und translatorische Bewegung zieht jedoch auch Kompensationsbewegungen des Roboters nach sich. Vorteilhaft bei diesem Konzept sind der günstiger Kraftfluss, der schmale Grundkörper und die Möglichkeit der genauen Ansteuerung. Zudem ist das Werkzeug weniger fehleranfällig. Nachteile sind hingegen die kostenintensiven Zahnräder sowie die nötige Bewegungskompensation durch den Roboter und die Schmierung der Komponenten.

Beim Konzept mit einer Bewegung um einen gemeinsamen Drehpunkt werden beide Nadeln mittels eines Linearaktors und eines gabelkopffartigen Adapters synchron bewegt. Die Nadeln sind hierbei sowohl mit dem Adapter – dem Drehpunkt – als auch mit dem Grundkörper verbunden. Der einzelne Drehpunkt ermöglicht einen schmalen Aufbau, die rein rotatorische Bewegung einen großen Öffnungswinkel. Das Konzept zeichnet sich aus durch einen günstigen Kraftfluss, einen sehr schmalen Grundkörper, die Möglichkeit der genauen Ansteuerung, die geringe Fehleranfälligkeit und den wartungsarmen Betrieb. Nachteilig ist die Integration eines zusätzlichen elektrischen Antriebs.

Die bedeutendsten Kriterien stellen die Genauigkeit und Zuverlässigkeit – auch im Sinne der allgemeinen Verfügbarkeit – dar. Aus dem Vergleich der Konzepte in Tabelle 5.7 geht Konzept c als beste Variante hervor, da diese alle funktionsrelevanten Kriterien erfüllt.

Der Greifer besteht aus dem Grundkörper, welcher den Antrieb integriert, den beiden Greiferarmen, den Einziehnadeln samt deren Aufnahme sowie dem Adapter zwischen den Armen und dem Antrieb (Bild 5.5).

Tabelle 5.7: Technische Bewertung der Konzepte des Einziehgreifers

Bewertungs- kriterien	W	Schnecken- antrieb		Überlagerte Bewegung		Drehpunkt	
		Maß- zahl	Wer- tungs- zahl	Maß- zahl	Wer- tungs- zahl	Maß- zahl	Wer- tungs- zahl
Fertigung	3	1	3	3	9	3	9
Abmessungen	7	1	7	3	21	4	28
Fehleranfälligkeit	7	1	7	3	21	3	21
Zuverlässigkeit	9	1	9	2	18	3	27
Genauigkeit	10	1	10	3	30	3	30
Wertigkeiten		36		99		115	
Technische Wertigkeiten		0,25		0,69		0,80	
Rangfolge		3		2		1	

Auf der Grundplatte ist der Linearantrieb untergebracht, der durch seine Schubstange den Adapter bewegt, welcher wiederum die Arme öffnet. Er muss genügend Drehmoment aufbringen, um die auftretenden Kräfte während des Einziehens aufzunehmen. Die Schubstange des Antriebs wird über den Adapter mit dem Greifmodul verbunden. Hauptbestandteil dieses Moduls sind die Greiferarme, welche die Einziehnadeln aufnehmen und durch die Umlenkhebel geführt werden.

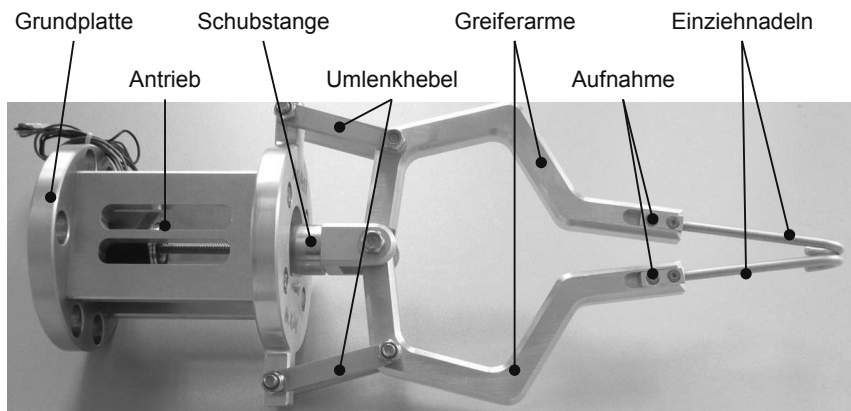


Bild 5.5: Aufbau des Hakengreifers, zum Durchziehen der Wicklung

Die Nadelbauteile dienen der Fixierung der Wicklung und bestehen aus Aufnahme und der eigentlichen Nadel. Dieser zweiteilige Aufbau ermöglicht einen schnellen Wechsel der Nadeln und damit eine flexible Anpassung, auch an längere Blechpakete. Um Beschädigungen des Drahtlackes zu vermeiden, sind die Einziehadeln abgerundet. [95]

5.3.3 Greifer für die Einziehmontage von Wicklungen

Zunächst werden ebenfalls die Anforderungen an den Greifer aufgestellt. Die wichtigsten Kriterien bei der Umsetzung von Konzept I sind die gleichzeitige und kreuzungsfreie Übertragung einer Spulengruppe sowie die Flexibilität bezüglich verschiedener Statorgeometrien. Die Greiferflächen müssen dabei die sichere Aufnahme, den sicheren Transport und die sichere Ablage der Wicklung gewährleisten.

Tabelle 5.8: Morphologische Matrix für die Merkmale des Einziehgreifens [33] [82]

Kriterium	Auswahl				Begründung
Spulenaufnahme					
Art der Kraftübertragung	Formschlüssig	Kraftschlüssig	Kombiniert		Enger Bauraum
Spulenaufnahme	Paralleles Greifen	Adhäsiv	Punktuelles Greifen	Druckluftkissen	Sicheres Greifen
Greiferbackengeometrie	Rund	Ellipsenförmig	Eben		Keine Sonderform nötig
Ort der Kraftangriffspunkte	Spulenseiten	Spulenköpfe	Schrägen	Kombiniert	Erreichbarkeit und Führung
Einziehwerkzeug					
Größenvar. Einziehnadeln	Lochscheiben	Kinematik	Manuell		Einfacher Aufbau
Einziehpilzdurchmesser	Standard: modular	Universal	Kinematisch		Kostengünstig
Ausleger Einziehpilz	Fest	Ausfahrbar			Prozessflexibilität
Lineare Führung Einziehpilz	Nicht erforderlich	Rundstange	Wälzkörperführung	Schwalbenschwanzführung	Kostengünstig
Erzeugung Einziehkraft	Pneumatisch	Elektrisch: Spindeltrieb	Hydraulisch	Roboter	Einfacher Aufbau
Zugwerkzeug					
Art der Kraftübertragung	Formschlüssig	Kraftschlüssig	Kombiniert		Einfacher Aufbau
Lösen des Werkzeuges	Pneumatisch	Elektrisch			
Radialkraft zur Positionierung	Dorn / Bohrung	Über Kupplung	Nase / Nut		Einfacher Aufbau

Das Durchziehwerkzeug muss prozesssicher aufgenommen, durchgezogen und repositioniert werden. Zu beachten sind außerdem die Anlagenvorgaben zum Anschluss der Werkzeuge. Für elektrische Bauteile können zwei acht-polige Kabel (max.1,0 A), für pneumatische Bauteile zwei Schläuche mit dem Durchmesser $d_A = 6,0 \text{ mm}$ (max. 4,9 bar) verwendet werden.

Zur Handhabung können die Spulen an den Seiten oder am parallelen Wickelkopf gegriffen werden. In Tabelle 5.8 wird die Funktionsanalyse des zu entwickelnden Werkzeuges durchgeführt. Ein Ergebnis von vorbereitenden Versuchen ist, dass die Spulenaufnahme und -übertragung vom Schablonenwickler in das Einziehwerkzeug die größte Fehlerquelle darstellt. Die Spulen der Spulengruppe werden durch eine Schubbewegung in eine gemeinsame Ebene gebracht und aufgenommen. Da ein Übertragungswerkzeug in Stangenbauform, wie manuell üblich, ohne universelle Kinematik zur Größenvariation nicht einsetzbar ist, müssen die Spulen anders gegriffen werden.

Es wird daher ein paralleler Greifer realisiert, der die drei Spulen am Wickelkopf in drei Ebenen getrennt voneinander klemmt. Er besteht aus zwei ineinandergreifenden Frästeilen und einem kompakten doppelwirkenden Pneumatikaktor und wird an das Einziehwerkzeug montiert.

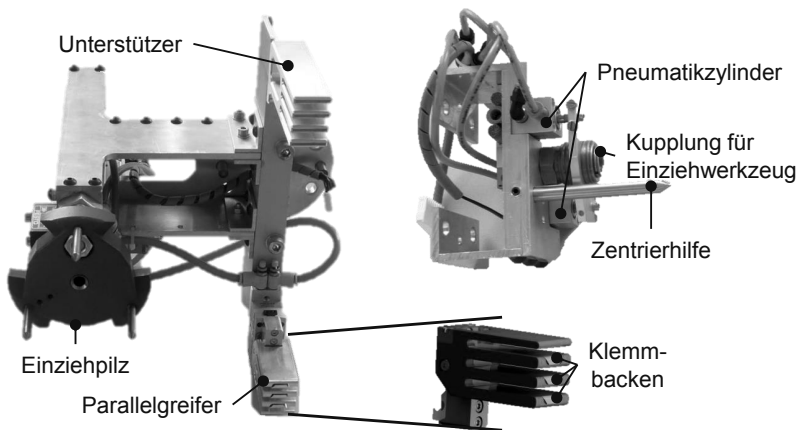


Bild 5.6: Einziehgreifer (links) und Zugwerkzeug (rechts oben)

Dieses ist am linken Roboterarm angeflanscht und hat die Aufgabe, die Spulen aufzunehmen, zu transportieren, auf das Einziehwerkzeug abzulegen sowie das Einziehwerkzeug mit dem Einziehpilz pneumatisch durch den Stator zu drücken. Am zweiten Roboterarm wird das Zugwerkzeug montiert. Es nimmt das Einziehwerkzeug nach dem Durchziehprozess auf und positioniert es neu.

Die Handhabung erfolgt durch eine Druckluftkupplung, welche symmetrisch, mittels zwei parallel auslösbarer zweifachwirkender Druckluftzylinder, betätigt wird.

Das System ist in Bild 5.6 dargestellt. Weitere Informationen zum Aufbau und der Funktionsweise kann [33] entnommen werden. [82]

5.4 Automatisierte Montage von Wicklungen in den Stator

Im Rahmen der Forschungsarbeiten konnten zwei verschiedene Konzepte zur robotergestützten Wicklungsmontage entwickelt werden. Mit beiden Konzepten gelingt die Montage der vorgewickelten Einzelspulen in den Stator. Aufgrund der schnelleren Prozesszeiten durch die verringerte Anzahl an Wickel- und v.a. Kontaktierprozessen ist das vorgestellte Einziehkonzept für eine roboter-automatisierte Fertigungszelle zielführender. Vor dem Einsatz in einer automatisierten Fertigung steht die Erhöhung der Prozess- und Betriebssicherheit der Werkzeuge aus. Neben der automatisierungsgerechten Gestaltung des Einziehwerkzeuges, z.B. durch steifere Nadeln und Führungen, ist v.a. ein prozesssicheres Greifen und Ablegen der Wicklungen durch formschließende Elemente im nächsten Entwicklungsschritt vorgesehen.

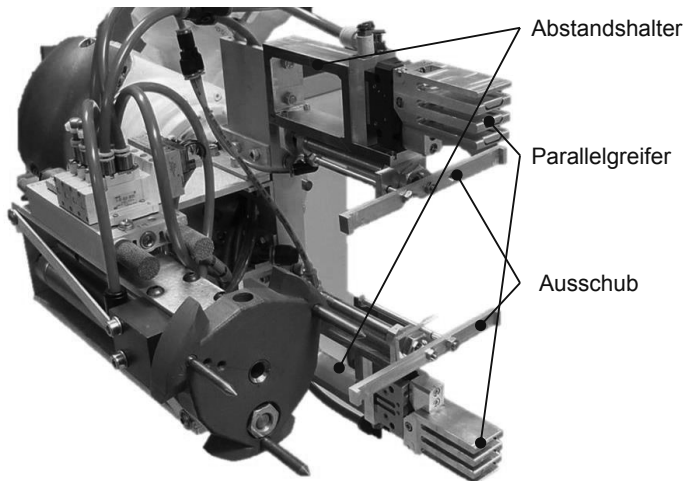


Bild 5.7: Erweiterung des Einziehgreifers [96]

Die Weiterentwicklung des in Kapitel 5.3.3 vorgestellten Werkzeuges ist in Bild 5.7 dargestellt. Das System wird um einen zweiten, aktiven Parallelgreifer erweitert, der ein paralleles Entnehmen der beiden Wickelköpfe gewährleistet und damit das Risiko möglicher Drahtkreuzungen minimiert. Beide Aktoren werden auf Abstandshaltern positioniert, um einem zweiten pneumatischem System Einbauraum zu bieten.

Es bewegt linear zwei Ausschübe und ermöglicht so das Abstreifen der Einzelpulen in das Einziehwerkzeug. Durch diesen Prozess wird vermieden, dass einzelne Windungen, trotz geöffneten Greifaktors, durch Reibschluss wieder aus dem Einziehwerkzeug gezogen werden. Eine ähnliche Umgestaltung ist auch für die Wickelschablone realisierbar. Zur Erweiterung des Systems zur Handhabung paralleler Drähte, die insbesondere bei leistungsstarken Antrieben notwendig sind, müssen zudem Lösungen entwickelt werden, die ein prozesssicheres Spannen und Halten der Wicklungsenden ermöglichen. [96]

6 Robotergestützte Isolation von Wicklungen

Die Montage der Deckschieber ist der Prozessschritt, der dem Wickeln entweder unmittelbar folgt oder bereits während der Montage der Wicklungen durchgeführt wird. Die Deckschieber erfüllen einerseits die Funktion der mechanischen Fixierung der Wicklung in der Nut, andererseits isolieren sie die stromführenden Wicklungen von Blechpaket und Rotor. Entwickelte Konzepte und Werkzeuge für diesen Prozessschritt werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

Zum Einsatz kommen die in 3.5.1 vorgestellten Komponenten der Zelle. Der ambidextere Roboter Yaskawa SDA 20D übernimmt die Handhabung und Ansteuerung der Werkzeuge. Der Stator ist in der unter 4.2 vorgestellten Statoraufnahme fixiert.

6.1 Konzeptionierung von Prozessen zur Isolation der Wicklung

Zunächst werden die Prozesse für die Isolation der Wicklungen konzeptioniert. Hierzu gehören die Schritte „Montage der Deckschieber“ und „Imprägnierung“.

6.1.1 Montage von Deckschiebern

Die Automatisierung des Prozessschrittes der Deckschiebermontage stellt eine große Herausforderung dar. Probleme bei der Zugänglichkeit, die undefinierte Lage der Wicklung in der Nut und die durch den Einfädelprozess engen Toleranzen sowie die spezielle Geometrie des Deckschiebers sind dabei treibend [33].

Eine prinzipielle Herangehensweise ist in Bild 6.1 dargestellt. Ein pneumatischer Aktor schiebt den Deckschieber über eine verjüngende Nut in den Stator. Die Bereitstellung des Materials kann magaziniert oder endlos (Zuschnitt über Cutter) erfolgen. Aufgrund der schlechten Zugänglichkeiten sind jedoch Niederhalter nötig, welche die Wicklung am Kopf und in die Nut drücken. Zudem ergeben sich durch das Einfädeln sehr hohe Toleranzen, die von der Robotersteuerung genau adressiert werden müssen.

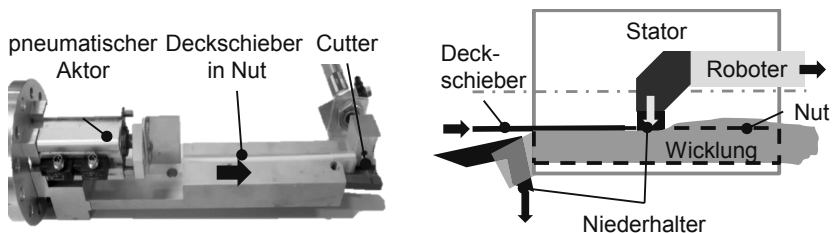


Bild 6.1: Prinzip der robotergestützten Deckschiebermontage [80]

6.1.2 Substitution der Deckschieber

Um die beschriebenen Probleme der Zugänglichkeit und des Einfädelns zu umgehen, stellt die Substitution des Deckschiebers durch ein pastenförmiges Material mit den entsprechenden isolierenden und mechanischen Eigenschaften eine sinnvolle Alternative dar. Das Substrat kann dabei, wie Bild 6.2 darstellt, robotergeführt in die Nut eingespritzt werden [33].

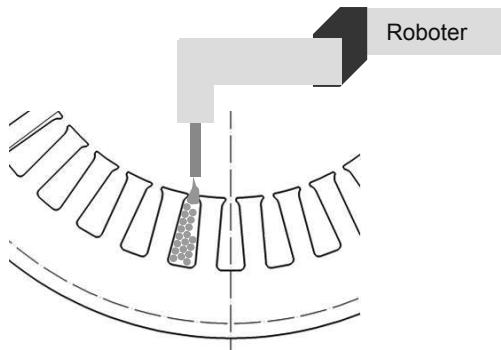


Bild 6.2: Substitution des Deckschiebers durch eine isolierende Paste [33]

Die Kinematik fährt das Werkzeug, bestehend aus Materialzuführung, Dosiersystem und Düse, in den Stator. Zu erwarten ist auch bei dieser Methode die undefinierte Lage der Wicklung in der Nut. Da dieser Prozess bisher nicht automatisiert angewendet wurde und dementsprechend nicht erprobt ist, muss zunächst ein geeignetes Material, anschließend das entsprechende Einspritzwerkzeug entwickelt werden.

6.1.3 Imprägnierung von Wicklungen⁷

Einer der folgenden Prozessschritte ist die Isolation der Wicklung in der Nut. Diese erfolgt zum Schluss der Prozesskette. Die im vorangehenden Kapitel dargestellten Konzepte sollen die flexible Applikation und Erweiterung von Systemkomponenten erlauben. Daher wird als Ausblick die Integration der Wicklungsisolation konzipiert. Als Isolierprozess kommt einzig das Träufelverfahren in Frage. Hierbei wird das Harz mit Hilfe eines Dosierkopfes appliziert.

⁷ Bei der Konzeptionierung des Imprägnierprozesses wurde ich unterstützt von Herrn Florian Dürbeck.

Der Stator ist schräg gestellt (Neigung zwischen 5° und 20°) und rotiert, um seine eigene Achse, bis das Material geliert ist [21]. Eigenschaften sind ein gewichtsoptimierter Materialeintrag, jedoch auch ein mechanischer Reinigungsaufwand. Andere Verfahren, wie die Tauch- oder Vakuumdruck-Imprägnierung sowie der Statorvollverguss, kommen aufgrund des apparativen Zusatzaufwandes nicht in Frage.

6.2 Materialien zur Isolation der Wicklung

Einleitend werden zunächst Anforderungen und Eigenschaften an Isolationsmaterialien erläutert. Orientiert an diesen Rahmenbedingungen werden für die Isolation von Wicklungen passende Materialien analysiert und ausgewählt.

6.2.1 Anforderungen an Deckschiebermaterialien

Die Wicklungsisolation beeinflusst die Lebensdauer eines Elektromotors maßgeblich [21]. Bis zu einer Betriebsspannung von 1.000 V geben v.a. die mechanische Belastung während der Montage und des Betriebs die Dicke des Materials vor [17]. Montagebezogene Schäden entstehen v.a. durch Kontakt und resultierender Reibkraft zwischen verschiedenen Komponenten. Zusätzlich wird die Isolation durch Umgebungseinflüsse sowie elektrische, thermische und mechanische Alterungsprozesse beeinflusst.

Erhöhte Temperatur, durch Wirbelstromverluste im Stator oder unterbrochene Motorkühlung, induzieren chemische Reaktionen, welche die Eigenschaften des Materials beeinflussen. Wichtige Parameter bei der Isolation sind die dielektrischen und mechanischen Werte des Stoffes.

Mechanische Belastungen während des Betriebs lassen sich hauptsächlich auf eine fehlerhafte Imprägnierung zurückführen, die sowohl durch den Prozess als auch das Imprägniermaterial (thermomechanische Spannungen durch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten) hervorgerufen werden können. Durch die Relativbewegungen einzelner Bestandteile entstehen Reibkräfte, welche sowohl die Beschichtung der Wicklung als auch die Deckschieber beschädigen können. Eine weitere Ursache können Störsignale, die durch Synchronisations- und Schaltbefehle entstehen, darstellen. Durch ein kurzes, energiereicheres Signal wird eine bis zu 25-fach stärkere Magnetkraft erzeugt. [97]

Ab 1.000 V Betriebsspannung bestimmen die elektrischen Belastungen die Isolationsdicke [17]. Die mittlere Feldstärke und die anliegende Spannung sind Maßzahlen für die Berechnung der Isolationsdicke [98]. Ein wesentliches Problem ist das Auftreten von Spannungsentladungen, die sich auf Fehlstellen im Isolationsmaterial zurückführen lassen und Potentialdifferenzen verursachen. Eine weitere Belastung stellen kurzzeitige Spannungsanstiege – Stoßspannungen – dar, hervorgerufen meist durch Schaltvorgänge, Kurzschlüsse oder Störungen.

Der Spannungsanstieg erfolgt hierbei deutlich schneller als der folgende Spannungsabfall [99]. Eine Beschädigung des Motors durch Durchschläge kann dabei nicht ausgeschlossen werden [97].

Zusammengefasst sind die relevanten Eigenschaften von Deckschiebern eine hohe dielektrische Festigkeit, geringer Raumbedarf bei festem Sitz in der Nut, konstante Materialeigenschaften, hohe Wärmeleitfähigkeit und, bei festen Materialien, günstige Reibeigenschaften [97]. Tabelle 6.1 stellt die unterschiedlichen Materialien zur Verwendung als Deckschieber unter Angabe der Temperaturfestigkeit dar.

Tabelle 6.1: Isolationsmaterial für Spannungen bis 500 V [21] [100] [101] und entsprechende Produktnamen der Firma Dr. D. Müller GmbH

Wärmeklasse	B	F / H	H
Grenztemp.	130 °C	155 °C / 180 °C	180 °C
Beschreibung	<ul style="list-style-type: none"> • Polyesterfolie • Herstellung im Strangziehverfahren • Transparent • Gut bearbeitbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Polyamidpapier / kalandriert • Aufbau aus aromatischen Polyamidfasern 	<ul style="list-style-type: none"> • Polyamidfolie • Beschichtet mit Polyfluoräthylenpropylen (FEP) (dient als Kleber)
Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • Dichte ca. 1400 kg/m³ • Hohe Festigkeit (mechanisch und elektrisch) • Durchschlagspannung bei 0,25 mm Dicke: 0,85 kV/mm • Schmelzpunkt ca. 260 °C 	<ul style="list-style-type: none"> • Dichte 800 - 1.000 kg/m³ • Durchschlagspannung 26 kV/mm • Zugelassen bis 220 °C 	<ul style="list-style-type: none"> • Dichte ca. 1400 kg/m³ • Gute mechanische und elektrische Eigenschaften bis 350 °C • Durchschlagspannung 100 bis 200 kV/mm • Einsetzbar von -270 °C bis + 210 °C
Produktname	Mylar ®	Nomex ®	Kapton ®

Ein weiterer Ansatz ist die Verwendung eines Deckschiebers aus einer Harz-Eisen-Pulvermischung. Der Aufbau ist zweiteilig. Während die Nutgrundisolation- und wicklungsberührenden Flächen normal ausgeführt sind, besitzt die Stegfläche einen sehr hohen Anteil an Eisenteilchen. Eine magnetische Wirkung verhindert das Hinausgleiten des Deckschiebers. Über den Einfluss auf den Magnetfluss besteht jedoch keine Aussage. [102]

Einen wichtigen Einfluss auf die Funktion besitzt, neben dem Material, auch die Geometrie. Um dielektrische und mechanische Eigenschaften zu erfüllen, beträgt die Dicke 0,25 mm [97]. Deckschieber sollten einerseits ausreichend flexibel sein, um sich an den Füllgrad einer Nut anzupassen, andererseits zur Montage eine ausreichende Steifigkeit besitzen.

Zwei gefaltete Falten unterstützen diese Eigenschaften [21] und führen zusätzlich nach der Montage im vorgespannten Zustand durch Aufspannen zu einem Kraftschluss [26]. [103]

6.2.2 Auswahl eines Materials zur Substitution des Deckschiebers

Kleben zählt nach DIN 8593-0 zu den stoffschlüssigen, i.d.R. nicht zerstörungsfrei lösbaren Fügeverfahren [104]. Ein Klebstoff ist nach DIN EN 923 als „nicht-metallischer Stoff, der Werkstoffe durch Oberflächenspannung (Adhäsion) so verbinden kann, dass die Verbindung eine ausreichende innere Festigkeit (Kohäsion) besitzt“ [105] definiert. Eingeteilt werden Klebstoffe häufig nach der chemischen Basis oder dem Abbindemechanismus [106] [107]. Chemisch existieren die Gruppen organische und anorganische Klebstoffe sowie Silikone [106]. Zielführender ist die Differenzierung nach dem Abbindemechanismus. Für die vorliegende Arbeit relevante Abbindemechanismen werden folgend näher beschrieben.

Warmhärtende Reaktionsklebstoffe bestehen aus einem Harz sowie einem Härter und zählen zu den blockierten 1-K Reaktionsklebstoffen. Der Härter wird im Basismonomer eingebaut. Eine Reaktion erfordert daher eine höhere Aktivierungsenergie (100 - 150 °C Härtetemperatur bei einer Aushärtezeit kleiner 60 min) [106]. Ein bekannter Vertreter aus der Automobilindustrie sind Epoxidharzklebstoffe [108].

Die chemische Reaktion strahlenhärtender Reaktionsklebstoffe wird ausgelöst durch die Einwirkung von Strahlen (photoinitiert durch sichtbares Licht – VIS – sowie ultraviolettes Licht – UV – oder durch Elektronenstrahlen – EB). Sie bestehen aus reaktiven Monomeren mit vinyllischen Doppelbindungen (z.B. Acrylate oder Methacrylate). [106] [107] [108]

Anaerobe Reaktionsklebstoffe (1-K) polymerisieren nur unter Abschluss von Sauerstoff und unter Anwesenheit von Metallionen. Das Reaktionssystem besteht aus Beschleuniger, Radikalbinder sowie Saccharin und kann durch Temperatur und / oder UV-Strahlung, die Polymerisation einleiten. [106] [108]

Neben dem Klebstoff charakterisieren auch der Materialaufbau und die Oberflächenstruktur die Festigkeit einer Klebeverbindung [107]. Grundlegende Wirkprinzipien von Klebstoffverbindungen sind die Adhäsion und die Kohäsion. Die Adhäsion definiert die Festigkeit der Wechselwirkung zwischen Klebstoff und Füge teil, die Kohäsion die Widerstandsfähigkeit des Klebstoffes an sich. [109] [110].

Die klassische Adhäsionstheorie unterteilt die Adhäsion in ein mechanisches und ein spezifisches Modell. Das mechanische Modell beschreibt hierbei eine formschlüssige Verbindung in Form von Verklammerungen (Umschließung von Fasern), das spezifische Modell geht hingegen auf Wechselwirkungen chemischer, physikalischer oder thermodynamischer Art ein (Hauptvalenzbindungen, Nebervalenzbindungen, Diffusionsvorgänge und elektrische Doppelschichten) [111].

Voraussetzung für die genannten Mechanismen ist aufgrund der geringen Reichweite der Kräfte eine Annäherung des Klebstoffes an die Bauteiloberfläche, die auch als Benetzung bezeichnet wird [108].

Die Kohäsion steht für die innere Festigkeit des Stoffes, hervorgerufen durch die Bindung von Atomen und Molekülen zueinander. Die Kohäsionskräfte bei Feststoffen sind deutlich größer als bei liquiden oder gasförmigen Stoffen. Daher wird versucht, die Viskositätseigenschaften des Klebstoffes durch die Verarbeitung und die Zusammensetzung entsprechend einzustellen.

Dabei ist darauf zu achten, dass ein Kompromiss zwischen hoher Benetzungsfähigkeit und hoher Endfestigkeit nach der Aushärtung gefunden wird. Zusammengefasst lässt sich ein abgebundener Klebstoff als Feststoff zwischen den Fügepartnern beschreiben. Die Klebschicht ist dabei in mehrere Zonen zu unterteilen. Aufgrund der beschriebenen Adhäsionsprozesse besteht die Adhäsionszone aus einer „modifizierten Struktur und Zusammensetzung“ [108]. Die Kohäsionszone ist definiert über den Klebstoff und verfügt entsprechend als einziger Bereich über die angegebenen Eigenschaften des Klebstoffes [108] [110]. [103]

Die Auswahl eines geeigneten Deckschieber-Ersatzmaterials beeinflusst gleichermaßen die Qualität des Nutabschlusses und die Anforderungen an das Verarbeitungswerkzeug. Betriebsanforderungen lassen sich anhand der in Kapitel 6.2.1 vorgestellten Materialien für Deckschieber ableiten. Neben der hohen dielektrischen Festigkeit ($> 10^7 \Omega\text{m}$), hoher mechanischer Belastbarkeit ($> 2,5 \text{ N/mm}^2$) und einer hohen Temperaturstabilität (Isolierstoffklasse F: $> 155 \text{ }^\circ\text{C}$) aufgrund der Umgebungstemperatur von Motoren sollte das Material einer 10.000 stündigen Vibrationsbelastung bis 30 G bei 2.000 Hz standhalten. Der Kleber wird flüssig, ohne Vorbehandlung der Oberflächen, verarbeitet (Viskosität $> 15.000 \text{ mPas}$). Die Handfestigkeit soll nach spätestens einer Minute, die Härtung ohne Schwund erfolgen.

Chemisch sollte der Werkstoff umweltverträglich und toxikologisch unbedenklich sein, einen kontrollierten Auftrag ermöglichen, konstante Eigenschaften bei den gegebenen Umgebungsbedingungen und eine geringe Wasseraufnahme besitzen sowie Verträglichkeit mit umliegenden Werkstücken und Materialien aufweisen. Für den Laborgebrauch ist außerdem eine einfache Reinigung des Verarbeitungssystems zielführend.

Auf Basis dieser Anforderungen müssen zunächst geeignete Klebstoffgruppen mittels einer strukturierten Literatur- und Technologierecherche selektiert werden [106] [111] [112] [113] [114] [115]. Hierzu zählen die Temperaturbeständigkeit, die Zeit bis zur Anfangshärte, die Durchhärtezeit, die Festigkeit sowie der Auslöser der Polymerisation (Temperatur, Licht, Luftfeuchtigkeit, ...).

Klebstoffe aus Epoxidharz (1-K), Glas (1-K), Silikonelastomer (2-K) und Polyurethanharz (1-K) können die Aufgaben grundsätzlich erfüllen. Da Gläser äußerst spröde und schwer zu verarbeiten sind, scheidet diese aus [106]. Zudem sind bei Gläsern, ebenso wie bei Silikonelastomeren, die nötigen Zeiten bis zum Erreichen der Handfestigkeit (mehr als 120 s) wesentlich länger, als bei Epoxidharzen und Polyurethanharzen. [80]

Die Firma DELO Industrie Klebstoffe bietet entsprechend der Vorauswahl ein modifiziertes Urethanacrylat (DELO-ML DB180) sowie ein modifiziertes Epoxidharz (DELO-DUALBOND AD761) an.

Tabelle 6.2: Zusammenfassung relevanter Klebstoffeigenschaften [116] [117]

	Modifiziertes Urethanacrylat DELO-ML DB180	Modifiziertes Epoxidharz DELO-DUALBOND AD761
Komponenten	1-K (lösungsmittelfrei)	1-K (lösungsmittelfrei)
Viskosität	17.000 mPas	11.000 mPas
Abbinde- mechanismen	<ul style="list-style-type: none"> • UV- / lichthärtend (320 - 450 nm) • Anaerob härtend • Warmhärtend (> 120 °C) 	<ul style="list-style-type: none"> • UV- / lichthärtend (320 - 420 nm) • Warmhärtend (> 120 °C)
Belichtungszeit	> 10 s (0,6 mW/mm ²)	> 10 s (0,5 - 0,6 mW/mm ²)
Temperaturbereich	-40 - 150 °C	-60 - 180 °C

Im Rahmen einer vorbereiteten Versuchsreihe unter Anwendung einer statistischen Versuchsplanung (DoE – Design of Experiments - ein Werkzeug zur Entwicklung und Optimierung von Produkten und Prozessen [118]) werden beide Klebstoffe näher untersucht, um die verarbeitungsrelevanten Klebstoff- und Prozessparameter abschätzen zu können. Hierfür wird ein vollständig faktorieller 2k-Versuchsplan mit Zentrumspunkt durchgeführt. Es werden dabei eine geringe Anzahl von Einflussfaktoren (k) in zwei Stufen (2) untersucht und Einflussfaktoren identifiziert, die Ergebnisse verändern können. Die Zielgröße (abhängige Variable) beschreibt das Ergebnis der Untersuchung und ist vorrangig eine quantitative Größe (Messwert) [119]. Bei der Durchführung muss jede mögliche Stufen-Faktor-Kombination getestet werden, um Einflüsse zu detektieren.

Unter Betrachtung der Rahmenbedingungen werden die Einflussfaktoren Einspritzdruck (0,5 bar, 1,5 bar und den von der Anlage maximal zur Verfügung gestellten 2,5 bar), der Düsendurchmesser (0,8 mm, 1,2 mm und 1,5 mm), die Vorschubgeschwindigkeit (8,3 mm/min, 16,7 mm/min und 25 mm/min) sowie der verwendete Klebstoff als relevant eingestuft. Alle anderen Faktoren, wie der Düsenabstand (2,0 mm), die Verarbeitungstemperatur (23 °C), die Materialoberfläche sowie die Luftfeuchtigkeit, werden im weiteren Verlauf konstant gehalten, um die Zufallsstreuung zu minimieren. Als Zielgröße wird eine qualitative Bewertung definiert, bei welcher nur Gut / Schlecht- Beurteilungen möglich sind [119]. Hierfür wird sich auf ein ideales Vergleichsmuster berufen, bei welchem der Klebstoff nach Aushärtung, in einer 1,0 - 1,5 mm dicken Schicht vollständig innerhalb der Nut verteilt ist.

Es werden Bewertungspunkte (-3 bis 3) vergeben, um die unterschiedlichen Ergebnisse zu beschreiben. Die Anzahl der Versuche ergibt sich bei Einflussfaktoren (k) und zwei Stufen (2) zu 2^4 , also 16 Faktorstufenkombinationen (m) [119], ergänzt um zwei zentrale Untersuchungen und zwei Klebstoffeinstellungen zu 20 Versuchen.

Die Versuchsreihe wird auf einer Dosieranlage mit einem Dispensgerät der Firma Martin GmbH und einer CNC-Flachbetanlage durchgeführt [120]. Beigestellt ist außerdem eine UV-Lampe der Firma DELO Industrie Klebstoffe mit einem Emissionsspektrum von 365 nm. Zur besseren Erreichbarkeit werden die Versuche an segmentierten Statoren durchgeführt.

Zur Interpretation der Messwerte (y) werden die sogenannten Effekte berechnet. Mit ihnen werden Einflüsse oder Wechselwirkungen auf das Ergebnis dargestellt. Sie errechnen sich aus der Differenz der Stufen und dem jeweiligen Mittelwert.

$$\text{Effekt} = \overline{y(+)} - \overline{y(-)} \quad (6.1)$$

Diese können zur besseren Interpretation als Steigung zwischen Mittelwert und der Stufe in ein Effektdiagramm eingetragen werden (Bild 6.3).

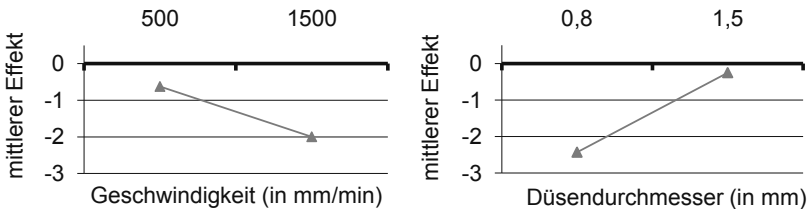


Bild 6.3: Effekt von Geschwindigkeit und Düsendurchmesser [103]

Dargestellt ist der starke Effekt von Vorschubgeschwindigkeit und unterschiedlichen Düsendurchmessern. Zudem besteht ein Effekt zwischen Düsendurchmesser und Klebstoff. Während die Nutfüllung bei dem Klebstoff DELO-DUALBOND AD761 bei allen Düsendurchmessereinstellungen zu niedrig ist, stellt sich beim DELO ML-DB180 bei einem Düsendurchmesser von 1,2 mm ein ideales Ergebnis bezüglich der Dispenseigenschaften ein.

Nach Ermittlung der Informationen wird eine Bewertungsmatrix nach VDI 2225 [121] erstellt. Es handelt sich um eine auf technisch-wirtschaftliche Problemstellungen angepasste Nutzwertanalyse. Es werden Klebstoffe hinsichtlich ihrer technischen, sicherheitsrelevanten, ökologischen und wirtschaftlichen Kenndaten bewertet [122]. Um Kriterien zu priorisieren, ist eine Gewichtung von 1 (normal) bis 3 (höchste Wichtigkeit) möglich.

Anschließend werden die Eigenschaften des Stoffes in die Matrix eingetragen und numerisch (0 – Eigenschaft nicht erfüllt – bis 5 – Eigenschaft entspricht ideal) mit dem theoretischen Ideal verglichen. Wie bei der technisch-wirtschaftlichen Methode nach Kesselring [86] werden Eigenschaften und Gewichtungsfaktor multipliziert und die resultierenden Werte zu einem Gesamtwert summiert.

Verglichen wurden Kriterien des Rohmaterials, der Verarbeitung und des Gebrauchs der Klebstoffe, insbesondere unter Bezugnahme auf die Normen DIN EN ISO 62 [123], DIN VDE 0303 [124], DIN EN ISO 527 [125] und DIN EN 14869 [126]. Im Ergebnis der detaillierten Analyse schneidet das modifizierte Urethanharz (DELO-ML DB180 [117]) besser ab als das modifizierte Epoxidharz (DELO-DB AD761 [116]) und wird daher ausgewählt. Die detektierten Schwachstellen, wie eine möglichst hohe Umweltkompatibilität, sind kein Ausschlusskriterium für diesen Kleber. Positiv hervorzuheben sind hingegen der durch gezielte UV-Bestrahlung schnelle Härtungsmechanismus, die lange Lagerzeit sowie die passende Viskosität. [103]

6.2.3 Auswahl eines Materials zur Wicklungs Imprägnierung

Materialien zur Isolation der Nut existieren in einer Vielzahl von Varianten und Ausprägungen. Eine Möglichkeit der Einteilung ist die Unterscheidung in ein- und zweikomponentige Stoffe.

Zweikomponentenharze werden durch die Reaktion zwischen Härter und Harz initialisiert und finden Einsatz beim Statorvollverguss. Vorteile dieser Materialien liegen in der Optimierungsmöglichkeit durch Füllstoffe sowie der Möglichkeit der Kaltaushärtung. Nachteile ergeben sich durch den erhöhten Systemaufwand bei Lagerung, Bereitstellung und Mischung der Komponenten und durch teilweise sehr lange Aushärtezeiten. Einkomponentige Materialien zur Imprägnierung sind in der Regel ungesättigte Polyesterharze (UP). Diese existieren mit der Variante eines Comonomers (Lösungsmittel, z.B. Styrol), welches bei der Aushärtung verdampft [127]. Aufgrund der Belastung durch Dämpfe sowie des Materialschwundes (bis zu 50%) wurden lösungsmittelfreie, ungesättigte Polyesterharze entwickelt, deren Aushärtung sich jedoch momentan nur in Ausnahmefällen nicht thermisch bei Temperaturen ab 50°C realisieren lässt [128]. Die Anforderungen an ein Material ergeben sich analog zu Kapitel 6.2.2. Einzig die Verarbeitungsanforderungen ergeben sich neu.

Während der sogenannten Gelierung wird die Zustandsänderung von der flüssigen Suspension in den festen Zustand verstanden [129]. Dabei wird die Viskosität des Harzes soweit erhöht, dass kein Ausfließen mehr möglich ist. Die kombinierte Einwirkung von Strahlung (UV) und thermischer Energie kann diesen Effekt bei der Verwendung des entsprechenden Materials erhöhen. Das Material sollte eine Viskosität < 750 mPas, eine Aushärtetemperatur < 180 °C und eine Gelierzeit von höchstens fünf Minuten besitzen. Die Verarbeitung muss dabei ohne Schwund und möglichst ohne Vorbehandlung der Oberflächen erfolgen.

Ein entsprechendes Harz ist das Dobeckan® MF 8044 UV, das für Tauchimprägnierung entwickelt wurde. Bei 120 °C beträgt die Gelierzeit 330 +/- 120 s und wird durch UV-Strahlung der Wellenlänge 320 nm - 360 nm unterstützt. Die Viskosität von 7.000 +/- 500 mPas bei 23 °C kann durch Erwärmung auf den geforderten Wert entsprechend verringert werden. In Vorversuchen werden die Prozessparameter analysiert. Zum Einsatz kommen, wie bereits in Kapitel 6.2.2 beschrieben, eine CNC-Versuchsanlage und segmentierte Statoren. Als Ergebnis stellt sich folgender Prozessverlauf als ideal dar: An einem auf 60 °C erwärmten Stator wird in vier Durchläufen, mit einer Wartezeit von je 220 s, das Harz mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 280 mm/min mit einem Düsenabstand von 2,0 mm von einer Düse mit Durchmesser 0,84 mm und einem Einspritzdruck von 1,5 bar appliziert. Um das Auslaufen am Wickelkopf zu vermeiden, wird dieser Bereich direkt nach einem Durchgang lokal mit einer UV-Lampe bestrahlt. [130]

6.3 Werkzeug zur Montage von Deckschiebern⁸

Um zunächst die prinzipielle Funktionsweise und die nötigen Kräfte zu klären, wird eine Vorversuchsreihe durchgeführt. Im ersten Versuch werden drei Deckschieber im vorderen Bereich mit einer Bohrung mit 2,0 mm Durchmesser versehen. Jeder der drei präparierten Deckschieber wird in zehn unterschiedliche, bewickelte Nuten gelegt und mit Hilfe eines Stahldrahtes, der an einer Federwaage montiert ist, wieder aus der Nut gezogen. Während der 30 Versuche wurden im Mittel eine Kraft von 15,5 N und eine maximale Kraft von 24,0 N benötigt, um die Deckschieber zu demontieren. Da die Überwindung der Haftreibung beim kontinuierlichen Einschieben gegenüber der Gleitreibung dominant ist [131], können die gemessenen Demontagekräfte den eigentlichen Montagekräften annähernd gleichgesetzt werden. Bei den Versuchen war erkennbar, dass die Kräfte bei Nuten, in denen die Drähte leicht überstehen, deutlich höher sind. Eine Messung der Schubkraft mittels Federwaage scheidet aufgrund des Abknickens der Deckschieber aus. Stattdessen wird ein zweiter Zugversuch durchgeführt. Die gelochten Deckschieber werden 3,0 mm - 4,0 mm in die Nut eingeschoben und über einen Stahldraht an einer Federwaage befestigt. Es kommen wieder drei verschiedene Formteile in zehn verschiedenen Nuten zum Einsatz. Im Mittel werden 18,6 N Einzugskraft benötigt, maximal 24,0 N. Sobald die Positionierung nicht mehr parallel zur Nut erfolgt, erhöht sich die benötigte Kraft. Einen Einfluss hat auch der Wickelkopf, der die Scheiben aus der Nutebene drückt.

Zusammenfassend ist bei der Montage der Deckschieber auf eine saubere Positionierung zu achten. Schräges Ansetzen führt zu einer Hebelwirkung, welche die Deckschieber auf Höhe der Nutmitte aus der Nut hebelt. Montagehindernisse stellen die Wicklungen sowohl am Wickelkopf als auch in der Nut dar. Das Montagesystem sollte Einschiebekräfte von bis zu 40 N (entspricht einem Sicherheitsfaktor $S = 1,6$) aufbringen können.

Die Gleitfähigkeit des zu verarbeitenden Materials, einer dreischichtigen Polyesterfolie mit der Nenndicke $d = 0,34$ mm und der Nennbreite $b = 11,0$ mm, ist zu gewährleisten. Der Deckschieber muss vor der Nut positioniert und sicher eingeschoben werden. Dabei dürfen die Wicklungen in der Nut und im Wickelkopf nicht beschädigt werden.

Bei der Auslegung des Werkzeugs sind außerdem die Anlagenvorgaben zum Anschluss zu beachten:

⁸ Bei dem Aufbau des Deckschiebermontagewerkzeuges wurde ich unterstützt von Frau Juliane Kollmer

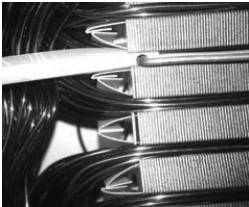
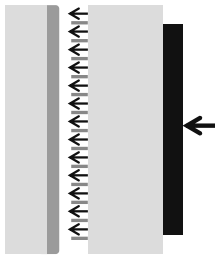
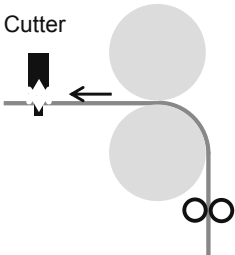
Für elektrische Bauteile können zwei acht-polige Kabel (max. 1,0 A), für pneumatische Bauteile zwei Schläuche mit dem Durchmesser $d_A = 6,0$ mm (max. 4,9 bar) verwendet werden.

6.3.1 Konzepte für ein Werkzeug zur Montage von Deckschiebern

Bei der Konzeptionierung müssen verschiedene Teilprozesse detailliert betrachtet werden. Der Deckschieber muss positioniert und eingeschoben werden. Dabei müssen Wicklungen, die nicht in der Nut liegen, in diese gedrückt und zudem der Wickelkopf niedergehalten werden. Der letzte Einzelprozess ist die Bereitstellung der Deckschieber in den richtigen Abmessungen. Für den Gesamtprozess stehen theoretisch beide Arme der ambidexteren Kinematik zur Verfügung. Aus Gründen der Prozessparallelisierung ist die Verwendung nur eines Armes jedoch sinnvoller. Das Material kann endlos oder auch magaziniert zugeführt werden.

Die Montage mittels Vakuumsauger, der vom zweiten Roboterarm durch den Stator geführt wird und den vom ersten Roboterarm eingelegten Deckschieber ansaugt und anschließend durch den Stator zieht, scheidet aufgrund des großen Systemaufbaus aus. Die Verwendung eines Parallelgreifers entfällt wegen des engen Bauraums, der von Wicklung, Nut und Deckschieber vorgegeben wird.

Tabelle 6.3: Konzepte für die robotergestützte Deckschiebermontage [132]

Konzept α	Konzept β	Konzept γ
Einziehen des gestanzten Deckschiebers	Stempel	Einschieben aus dem Endlosmaterial
		

Das konzeptionierte Einziehen des gestanzten Deckschiebers entspricht dem vorab beschriebenen zweiten Versuch. Der Deckschieber wird über ein Magazin bereitgestellt und bei 1,0 - 2,0 mm Länge mit einer Bohrung, Durchmesser 2,0 mm, versehen (manuell oder automatisiert).

Eine Klemmfixierung entfällt aufgrund des engen Bauraums. Vorteile des Konzepts sind die einfache Kinematik sowie der flexibler Einsatz. Jedoch sind das Magazinieren und die Stanzbearbeitung des Materials vorab nötig.

Beim Konzept mit Stempel drückt dieser die Deckschieber, die auf die richtige Länge zugeschnitten sind, aus einer Matrize, welche den geometrischen Abmessungen (Durchmesser, Länge, Nutzahl) des Stators entspricht, in das Blechpaket. Die bestückte Matrize wird hierbei von einem Roboterarm an die Stirnseite des Stators gefahren, der Montageprozess gestartet und alle Deckschieber parallel in die Nuten gedrückt. Vorteilhaft bei dieser Lösung ist der schnelle Prozess. Jedoch ist auch bei diesem kostenintensiven Aufbau ein Magazinieren der Deckschieber nötig. Zudem ist das Werkzeug unflexibel gegenüber anderer Statortypen.

Das Konzept Einschieben sieht die Verarbeitung des Deckschiebers aus dem aufgespulten Endlosmaterial vor. Dieses wird geführt, geformt, umgelenkt, geschnitten und in die Nut geschoben. Dies geschieht über formende Transportrollen und eine Hohlführung, deren Innenkontur auf den Deckschieber einstellbar ist. Sie ist zweigeteilt, um einen Cutter zu integrieren. Das Werkzeug wird ebenfalls an einem Roboterarm montiert und schräg an die Nuten herangefahren, um den Wickelkopf niederzuhalten. Bei diesem Konzept ist keine zusätzliche Bearbeitung und Magazinierung des Materials nötig. Das Werkzeug ist flexibel anpassbar an verschiedene Statortypen sowie Materialarten und zeichnet sich durch einen einfachen Bewegungsablauf aus. Jedoch sind für Bandantrieb und Cutter des komplexen Werkzeugs Aktoren nötig.

Es erfolgt wiederum die bereits vorgestellte technische-wirtschaftliche Bewertung nach Kesselring [86]. Als wichtigste Kriterien werden – auch als Ergebnis der Vorversuche – die Positionierung des Deckschiebers am Nuteingang und die Flexibilität gegenüber verschiedener Statortypen gewichtet.

Für den Ablauf wichtige Parameter sind ebenfalls die nötigen Vorarbeiten, sowohl bei der Bearbeitung des Deckschiebermaterials (Zuschneiden, Bearbeiten, Vormontieren) als auch für das Herstellen einer montagebereiten Nut (durch Wickelkopf Niederhalten und Wicklung in Nut Drücken).

Das Resultat der technischen Bewertung, dargestellt in Tabelle 6.4, zeigt, dass sich das Konzept „Montage aus dem Endlosmaterial“ deutlich von den anderen Konzepten abhebt. Gerade die Flexibilität und die Positionierungsmöglichkeiten spielen dabei eine entscheidende Rolle.

Tabelle 6.4: Technische Bewertung der Konzepte zur Deckschiebermontage

Bewertungskriterien	W	Einziehen		Stempel		Endlos	
		Maßzahl	Wertungszahl	Maßzahl	Wertungszahl	Maßzahl	Wertungszahl
Einarmiger Robotereinsatz	1	2	2	3	3	3	3
Automatisierungsgrad	3	3	9	2	6	4	12
Einfluss Wickelkopf	3	2	6	3	9	3	9
Materialvorbereitung	5	2	10	1	5	4	20
Vorpositionieren der Drähte in der Nut	5	3	15	1	5	4	20
Flexibilität (Statorgeometrie)	8	3	24	1	8	4	24
Positionieren Deckschieber	10	2	20	3	30	4	40
Wertigkeiten		86		66		128	
Technische Wertigkeiten		0,61		0,47		0,91	
Rangfolge		2		3		1	

6.3.2 Funktionsstruktur und Ausarbeitung des Montagewerkzeuges

Wie bereits beschrieben, sind die größten Herausforderungen der enge Bauraum zwischen Nutöffnung, Wicklung und Wickelkopf. Das Positionieren des Deckschiebers ist dabei der prozessentscheidende Arbeitsschritt. Die optimale Positionierung soll mittels einer Einführhilfe erfolgen, welche wenige Millimeter in die Nut einfahren kann. Die Einführhilfe ist direkt hinter die Hohlführung montiert. In dieser wird das Bandmaterial vorgespannt, zugeschnitten und zur Einführhilfe geführt. Die Innenkontur basiert auf dem Stempel/Matrize-Prinzip und ermöglicht eine Formgebung ohne weitere Presskräfte.

Für die Auslegung dieser Kontur ist entscheidend, dass das Material nicht zu schwach und auch nicht zu stark verformt wird.

Beim Zuschnitt mit dem Cutter muss darauf geachtet werden, dass das Material gespannt ist und nicht seitlich verrutschen kann. Der Transport wird durch zwei Vorschubrollen gewährleistet, die das Bandmaterial aufnehmen und weiterbefördern. Bei der Auslegung des Antriebs sind die Prozesskräfte zu beachten, die sich aus Einschub, Vorschub und Formgebung zusammensetzen. Für die Festlegung der Innenkontur der Hohlführung werden verschiedene Versuche durchgeführt, mit Fokus auf die Positionierung, Formgebung, Führung und dem Nachschieben des Materials. Hierbei wurden verschiedene Prototypen produziert.

Neben zwei Varianten aus Aluminium, mit Vollkreis- und Halbkreis- Innenkontur, wurden auch eine Reihe von Kunststoffführungen mit V-förmiger Kontur und Kreiselementen mittels 3D-Druck produziert. Die V-Form entspricht der üblichen Form von Deckschiebern. In der Versuchsreihe konnte nachgewiesen werden, dass eine Formgebung beim Schieben des Bandmaterials durch die Hohlführung möglich ist. Die Innenkontur beeinflusst entscheidend die Form, den Kraftaufwand sowie die Führungseigenschaften. Ebenfalls nachgewiesen werden konnte der Bedarf nach einer Matrize, da Formgebung und Führung anderenfalls nicht gewährt sind. Aufgrund der Formkräfte eignet sich als Material Metall besser als Kunststoff. Aufgrund der guten Gleit- und Festigkeitseigenschaften wird Messing ausgewählt.

Ein weiterer Gegenstand der Vorversuche ist die Ermittlung des Einflusses der Umformtemperatur auf die Form. Bei Temperaturen bis 50 °C wurde durch die Temperierung keine Veränderung festgestellt. Bei einer Temperatur größer 155 °C beginnt der Schmelzvorgang des Bandes. Bei 120 °C Vorwärmung werden ideale Formergebnisse erzielt. Aufgrund des erhöhten Systemaufwandes und der niedrigeren Fördergeschwindigkeit beim Aufheizen wird das Montagewerkzeug zunächst kaltumformend ausgelegt.

Auch die Integration des Cutters wurde an verschiedenen Positionen und mit unterschiedlichen Unterbrechungen der Hohlführung untersucht. Die Schnittkanten sollten senkrecht zur Hohlführung stehen. Zudem sollten die Abstände der beiden Führungshälften möglichst minimal gehalten werden, um einen kontinuierlichen Vorschub zu gewähren.

Die Einführhilfe soll auf Höhe der Nutgrundisolation direkt am Nutschlitz positioniert werden. Material und Form orientieren sich an der Zuführung. Nachdem der zugeschnittene Deckschieber komplett aus der Hohlführung ausgetreten ist, ist ein Nachschieben ohne Verkeilen nicht mehr möglich. Daher sollte die Einführhilfe ein weiteres Formelement besitzen, welches das Nachdrücken der Scheibe in den Stator ermöglicht. Der Cutter wird aufgrund des geringeren Systemaufwandes pneumatisch angetrieben. Der ausgewählte Zylinder besitzt bei 6,0 bar Systemdruck eine Ausfahrkraft von 120,6 N.

Der Aufbau der Schneide orientiert sich an einem Stecheisen. Sie wird mit einem schnellen, kraftvollen Hub bewegt. Es ist darauf zu achten, dass die Schneide senkrecht geführt wird und gegen axiales Verrutschen gesichert ist. Als Material kommt ein legierter Werkzeugstahl zum Einsatz.

Die Dicke beträgt 2,0 mm und soll möglichst gering gehalten werden, um den kontinuierlichen Materialtransport zu gewährleisten (s.o.). Für die Bewegung des Bandvorschubes kommt ein Schrittmotor mit 1,8° Schritten zum Einsatz. Dieser betreibt eine der beiden profilierten Rollen aus Aluminium und einem Durchmesser von 50,0 mm.

Tabelle 6.5: Morphologische Matrix für die Merkmale des Werkzeugs zur Montage von Deckschiebern

Kriterium	Lösungsvariante		
Führungstunnel			
Innenkontur	Kreis	Halbkreis	V-Form
Material	Metall	Kunststoff	
Formgebung	Kaltumformung	Warmumformung	
Einführhilfe			
Form	Angepasst an Innenkontur	Nadel	Gebogenes Blech
Material	Metall	Kunststoff	
Bandvorschub			
Antrieb	Beide Rollen elektrisch	Eine Rolle elektrisch	Nicht angetrieben
Andruckvorrichtung	Angetrieben	Druckfedern	Federnde Druckstücke
Rolle	Profiliert	Zylindrisch	
Rollenmaterial	Metall	Kunststoff	Gummi
Cutter			
Antrieb	Elektrisch	Hydraulisch	Pneumatisch
Schneidmaterial	Baustahl	Legierter Stahl	
Aufbau	Einteilig	Modular	
Gesamtsystem			
Materialbereitstellung	Angetrieben	Gelagert	

Das Drehmoment des Motors wurde ausgewählt mit 3,75 Nm und berechnet sich aus Einschubkraft (40 N) sowie der Formgebungskraft (60 N) über den Radius der Rolle und dem Sicherheitsfaktor S.

$$M_{\text{Sicherheit}} = F * R * S = 100 \text{ N} * 0,25 \text{ m} * 1,5 = 3,75 \text{ Nm} \quad (6.2)$$

$$\text{mit: } F = F_{\text{Einschub}} + F_{\text{Formgebung}}, \text{ Radius } R = 0,25 \text{ m} \text{ und } S = 1,5$$

Mittels Profil und der Anpresskraft, erzeugt durch Federn, wird der größte Teil der Umformarbeit bereits während des Transportes durchgeführt. Die Anpresskraft setzt sich zusammen aus der Vorschubkraft und dem Haftreibungsbeiwert von $\mu = 0,25 \dots 0,40$ bei einer Materialpaarung Kunststoff (Vinyl) / Metall (Rolle) [133].

$$\rightarrow F_{\text{Anpress}} = \frac{F_{\text{Vorschub}}}{\mu} = \frac{100 \text{ N}}{0,25} = 400 \text{ N} \dots \frac{100 \text{ N}}{0,4} = 250 \text{ N} \quad (6.3)$$

$$\text{mit: } F_R = \mu F_N, F_R = F_{\text{Vorschub}} \text{ und } F_N = F_{\text{Anpress}}$$

Sie liegt nach (6.3) zwischen 250 N und 400 N. Ausgewählt werden deshalb zwei federnde Druckstücke, deren Vorspannung zwischen 75 N und 190 N eingestellt werden kann und die parallel montiert werden.

Das Deckschiebermaterial wird als Band auf einer Rolle bereitgestellt. Es handelt sich um das Produkt DMD UL der Firma Synflex, eine dreischichtige Polyesterfolie mit beidseitig aufgebracht, imprägnierter Vliesauflage. Es ist einsetzbar bis 155 °C (Klasse F) und verfügt über hohe mechanische Stabilität sowie hohe dielektrische Festigkeit. Im Lieferzustand hat das Band eine Breite von 11,0 mm und eine Dicke von 0,34 mm. Da es beim Abrollen zum seitlichen Abgleiten des Materials kommen kann, wird um die Rolle ein Kasten konstruiert, der oben mit einem Schlitz ausgestattet ist. Über zwei nicht angetriebene Umlenkrollen gelangt das Band zu den Profilrollen des Bandvorschubes.

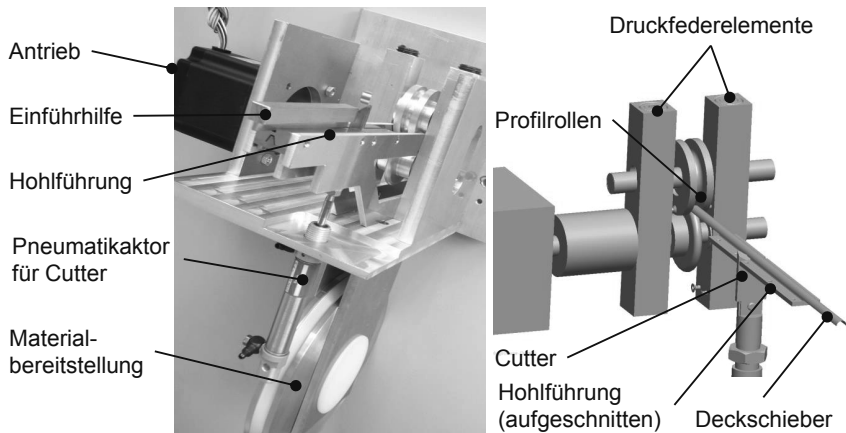


Bild 6.4: Werkzeug zur robotergestützten Montage von Deckschiebern [134]

Die beschriebenen Komponenten werden auf einen Träger verbunden und gemeinsam an den Roboterarm montiert. Der Montageablauf sieht ein Anfahren des Werkzeuges mit einem Winkel von bis zu 60° zwischen Einführhilfe und Nut vor. Nach Erreichen dieser Position richtet sich das Werkzeug parallel zur Nut aus (Winkel 0°) und hält dabei den Wickelkopf automatisch nieder.

Der Deckschieber gelangt über die Profilrollen und die Hohlführung mit integriertem Cutter zur Einführhilfe und wird dort bis auf 50 mm in die Nut eingeschoben. Dieser Überstand wird anschließend vom Formelement der Führung komplett in die Nut gedrückt. Die Aufteilung dieses Prozesses ist nötig, da der zugeschnittene Deckschieber nach Austritt aus der Hohlführung nicht mehr geführt ist und somit keine Kraftübertragung zum Einschieben mehr stattfinden kann. [132] [134]

6.4 Werkzeug zur Substitution von Deckschiebern⁹

Wichtige Voraussetzung für die Entwicklung eines geeigneten Werkzeuges zur Substitution des Deckschiebers ist die Identifizierung aller relevanten Anforderungen an das Verarbeitungssystem. Bedeutende Eigenschaften sind die verarbeitungsrelevanten Materialeigenschaften des DELO-ML DB180, wie die Verarbeitung hochviskoser Klebstoffe ($> 17.000 \text{ mPas}$).

Während der Applikation im Labor werden unregelmäßig kleinere Mengen an Klebstoff verarbeitet. Aufgrund der anaeroben Abbindung unter UV Einwirkung wird das Fügemitel bis zur Klebefuge gegen Metall und UV-Strahlung geschützt. Zur Gewährleistung eines sicheren und schnellen Dispens-Prozesses sollte die Wicklung niedergehalten und gezielt mit UV-Strahlung der Wellenlänge 320 - 450 nm bestrahlt werden.

Das Werkzeug sollte einfach zu reinigen sein und die Verarbeitung unterschiedlicher Geometrien ermöglichen. Richtmaße der Baugruppe sind eine Aufbauhöhe von maximal 103 mm und eine Länge von 140 mm. Die Dosierung muss in einer reproduzierbaren Genauigkeit erfolgen. Zudem dürfen während des Prozesses die Wicklungen, die in der Nut liegen müssen, nicht beschädigt werden.

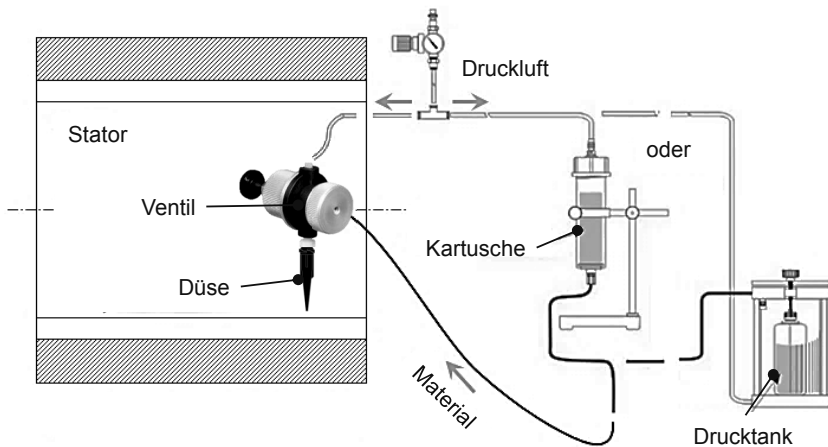


Bild 6.5: Grundbestandteile zur Dosierung des Klebers [135]

⁹ Bei dem Aufbau des Einspritzwerkzeuges wurde ich unterstützt von Herrn Jochen Schweier.

Ebenfalls zu beachten sind außerdem die Anlagenvorgaben zum Anschluss: Für elektrische Bauteile können zwei acht-polige Kabel (max.1,0 A), für pneumatische Bauteile zwei Schläuche mit dem Durchmesser $d_A = 6,0$ mm (max. 4,9 bar) verwendet werden. Das Gesamtgewicht muss unter 20 kg liegen.

Bei der Konzeptionierung werden gewisse Systemkomponenten als Grundbestandteile benötigt. Dazu gehören, neben dem Materialspeicher – ausgeführt als Kartusche oder Drucktank – die Dosiereinheit (direkt, Schlauchquetschventil, Membranventil oder Spindelventil) und eine Düse (Dosiernadel). [132]

Wie in Kapitel 6.2.2 beschrieben, ist die Geometrie der Düse ein essentieller Prozessparameter. Die Öffnung und das Flächenprofil (komplex, konisch oder gleichläufig) beeinflussen die Verteilung und das Spritzbild in der Fuge. Durch die UV-härtenden Eigenschaften des ausgewählten viskosen Klebstoffes sind schwarze, konische Nadeln eine sinnvolle Wahl. Als Materialspeicher kann sowohl ein Drucktank als auch eine Kartusche verwendet werden. In beiden Fällen wird im Behälter ein Überdruck erzeugt, der das Material aufgrund des Druckausgleiches in den Schlauch zum Ventil drückt.

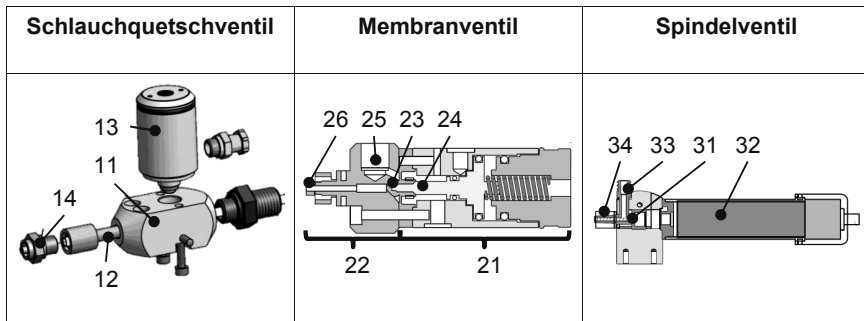
Kartuschen liegen in genormten Geometrien und mit genormten Anschlüssen (Luer-Lock-Anschluss) vor. Sie eignen sich für eine kurzfristige Speicherung direkt am Ort der Applikation. Drucktanks sind aufgrund ihres größeren Volumens v.a. bei einer Serienfertigung geeignet. Hierbei werden Materialbehälter in den Tank gestellt, ein Schlauch bis zum Grund eingeführt und der Behälter anschließend unter Druck gesetzt. Die Dosiereinheit dient zur Applikation exakter Klebstoffmengen. [103]

6.4.1 Konzepte für ein Werkzeug zur Substitution der Deckschieber

Die eingesetzten Komponenten der unterschiedlichen Konzepte sind in Tabelle 6.6 dargestellt. Der erste Systementwurf sieht ein Schlauchquetschventil (SQV) (11) vor, welches nach axialem Einfahren senkrecht zur Nut positioniert wird.

Über einen gewinkelten Adapter wird eine Dosiernadel, welche in die Nut eindringen kann, an den Luer-Lock-Anschluss (14) angebracht. Die Wahl des Materialspeichers ist unabhängig vom Ventil. Der Einsatz von Schlauchquetschventilen ist weit verbreitet. Die Funktionsweise ist definiert über einen einfach wirkenden pneumatischen Zylinder (13), der einen Kolben auf den materialführenden Kunststoffschlauch (12) drückt und damit derart quetscht, dass kein Material mehr durchfließen kann. Um eine vom durchfließenden Material abhängige Einstellung vorzunehmen, ist der Kolbenhub über eine Stellschraube veränderbar. Der verwendete Kunststoffschlauch ist gegen UV-Strahlung undurchlässig und erlaubt die Förderung aller fließfähigen Medien.

Tabelle 6.6: Eingesetzte Ventile in den verschiedenen Konzepten [135] [136]



Die Verwendung eines Membranventils erlaubt eine kompakte Bauweise und die Verarbeitung niedrig- bis hochviskoser Medien. Es wird in einem definierten Winkel axial in den Stator eingeschoben, sodass die angeschlossene Dosiernadel in die Nut eintauchen kann. Mit Hilfe des Membranventils kann die Klebstoffmenge einerseits genau definiert werden, andererseits wird ein Nachtropfen durch den ventilschließenden Unterdruck verhindert.

Der Aufbau ist zweigeteilt. Rückseitig (21) ist der steuernde Bereich angeordnet, vorderseitig (22) der materialführende. Die Trennung der Abschnitte erfolgt durch eine Membran (23), welche steuerseitig mit einem einfachwirkenden Kolben (24) verbunden ist. Wird die Membran vom Kolben nach oben gedrückt, öffnet sich ein Spalt, der den Materialeingang (25) mit dem Luer-Lock-Anschluss (26) verbindet. Der materialführende Bereich ist nichtmetallisch und UV-strahlungsundurchlässig ausgeführt.

Bei der Verwendung eines Spindelventils wird dieses axial in den Stator eingeschoben. Die Dosiernadel wird aufgrund des großen Ventilbauraums über einen Schlauch entkoppelt und auf einem Träger senkrecht zur Nut ausgerichtet.

Der Gleichstrommotor (32) wird vom Roboter angesteuert und treibt eine Spindel (31) an. Diese regelt die Dosiergenauigkeiten über die Flankengeometrie und treibt das Material vom Eingang (33) bis zum Luer-Lock-Anschluss (34). Die geförderte hochviskose oder pastenförmige Klebstoffmenge wird durch Drehzahl reguliert.

Bei zwei weiteren Konzepten wird der Klebstoff ohne zusätzliches Ventil direkt aus der UV-undurchlässigen Kartusche über eine montierte Dosiernadel in die Nut appliziert. Wenn das System in den Stator eingeführt wird, muss das Volumen und damit die Höhe der Kartusche möglichst gering gehalten werden. Alternativ kann die Kartusche extern positioniert werden.

Diese beiden Konzepte sind auf die Verwendung eines externen Steuergerätes ausgelegt, wodurch die Dosiermenge geregelt und Nachtropfen verhindert werden soll. [103]

Tabelle 6.7: Technische Bewertung der Konzepte zur Substitution von Deckschiebern

Bewertungskriterien	W	Schlauchquetschventil		Membranventil		Spindelventil	
		Maßzahl	Wertungszahl	Maßzahl	Wertungszahl	Maßzahl	Wertungszahl
Geringe Bauhöhe	3	2	6	3	9	1	3
Flexibler Materialspeicher	3	4	12	4	12	4	12
Roboterkompatibilität	3	4	12	4	12	4	12
Verarbeitungsdruck Material	1	3	3	2	2	1	1
Flexible Klebstoffverarbeitung	3	4	12	3	9	1	3
Hohe Dosiergenauigkeit	1	2	2	3	3	3	3
Einfache Reinigung	2	3	6	1	2	1	2
Geringe Wartungskosten	2	2	4	2	4	2	4
Geringe Umweltbelastung	1	2	2	2	2	2	2
Einfacher Systemaufbau	2	4	8	4	8	4	8
Wertigkeiten		67		63		50	
Technische Wertigkeiten		0,80		0,75		0,60	
Rangfolge		1		2		3	

Die Zusammenfassung der technischen Bewertung nach Kesselring [86] kann Tabelle 6.7 entnommen werden. Konzepte ohne Ventil entfallen aufgrund des externen Steuergerätes und dem damit einhergehenden Systemaufwand. Die Konzepte werden daher nicht weiter berücksichtigt. Das Spindelventil eignet sich aufgrund der technischen Daten, die eine optimale Funktionalität ab einer Viskosität ab 50.000 mPas gewährleistet [135], nur bedingt. Das fast gleichwertig bewertete Membranventil scheidet aufgrund der Materialdrücke, die auf 4,0 bar begrenzt sind [135] im Laborbetrieb aus, da nur sehr wenig Variation der Betriebsdrücke, wie sie bei Laboruntersuchungen gefordert wird, möglich ist. Auch die Reinigung des Ventils, die eine vollständige Demontage erfordert, ist nicht ideal gestaltet [135].

Das erste Konzept mit einem Schlauchquetschventil erhält die höchste gewichtete Bewertungssumme. Hauptgründe sind die kompakte Bauweise bei guter Dosiergenauigkeit und die einfache Funktionsweise. Für einen Laborbetrieb ist es, trotz der etwas höheren Verschleißteilkosten, sehr gut geeignet und wird daher detailliert ausgearbeitet. [103]

6.4.2 Funktionsstruktur und Ausarbeitung des Dosierwerkzeuges

Anhand bekannter Informationen ergeben sich für das Werkzeug die drei Aufgaben: Drähte niederhalten, Klebstoff einspritzen und Klebstoff härten. Das realisierte Bauteil besteht aus fünf Komponenten.

Der Träger aus Baustahl wird am Roboterarm befestigt und nimmt alle Komponenten auf. Auf seinen 360 mm x 40 mm x 3,0 mm sind im 20 mm Abstand 16 Nuten, die in einem 45 ° Winkel verlaufen, angebracht. Durch diesen Verlauf können die einzelnen Systembestandteile flexibel positioniert werden. Die Geometrie und die Materialwahl führen zu hohen Steifigkeitswerten in z-Richtung bei gleichzeitiger Flexibilität in y-Richtung. Der Materialspeicher soll so ausgelegt werden, dass er die Menge, die im Betrieb für die Montage eines Stators benötigt wird, bereitstellen kann. Bei einer angestrebten Klebstoffstärke von 1,0 - 1,5 mm ergibt sich, bei 36 Nuten mit 2,5 mm Breite und 140 mm Länge, die notwendige Klebstoffmenge zu 18,9 cm³.

Ausgewählt wird eine lichtundurchlässige Kartusche mit 30 ml Volumen. Durch die Montage direkt am Träger wird der Weg, den das Material in einem Schlauch zurücklegen muss, gering. Ein Luer-Lock-Adapter ermöglicht den Anschluss des Schlauchquetschventils und der Düse. Die über einen Druckminderer angelegte Druckluft wird über ein 3/2-Magnetventil, welches durch den Roboter angesteuert werden kann, freigegeben. Eine spätere Erweiterung des Materialspeichers durch Umbau auf einen Drucktank ist problemlos möglich.

Um Wicklungen die aufgrund der Montagevorspannung in der Nutmitte aus der Nut austreten zurück in die richtige Position zu drücken, kommt ein Kunststoffrad als Niederhalter zum Einsatz. Als Material wird aufgrund der guten Reibeigenschaften Polyamid 6 (PA6) gewählt.

Das 2,0 mm breite Rad wird mittels Bolzenverbindung mit etwas Spiel in einer Gabel gelagert. Durch die Auslegung kann es gut in die Nutöffnung (Breite 2,5 mm) eindringen und erlaubt kein Vorbeirutschen von Drähten (Drahtdurchmesser 1,0 mm). Vorab durchgeführte Versuche haben ergeben, dass bei einem Füllgrad von 80% maximal 20 N benötigt werden, um Wicklungen mit Durchmesser 1,0 mm, die 1,0 mm aus der Nut ragen, um 4,0 mm zurückzudrücken. Sowohl der Träger aus Baustahl als auch das Kunststoffrad und die Gabel können diese Kräfte aufnehmen.

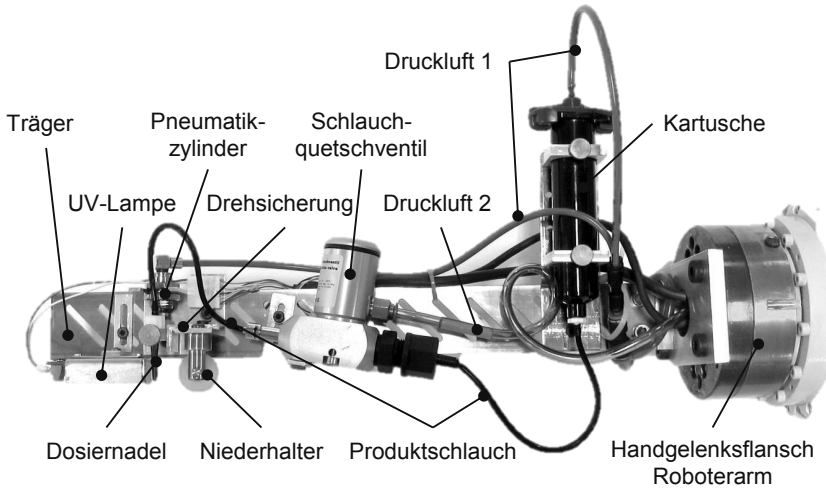


Bild 6.6: Vorrichtung zur Applikation des Klebstoffes [132]

Die FEM-Berechnung des Halbleches aus Aluminium zeigt, dass bei einem Kräfteintrag von 30 N eine Vergleichsspannung von 77 MPa erreicht wird. Die Werkstoffdaten lassen eine derartige Schwellbelastung zu.

Die Funktion von Dosiernadel und Schlauchquetschventil wurde bereits vorgestellt. Sie sind jedoch, entgegen des in Kapitel 6.4.1 dargestellten Konzeptes, durch einen kurzen Schlauch entkoppelt, um eine Anordnung der Düse möglichst eng zwischen Niederhalter und UV-Lampe zu gewährleisten. Der Schlauch aus Polytetrafluorethylen sowie die Dosiernadel sind UV-beständig und über einen Luer-Lock-Adapter gekoppelt. Die Nadel lässt sich mittels eines einfach wirkenden Pneumatikzylinders um 5,0 mm senken, sodass nach der Klebstoffapplikation der Klebstoff in der Nut, nicht aber in der Nadelspitze ausgehärtet wird. Um ein Verdrehen um den Luftdruckzylinder zu verhindern, wird eine Drehsicherung zwischen Kolben und Nadelhalter eingesetzt.

Die Aushärtung erfolgt durch eine UV-LED-Leiste. Diese besteht aus insgesamt acht LEDs, die in zwei Reihen parallel kontaktiert werden (Bild 6.7). Die UV-LEDs, Durchmesser 5,0 mm, strahlen aus einer Prozesshöhe von 15 mm, je mit einer Leistung von maximal 14 mW Schwarzlicht der Wellenlänge 375 nm, in einem Abstrahlwinkel von 15° und erfüllen damit die vom Klebstoff geforderte UV-A-Intensität von 0,6 mW/mm² [117]. Die Versorgung (24 V und 20 mA) sowie die Ansteuerung übernimmt ebenfalls der Roboter.

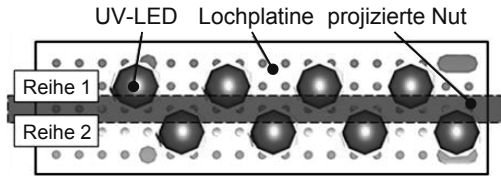


Bild 6.7: Anordnung der UV-LEDs auf Lochplatte

Die Härtezeit von fünf Sekunden führt nach folgender Rechnung zu einer maximalen Vorschubgeschwindigkeit von $v_V = 384 \text{ mm/min}$ und einer resultierenden Gesamtaushärtezeit von $t_{AG} = 22 \text{ s}$ pro Nut.

Bestrahlungsradius r_E einer UV-LED bei einem Abstand $l_A = 15 \text{ mm}$:

$$\tan(\beta) = \frac{r_E}{l_A} \rightarrow r_E = \tan(7,5^\circ) \times 15 \text{ mm} = 1,97 \text{ mm} \quad (6.4)$$

Bestrahlungslänge l_B bei acht in Reihe positionierter UV-LEDs:

$$l_B = d_E \times 8 \text{ LEDs} = 32 \text{ mm} \quad (6.5)$$

Max. zul. Vorschubgeschwindigkeit v_V bei einer Härtezeit von $t_1 = 5,0 \text{ s}$:

$$v_V = \frac{l_B}{t_1} \rightarrow \frac{32 \text{ mm}}{5 \text{ s}} = 6,4 \text{ mm/s} = 384 \text{ mm/min} \quad (6.6)$$

Notwendige Aushärtezeit t_{AG} einer Nut des Stators mit Länge l_S :

$$t_{AG} = \frac{l_S}{v_V} \rightarrow \frac{140 \text{ mm}}{6,4 \text{ mm/s}} = 21,87 \text{ s} \sim 22 \text{ s} \quad (6.7)$$

Prozessablauf

Das Werkzeug wird vom Roboter axial durch den Stator bewegt und auf der Rückseite des Stators auf die Arbeitshöhe positioniert. In der Rückwärtsbewegung dringt zunächst der Niederhalter linear zur Nut $3,0 \text{ mm}$ in die Nut ein.

Die Dosiernadel wird nach unten bewegt, die Kartusche mit Druck beaufschlagt, das Schlauchquetschventil geöffnet und der Klebstoff wird über die Düse appliziert. Zu dem Zeitpunkt, bei dem die UV-Lampe die Nut erreicht, wird sie eingeschaltet und der Aushärteprozess beginnt. Bei Erreichen des Nutausgangs werden die Prozesse in umgekehrter Reihenfolge beendet und das Werkzeug wird zurück in Ausgangsstellung gebracht.

Im Rahmen der Applikationsversuche wurden sehr gute Dosierbilder erzielt. Der Klebstoff liegt als Film im ausgehärteten Zustand über den Wicklung (Bild 6.8).

Nach Erreichen der Endfestigkeit wurde die Belastung des Eigengewichts des Blechpakets aufgebracht und von der Klebeschicht gehalten.

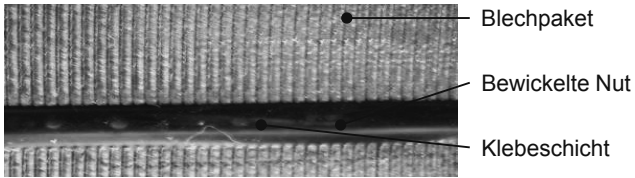


Bild 6.8: In Nut applizierter, ausgehärteter Klebstofffilm

Bei den in Kapitel 6.1.3 vorgestellten Vorversuchen wurde eine Vorschubgeschwindigkeit $v_v = 1.000 \text{ mm/min}$ als ideal eingestuft. Aufgrund der in (6.5) berechneten, maximal zulässigen Vorschubgeschwindigkeit werden während des Prozesses Pausen eingelegt, um ein sicheres Aushärten zu gewährleisten. Zur Vermeidung dieser Pausen ist einerseits die Variation der Größe der LED-Leiste und deren Arbeitsabstandes optimierbar, andererseits kann durch zusätzliches Applizieren eines Aktivators die Aushärtengeschwindigkeit erhöht werden. [103]

6.5 Integration des Imprägnierprozesses

Wie bereits beschrieben, lässt das vorgestellte Werkzeug zur Substitution des Deckschiebers Platz für die flexible Integration weiterer Systemkomponenten.

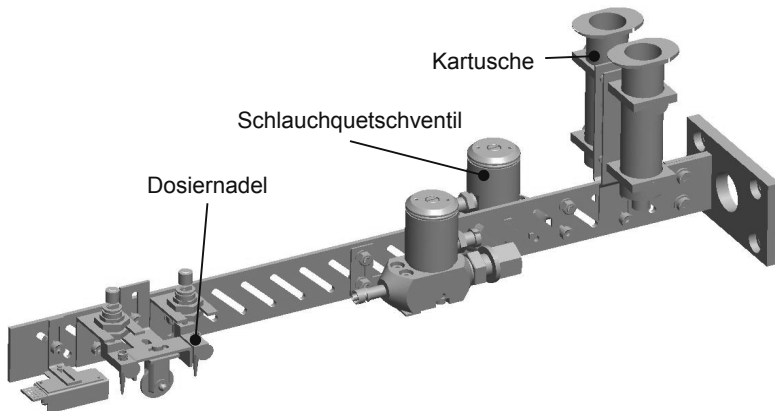


Bild 6.9: Integration der Komponenten für die Imprägnierung der Wicklung

Die Kartusche mit dem Imprägniermaterial kann gegenüber der vorhandenen Kartusche appliziert werden. Nach Berechnung sind pro Nut $5,1 \text{ cm}^3$ Harzvolumen nötig. Bei Spiegelung des bisherigen Materialspeichers, einer 30 ml Kartusche, ergibt sich die Möglichkeit, bis zu sechs Nuten zu imprägnieren. Bei einer Umstellung auf eine Kleinserienproduktion kann die Kartusche durch einen Druckbehälter ersetzt werden. Das zweite Schlauchquetschventil wurde ebenfalls gegenüber montiert. Ergänzt wird das Dosiersystem durch eine zweite Dosiernadel, die auf der anderen Seite des Niederhalters angebracht wird. [130]

6.6 Werkzeuge zur robotergestützten Isolation der Wicklung

Für die robotergestützte Montage der Deckisolation von Nuten wurden zwei Lösungen vorgestellt. Innerhalb der ersten Lösungsvariante wird ein Werkzeug realisiert, welches die Formgebung, den Zuschnitt und die Montage von klassischem Deckschiebermaterial aus dem Lieferzustand realisiert.

Die Montagehindernisse, wie die schlechte Zugänglichkeit durch den Wickelkopf oder die Handhabung und Montage der flexiblen Scheiben, stellen bei der Auslegung den größten Schwerpunkt dar. Diese können bei der Realisierung der zweiten Lösungsalternative, dem Einspritzen eines isolierenden Klebstoffes, übergangen werden. Nach einer fundierten Materialanalyse und Vorversuchsreihe konnte ein passendes Material detektiert werden, welches innerhalb von fünf Sekunden mit einer UV Lampe aushärtbar ist und zudem gute Verarbeitungseigenschaften besitzt. Das auf die Materialeigenschaften angepasste Verarbeitungswerkzeug ermöglicht durch seinen kompakten Aufbau das Niederhalten, den Einspritzvorgang und die Aushärtung in einem Arbeitsgang. Es ist durch kurze Materialwege und kleine Speicher ideal auf einen Laborbetrieb ausgelegt, kann jedoch durch den entsprechenden Materialtank auch für eine Kleinserienfertigung eingesetzt werden. Durch den modularen Aufbau ist außerdem die Integration des Nutimprägnierprozesses realisierbar. Hierbei sind jedoch noch tiefere Entwicklungen im Bereich der Imprägniermaterialien und Verarbeitungsvorrichtungen notwendig. Im nächsten Schritt ist zudem die Substitution des ausgewählten Klebstoffes durch funktionstragende Materialien, wie Epoxidharze, die durch Keramiken gefüllt sind oder Materialien, die eine Wärmeableitung vom Inneren des Stators zum Wickelkopf gewähren, denkbar.

7 Konzeptionierung anschließender Prozesse zur robotergestützten Statormontage

Um die Prozesskette zu schließen, werden im nächsten Schritt die Werkzeuge für die Kontaktierung und das Formen des Wickelkopfes entwickelt. Die entsprechenden Konzepte sind im folgenden Kapitel dargestellt.

7.1 Kontaktieren der Einzelspulen¹⁰

Der auf die Isolation der Wicklung folgende Prozessschritt ist die Kontaktierung der Wicklungsenden. Wie bereits beschrieben, müssen die Wicklungsenden dem Schaltplan entsprechend vereinzelt, gesammelt, gebündelt und der Kontaktierungsanlage zugeführt werden. Bei manueller Ausführung übernimmt diese Aufgaben ein Werker, der mit seinen Sinnen und kognitiven Fähigkeiten problemlos in der Lage ist, die Wicklungsenden der entsprechenden Nut sowie der Spulengruppe und damit auch der passenden Schaltgruppe zuzuordnen. Bei automatisierten Lösungen hingegen muss die Steuerung auf definierte Bewegungen programmiert werden. Die Aufnahme und Handhabung biegeschlaffer Teile ist dabei eine große Herausforderung. Vorab eine feste Position im freien Raum zu programmieren um ein definiertes Wicklungsende abzuholen, ist nicht zielführend. Daher muss bei der Konzeptionierung des Kontaktierens der Einzelspulen einerseits der Kontaktierprozess direkt, andererseits auch die montagegerechte Handhabung der Wicklungsenden näher betrachtet werden.

Die im Prozess der Statormontage zuletzt definierte Position der biegeschlaffen Drahtenden liegt im Moment der Wicklungsaufnahme von der Wickelmaschine vor. Um diese Information zu sichern, muss das Wicklungsende in diesem Moment sicher gegriffen und nach der Wicklungsmontage definiert abgelegt werden. Für die Ablage eignen sich die in Kapitel 3.5.1 vorgestellten Komponenten der Montagezelle. Um die Länge der Wicklungsenden nicht unnötig groß werden zu lassen, bietet sich die Erweiterung der umgebauten Statoraufnahme an. [33]

7.1.1 Handhabung der Wicklungsenden

Die freien Drahtenden müssen von der Wickelmaschine geordnet, abgeteilt, gespannt, gehalten, zur Ablageposition bewegt, in ihr positioniert und wieder gelöst werden. Während dieser Operationen sollte der Draht vor Beschädigung und Zerstörung geschützt sein.

¹⁰ Bei der Konzeptionierung des Kontaktierprozesses wurde ich unterstützt von Herrn Maximilian Reiter und Herrn Manuel Neher.

Rahmenbedingungen für das zu konzeptionierende Werkzeug sind die Möglichkeit der Adaption an bestehende Greifer (Kapitel 5) und die Nutzung der Roboter-versorgung sowie ein möglichst kleiner und leichter Aufbau. Für die Realisierung des Werkzeuges existieren verschiedene Varianten. Die Sicherung des Drahtes wird als pneumatisch betätigter Formschluss mittels Parallelgreifer der Firma Sommer-automatic umgesetzt. Bezogen auf die Forderung nach einer beschädigungsfreien Handhabung sind kraftschlüssige Varianten schwierig umzusetzen.

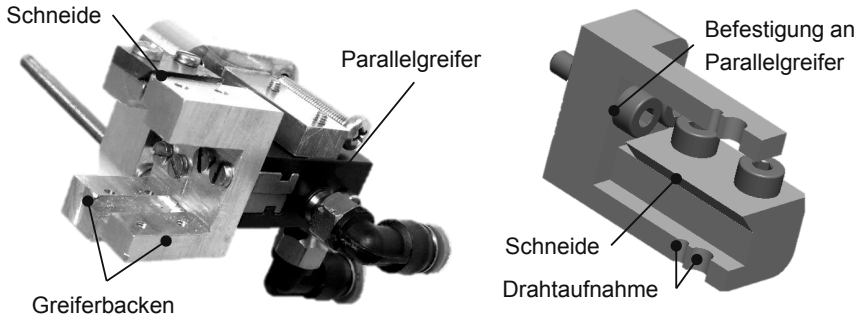


Bild 7.1: Greifer zur Handhabung der Drahtenden

Der Schließ- oder der Öffnungsmechanismus könnte prinzipiell auch von einer Feder ausgeführt werden oder mit einem doppelwirkenden Pneumatikaktor abgebildet werden. Eine der beiden Greiferbacken besitzt neben Einfräslungen, um Drähte unterschiedlichen Durchmessers aufzunehmen, auch eine Schneide, um den Draht im selben Hub abzulängen.

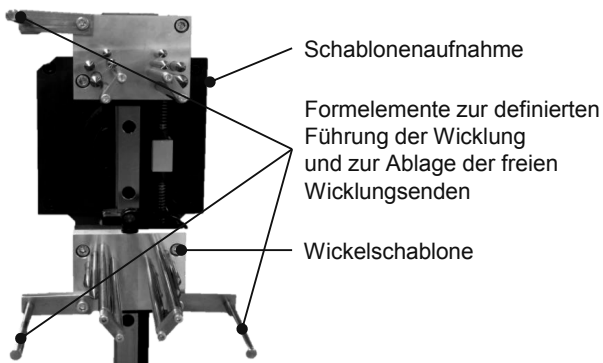


Bild 7.2: Modifizierte Wickelschablone

Für das gleichzeitige Handhaben der beiden Drahtenden und der automatisierten Beschickung der Wickelmaschine sind insgesamt drei dieser Greifer notwendig. Während zwei Greifer die beiden Drahtenden schneiden, fixiert der dritte Greifer ohne Schneide das neue freie Ende der Spule und montiert es vor dem Abtransport der fertigen Wicklung an die Wickelschablone. Die Greifer werden entsprechend der Geometrie der Wickelschablone und der Wicklung über Abstandhalter an die bestehenden Greifer zur Wicklungsmontage angebracht. Für eine bessere Erreichbarkeit der Wicklungsenden wird die, in Kapitel 4.1 vorgestellte, Wickelschablone um drei Stäbe erweitert. Diese ermöglichen das prozesssichere Spannen des Drahtendes vor dem Wickelprozess und die Zugänglichkeit der Drahtenden nach dem Wickelprozess. [137]

7.1.2 Montagegerechte Ablage der Wicklungsenden

Wie bereits beschrieben, eignet sich die Statoraufnahme aufgrund der geringen Verfahrenwege auch zur Aufnahme der Wicklungsenden [33]. Bei der Konzeption des Trägers wird zunächst die Grundsatzentscheidung getroffen, pro Nut eine Ablagemöglichkeit zu schaffen. Dies erhöht die Flexibilität gegenüber verschiedener Statorarten und Wicklungsarten (Lagenwicklung, Übertragen von Spulengruppen oder Einzelspulen). Die Aufnahme soll aufgrund der Systemkosten und der einfachen Montage passiv sein, d.h. nicht durch einen elektrischen oder pneumatischen Aktor geschlossen werden.

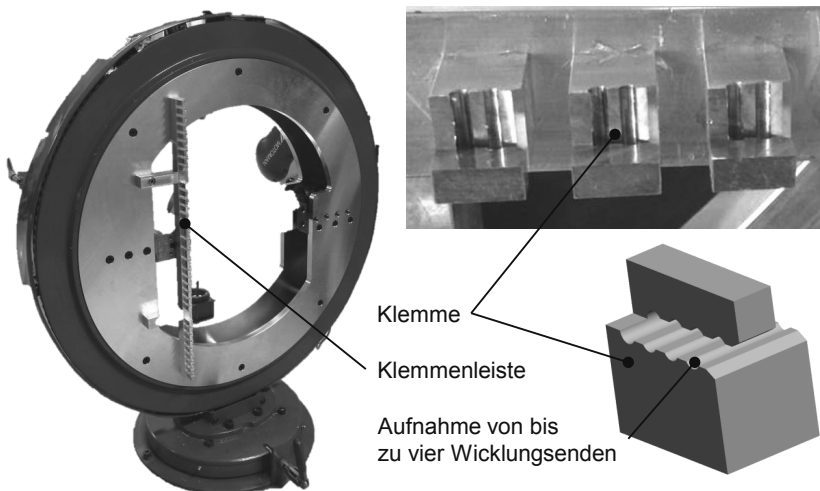


Bild 7.3: Montagegerechte Fixierung der Wicklungsenden

Mögliche Varianten sind Klemmen oder Schrauben. Eine Verschraubung kann Vorteile in der Prozesssicherheit bieten, erfordert jedoch einen zusätzlichen Prozessschritt mit einem zusätzlichen Werkzeug (Schrauber). Die Positionierung wird entlang einer Leiste realisiert. Ebenfalls denkbar ist die Verteilung der Aufnahmen über den Umfang des Einspannrings oder in Gruppen. Die entwickelte Klemme (Bild 7.3) bietet die Möglichkeit, bis zu vier einzelne Wicklungsenden aufzunehmen. Durch Vorsortieren kann dabei das der Kontaktierung vorangehende, schaltrichtige Einsammeln der Wicklungsenden wesentlich verkürzt werden. Die Klemmen werden in einem Abstand, der das Einfahren des Greifers erlaubt, nebeneinander auf eine Leiste geschraubt, welche wiederum mittels zweier Halter an den Einspannring montiert wird. [137]

7.1.3 Werkzeuge für die robotergestützte Kontaktierung

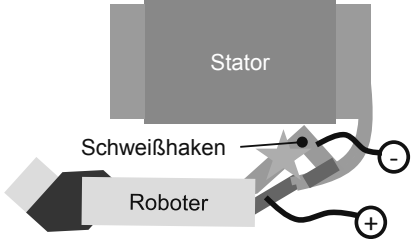
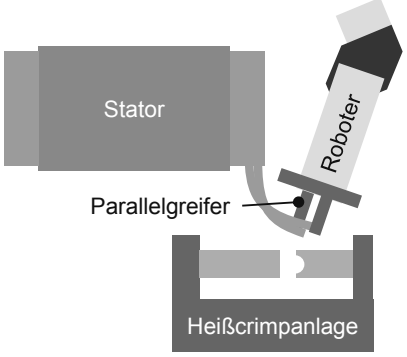
Grundsätzlich eignen sich verschiedene Fügeverfahren, um einen elektrischen Kontakt bei Wicklungsenden zu erzeugen. Löten, speziell das Induktionslöten, ist zwar gut automatisierbar, bedingt jedoch die Vorbereitung der Lötstelle sowie die Zuführung von Lot. Für die Umsetzung in einer robotergestützten Montage eignet sich dieses Verfahren daher weniger gut.

Eine Alternative sind unlösbare elektrische Pressverbindungen, durch plastische Verformung. Die Herstellung der Verbindung bei Raumtemperatur, die kurzen Bearbeitungszeiten und der universelle Anwendungsbereich sind entscheidende Gründe für die immer weitere Verbreitung [138]. Ein spezielles Verfahren ist das Heißscrimpen. Es kombiniert thermisches Abisolieren und Pressenverbinden. Bei bis zu 600 °C Prozesstemperatur können lackierte Drähte ohne Vorbehandlung und ohne Lot in eine Hülse verbunden werden [139]. Diese Vorteile sprechen für die Integration dieses Verfahrens in eine automatisierte Linie.

Durch Schweißen entstehen stoffschlüssige, unlösbare Verbindungen. Untergliedert werden kann die Technologie in Schmelzschweiß- und Pressschweißverfahren. Für eine robotergestützte Kontaktierung von Wicklungsenden kommt aufgrund der nötigen Vorbehandlung das Schmelzschweißen nicht in Frage. Kaltpressschweißen eignet sich ebenfalls nicht, da ein sicheres Kontaktieren der größeren Anzahl an Einzeldrähten nicht gewährleistet werden kann.

Beim Pressschweißen mit Widerstandserwärmung wird mittels aufheizen der Verbindungsstelle durch Stromfluss und Druck von beiden Seiten eine Verbindung hergestellt. Die konzentrierte Energiezufuhr ermöglicht kurze Prozesszeiten und das Verbinden nicht artgleicher Metalle [140]. Auf Basis des Pressschweißens und Heißscrimpens können Werkzeuge für die robotergestützte Kontaktierung von Statorwicklungen konzeptioniert werden.

Tabelle 7.1: Konzepte zur robotergestützten Kontaktierung

Konzept Pressschweißen	Konzept Heißscrempen
Greifer übernimmt Handhabung und Kontaktierung	Greifer übernimmt Handhabung, Heißscrempanlage übernimmt Kontaktierung
	

Beim Konzept „Pressschweißen“ übernimmt der Roboter mit nur einem Werkzeug die Aufnahme, die Fixierung und die Kontaktierung der Drahtenden. Das Werkzeug wird als Haken ausgelegt. Im ersten Schritt werden die entsprechenden Wicklungsenden aufgenommen und durch eine sternförmige Drehsicherung das Herausrutschen verhindert. Ein Aktor komprimiert die Drähte, Strom wird angelegt und die Wicklungsenden werden verschweißt. Neben dem Werkzeug muss aufgrund der hohen Ströme sowohl für die Zelle als auch für den Roboter ein geeignetes Sicherheitskonzept entwickelt werden.

Zunächst wird die Machbarkeit dieses Konzeptes überprüft. Das Werkzeug wird auf die Anschlussmaße der Roboterzelle ausgelegt und in geschützter Umgebung getestet. Aus isolierenden und thermischen Gründen wird als Werkstoff für den Greifer mit Polyetheretherketon (PEEK) (Schmelztemperatur 340 °C) ein Kunststoff gewählt, der beständig gegenüber hohen Temperaturen ist [100].

Ergänzend wird die Schweißzone mit kohlenstoffverstärktem Aluminiumoxid, einem keramischen Faserverbundstoff, ausgekleidet, um die thermische Belastung für den Greifer möglichst gering zu halten.

Das Pressen der Drähte wird über einen pneumatischen Kompaktzylinder realisiert, der eine Kraft von 395 N aufbringt. Die Schweißflächen werden extern durch Leitungen, die über Schrauben befestigt werden, versorgt und keilförmig ausgelegt.

Als Werkstoff kommt eine Stahllegierung zum Einsatz. Diese ist nicht langzeitbeständig; für eine Machbarkeitsstudie aus Kostengründen aber sehr gut geeignet.

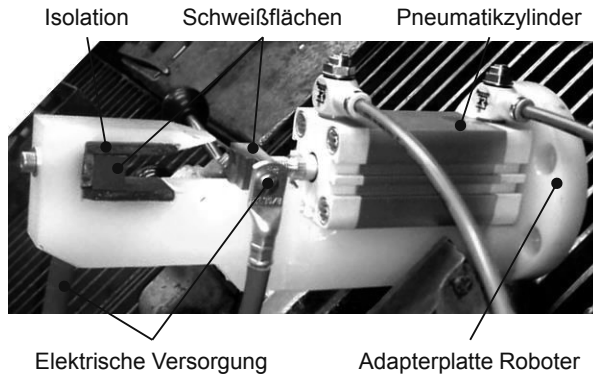


Bild 7.4: Montiertes und angeschlossenes Hakenwerkzeug

Im Rahmen einer Versuchsreihe mit zu kontaktierenden, abisolierten Drahtbündeln, aus 32 Einzeldrähten und einer Versorgung für das Werkzeug durch eine Gleichstromquelle (0 - 12 V bei 0 - 250 A, 3 kW) konnte die Funktionsfähigkeit des Widerstandspressschweißen nicht nachgewiesen werden. Im Rahmen der Versuche wird abwechselnd die Stromstärke (150 A - 250 A) und die Schweißdauer (10 s - 120 s) erhöht, jedoch keine Kontaktierung realisiert. Gründe liegen in der zu schwachen Versorgung und im hohen Spannungsabfall an den Zuleitungen.

Beim zweiten Konzept übernimmt der Roboter lediglich die Aufnahme und den Transport der Wicklungsenden. Mit einem Parallelgreifer werden die Drähte schaltrichtig eingesammelt und mit einer Heißcrimpanlage, die das Crimpwerkzeug über eine Linearachse in die Richtung der Montagezelle verlagern kann, kontaktiert. Das Konzept beinhaltet die Beistellung einer Kontaktieranlage, garantiert damit aber ein prozesssicheres Kontaktieren. Die Verfolgung dieses Konzeptes ist, sowohl aus sicherheitstechnischer Sicht und aus Gründen der Prozesssicherheit, zielführender. Zudem entfällt der Prozess des Abisolierens der Wicklungsenden.

Zum Greifen und Zuschneiden der Wicklungsenden lässt sich der in Kapitel 7.1.1 vorgestellte Greifer weiterverwenden. Die Aufnahme der Wicklungsenden erfolgt jedoch nicht mehr über Formschluss sondern kraftschlüssig auf der gesamten Länge der Greifbacken. Die Entwicklung einer Linearachse für das Heißcrimpwerkzeug durch den Anlagenhersteller steht bisher noch aus. [141]

7.2 Formen des Wickelkopfes¹¹

Je nach Baugröße werden Wickelköpfe mittels verschieden ausgelegter Pressen geformt. Der Stator wird dabei auf einen Presstisch gespannt. Ein linear beweglicher Stößel presst den Stator zu Prozessbeginn in einen zweiten mit einem Dorn ausgestatteten Stößel. Dabei übernimmt der Dorn die Weitung der Wickelköpfe auf beiden Seiten und die spezielle Geometrie der Stößel die anschließende Komprimierung [20]. In anderen Varianten sind beide Stempel verfahrbar oder die Verformung erfolgt in mehreren Schritten [17]. Aus diesem Grundprinzip kann die Funktionsweise eines robotergestützten Werkzeuges abgeleitet werden. Anhand der dokumentierten Prozesskräfte und Werkzeuggewichte wird deutlich, dass ein Roboter mit einer maximalen Traglast von 20 kg nicht den Prozessanforderungen gewachsen ist und so lediglich die Handhabung der Werkzeuge und Werkstücke übernehmen kann [17].

7.2.1 Konzepte für das robotergestützte Wickelkopfformen

Der Antrieb der formgebenden Werkzeuge kann grundsätzlich pneumatisch, elektromechanisch oder hydraulisch erfolgen. Hydraulische Aktoren erzeugen große Kräfte und hohe Drücke bei vergleichsweise geringen Abmessungen. Der niedrigere Wirkungsgrad und v.a. der hohe Systemaufwand gegenüber pneumatischen Lösungen sowie mögliche Leckölverluste sprechen gegen den Einsatz im Laborbetrieb. Druckluftsysteme haben weniger Probleme mit Druckverlusten auch über große Distanzen. Nachteilig sind allerdings die im Vergleich zu den anderen beiden Systemen geringeren Kräfte aufgrund der Druckbegrenzung in pneumatischen Netzen. [142] Elektrische Antriebe verbrauchen Energie nur bei der Ausführung von Bewegungen und weisen daher einen wesentlich höheren Wirkungsgrad auf. Auch aufgrund der vergleichsweise einfachen Installation und dem geringen Wartungsaufwand werden elektromechanische Aktoren immer häufiger an Stelle von hydraulischen oder pneumatischen Antrieben eingesetzt. [143]

Die lineare Bewegung der Werkzeuge kann über Profilschienen, Gleitsysteme oder Gleitlager erfolgen. Die radialen Kräfte zur Komprimierung der Wickelköpfe werden über zusätzliche Antriebe realisiert, welche Pressformen radial zum Stator bewegen.

Eine weitere Möglichkeit ist ein Gleitsystem mit schrägen Flächen. Durch die Linearbewegung eines Körpers auf einen zweiten, stehenden Körper kommt es zu einem schrägen Abgleiten der Flächen. Vorteil dieser Variante ist die Beschränkung auf eine Antriebseinheit verbunden mit einem geringen Steuerungsaufwand.

¹¹ Bei der Konzeptionierung des Formprozesses wurde ich unterstützt von Herrn Florian Berger

Allerdings ist bei der Gestaltung der Winkelflächen auf genaue Berechnung und Flexibilität zu achten. Eine weitere Methode ist die entsprechende Gestaltung der Funktionsflächen, sodass keine radiale Bewegung nötig ist. Diese Methode ist zwar mit geringem Aufwand umzusetzen, jedoch nicht flexibel bezüglich verschiedener Statordurchmesser. Aufgrund der beschriebenen Eigenschaften werden für die Konzeption einer Vorrichtung ein pneumatischer Antrieb sowie eine Gleitpaarung zwischen Gehäuse und formender Baugruppe gewählt. Die Komprimierung der Wickelköpfe erfolgt über schräge Flächen, die über wechselbare Formelemente flexibel auf verschiedene Statortypen ausgelegt werden können. [144]

7.2.2 Vorrichtung zur Formung von Wickelköpfen

Das Konzept sieht ein zweiteiliges Werkzeug vor. Während die eine Hälfte fest auf dem Montagetisch fixiert ist und über Profilschienen zum im Einspannung liegenden Stator verfahren kann, wird die zweite Werkzeughälfte vom Roboterarm gehandhabt.

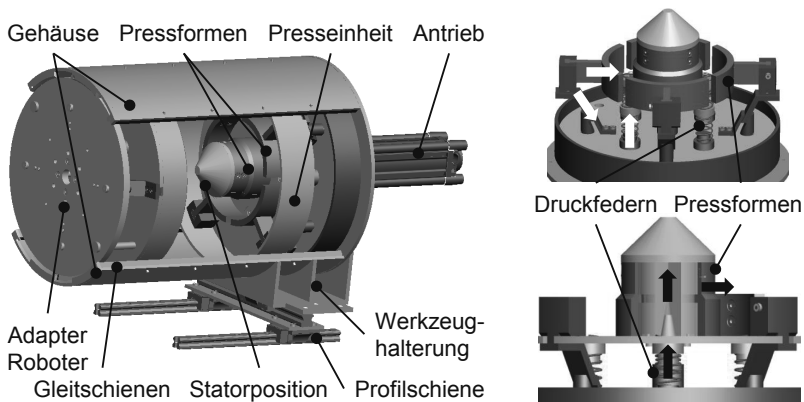


Bild 7.5: Wickelkopfformeinrichtung (links) und deren Funktionsprinzip (rechts)

Nach Anfahren des Stators von beiden Seiten wird das Werkzeug durch eine Rotationsbewegung der robotergeführten Hälfte geschlossen und der pneumatische Aktor fährt die Presseinheit an die Statorseite. Durch das Anfahren erfolgen eine axiale Presswirkung sowie eine Kompression der Druckfedern der Presseinheit. Diese verursachen einerseits eine Verringerung der axialen Kraft und andererseits eine radiale Kraftübertragung auf die Pressformen für Innen- und Außendurchmesser des Wickelkopfes. Das Presselement wird im Gehäuse auf Gleitschienen geführt. Die Übertragung der Kräfte erfolgt über schräge Formelemente, die eine axiale Bewegung in eine radiale Bewegung wandeln. Für die Bearbeitung des Innendurchmessers wird aufgrund der Komprimierung der Druckfedern ein Bolzen in eine schräg zulaufende Aufnahmeeinheit gedrückt.

Diese führen als Reaktion eine ausweichende Bewegung in radiale Richtung aus. Für die Bearbeitung des Außendurchmessers schiebt sich eine schräg laufende Funktionsfläche in das Halblech und dabei im 45° Winkel die Aufnahme der Formelemente radial an den Wickelkopf. [144]

7.3 CAD/CAM-Kette

Die vorgestellte, parameterbasierte Programmierung des Roboters erlaubt im Zusammenwirken mit den entwickelten Werkzeugen und Vorrichtungen das einfache und schnelle Einrichten neuer Statortypen. Bei Verlängerung des Blechpakets muss nur die Positionskoordinate, die das Ende der Mittelachse des Stators darstellt, umdefiniert werden. Durchmesser und Nutwinkel werden durch die Parameterdaten der verwendeten Werkzeuge bzw. durch Tausch nötiger Hilfsmittel realisiert und steuerungstechnisch durch ein verändertes Output Signal eingeleitet. Jedoch verlangt auch diese optimierte Programmierung das Erlernen der roboter- und werkzeugspezifischen Sprache und Architektur. Stillstandzeiten der Anlage können zwar durch den Einsatz der entsprechenden Software zur Offline-Programmierung minimiert werden, der Werker wird für die Arbeit dennoch eingelastet. Eine Abhilfe bietet die aus der Fertigungstechnik bekannte CAD/CAM-Kopplung der Konstruktion, Fertigung und Montage.

7.3.1 Digitale Fabrik im Elektromaschinenbau

Der Funktionsumfang und die Leistungsfähigkeit der Werkzeuge der digitalen Fabrik sind auch bei der Entwicklung elektrischer Antriebe von großer Bedeutung. Die Konstruktion sowie das Design innovativer Konzepte oder neuer Statortypen beginnt in einem entsprechenden CAD-Tool, wie z.B. Creo oder Siemens NX. Die Modelle der einzelnen Komponenten können einerseits als Zeichnung für die Fertigung ausgeleitet werden und andererseits durch die Kopplung zwischen CAD-System und Fertigungssystem auch direkt in CNC-Jobs gewandelt werden. Beispiel für eine bereits umgesetzte Lösung ist neben der Fräsbearbeitung der Welle auch die Produktion von Blechgeometrien mit Hilfe von Laserschneidanlagen. Weiterführend werden die CAD-Modelle auch zur Validierung in anderen Softwarelösungen verwendet. Die Ermittlung von Kennlinien des Antriebs sowie die Analyse der akustischen und mechanischen Eigenschaften, wie Schwingungsverhalten oder der Ausdehnung aufgrund der thermischen Belastung durch die Erwärmung während des Betriebs, sind hierbei weit verbreitete Untersuchungen. Werkzeuge hierfür sind ANSYS Multiphysics, Star CCM+ oder Motor CAD. [145] [146]

Auch die Integration des produzierten Antriebs in seine spätere Einsatzumgebung kann vorab optimiert werden. Neben der Einbausituation sowie möglichen Komponenten wie Getriebe oder Verbrennungsmotoren ist auch die computerunterstützte Auslegung der Ansteuerung möglich [147].

In den Fokus der Untersuchung rücken aber auch immer mehr elektromagnetische Eigenschaften wie die Ausprägung der Stator- und Rotormagnetfelder, abbildbar mit ANSYS Maxwell oder Matesy [148]. Hierbei können bereits während der Konstruktion entscheidende Rückschlüsse auf das Design gezogen werden, ohne den ersten Prototypen gefertigt zu haben.

Aus Sicht der Montage existieren ebenfalls verschiedene Ansätze. Neben der Planung alternativer Montagesysteme mit Hilfe der in Kapitel 8.6 und Kapitel 3.5.2 vorgestellten Methoden der Ablauf- und Kinematiksimulation können verschiedene Zellen und Linien wirtschaftlich miteinander verglichen, virtuelle Fabriken geplant und so der Aufwand bei der Einführung neuer Produktionsanlagen erheblich minimiert werden. Ein wichtiger Aspekt bei der Planung manueller Arbeitsplätze ist zudem die Möglichkeit, die Montagevorgänge auch ergonomisch zu optimieren, um die Werker nachhaltig effektiv einsetzen zu können.

Bislang weniger im Fokus der Elektromaschinenbauer ist die virtuelle Planung, Optimierung und Programmierung einzelner Montageprozesse. Erste Ansätze liefern hier Methoden zur Simulation von Wicklungen [149] mit dem Fokus auf der Untersuchung des mechanischen Verhaltens des Formkörpers sowie des Drahtes während des Umformens. Ebenfalls Gegenstand der Simulationen sind die Auswirkungen verschiedener Drahtgeometrien und Wickelbilder auf Faktoren wie Füllgrad oder Anordnung der Lagen, welche die magnetischen Eigenschaften definieren. Zudem existieren erste Forschungsansätze für die Umsetzung einer CAD/CAM-Kopplung bei der Montage von Wicklungen [150]. Hierbei muss neben dem Formkörper zunächst die Wicklung als eigenes Bauteil modelliert werden. Der Fokus wird dabei weniger auf die genaue Geometrie gelegt, als mehr auf den Aufbau der Spule. Die beiden Modelle werden vereint und die Bahnen für die Programmierung des robotergestützten Nadelwickelprozesses ausgeleitet. Verwendete Softwaretools sind hierbei z.B. EASY-ROB oder FAMOS robotic. Die Modellierung der Wicklung stellt zunächst einen zusätzlichen Aufwand dar, ist aber nach einmaliger Erstellung mit geringem Aufwand modifizierbar und somit für andere Formkörper anwendbar. Zudem ist sie wichtige Voraussetzung für die Erstellung eines vollständigen, virtuellen Prototyps, welcher zu einer genaueren Umsetzung der oben vorgestellten Simulationen führt. [66]

Im Bereich der Rotormontage existieren ebenfalls forschungsseitige Ansätze bei der computerbasierten Programmierung von Kinematiken zur Messung der Magnetfelder von oberflächenbestückten Magneten [63].

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Montage ist ein gesichertes Versionsmanagement, welches es dem Elektromaschinenbauer ermöglicht, standortneutral mit der letzten Änderungsversion aller Dokumente zur Fertigung und Montage zu arbeiten (z.B. über die Software PTC) [151].

7.3.2 CAD/CAM-Kopplung zur robotergestützten Statormontage

Wie in Kapitel 3.5.2 bereits beschrieben, stehen für den verwendeten Yaskawa SDA 20D in nur sehr wenigen Softwaretools mathematische Modelle zur Verfügung, die eine Umsetzung der Offline-Programmierung ermöglichen. Mit der neu entwickelten FS100 Steuerung unterstützt die Zelle die Yaskawa eigene offene Softwareumgebung MOTOMAN Sync™. Hierbei kann das Programm in einer Programmiersprache oder dem entsprechenden CAD-Tool am PC geschrieben und gespeichert werden. Die eigentliche Bahnplanung übernimmt weiterhin die Yaskawa-Motion Steuerung. Dies ermöglicht ein qualitativ hochwertiges Bahnverhalten bei gleichzeitig flexibler Programmierung. [152]

Eine entsprechende Erweiterung der Laborzelle vereint daher objektorientierte Programmierung mit den beschriebenen CAD/CAM-Verfahren im Elektromaschinenbau. Die Ansteuerung externer Anlagen kann über USB oder eine serielle Verbindung durch PC-Hochsprachen erfolgen. Bahndaten erhält die Robotersteuerung direkt aus den Konstruktionsdaten. Beim erneuten Durchlaufen der in Kapitel 2.1 dargestellten Prozesskette wird das Potential deutlich.

Ebenfalls aus der Datenbank kann die Windungs- und Gruppenzahl für die Einzelspulen sowie auch ein Parameter für die Ausrichtung und Einfahrtiefe des Wicklungsgreifers in die Wickelmaschine übergeben werden. Die übrigen Verfahrenswege des Roboters ergeben sich aus den Konstruktionsdaten der Wickelschablone und während der Wicklungsmontage aus den Zeichnungen des Stators und des Einziehwerkzeuges.

Der Prozess der Substitution des Deckschiebers durch Einspritzen eines Klebstoffes verhält sich ähnlich zur Pulverbeschichtung des Nutgrundes. Hier können Parameter wie die Wahl des Materialspeichers, die Dicke der Klebstoffnaht oder der Einspritzdruck von einer Datenbank an die Dosieranlage übermittelt werden. Vor der Kontaktierung der Wicklung werden die Wicklungsenden entsprechend des Schaltbildes eingesammelt.

Die Positionsinformationen kommen aus dem CAD-Bild der abgeleiteten freien Drahtenden. Spannung, Stromstärke, Presskraft und -weg werden abhängig von den Wicklungseigenschaften (Material, Dicke und Windungszahl) direkt aus den Konstruktionsdaten erzeugt und der Kontaktieranlage übergeben.

Für das anschließende Wickelkopfpresen bieten sich für eine CAD/CAM-Kopplung Elektromotoren als Aktoren an.

Diese erhalten anhand der CAD-Daten des Wickelkopfes und Stators die Parameter für Verfahrenswege und -kräfte und können so die Pressformen flexibel für verschiedene Stator Typen einsetzen.

7.3.3 3D-Kamerasysteme zur Überwachung des Prozesses

Eine erfolgreiche CAD/CAM-Kopplung bietet zusätzlich die Möglichkeit moderne Sensorik zur Überwachung und Steuerung des Montageprozesses einzusetzen. Ein Beispiel sind 3D-Kamerasysteme, deren IR-Licht mit aufmoduliertem Signal an einem Hindernis reflektiert und von der Kameraeinheit aufgenommen wird. Der Phasenversatz zwischen ausgesendeten und eingehenden Signal ist dabei maßgebend für den Abstand zum Messobjekt. [76]

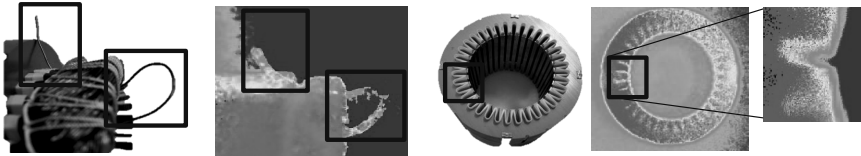


Bild 7.6: 3D Kamerasysteme zur Prozessüberwachung [76]

Die in Bild 7.6 dargestellten Aufnahmen dieser bildverarbeitenden Systeme erlauben die Detektion von Drähten und Nuten. Eine in den kommenden Jahren weiter steigende Auflösung [153] ermöglicht nach Kommunikation mit der CAD/CAM-gekoppelten Kinematik, die Errechnung und Anfahrt der Nutposition sowie die Detektion falsch positionierter Objekte, z.B. Wicklungen, Deckschieber oder Ausrichtung des Stators, in für die robotergestützte Automatisierung geforderter hoher Genauigkeit.

8 Evaluation und Projektierung des robotergestützten Montagesystems¹²

Fertigungssysteme müssen an verschiedene Bedingungen angepasst werden und zudem möglichst wirtschaftlich arbeiten. Im folgenden Kapitel wird die Evaluation des im Rahmen der Forschungsarbeiten entwickelten robotergestützten Montagesystems dargestellt. Fokus ist hierbei der Vergleich der Prozesszeiten und der Wirtschaftlichkeit. Zudem werden Simulationsstudien vorgestellt, die im Rahmen der Projektierung des Systems durchgeführt wurden.

8.1 Methoden zur Analyse von Produktionssystemen

Unter Montieren werden alle Vorgänge zusammengefasst, „die dem Zusammenbau von geometrisch bestimmten Körpern dienen“ [154]. Montagesysteme vereinen Verfahren des Fügens mit Prüf-, Mess- und Handhabungsaufgaben [155]. Ein Fertigungssystem kombiniert die Begriffe Fertigung und System. Fertigung steht für die (schrittweise) Veränderung von Form und Stoffeigenschaften eines Werkstoffs. Ein Fertigungssystem ist entsprechend die Verknüpfung einzelner Betriebsmittel und Arbeitsplätze und damit ein Subsystem des Produktionssegmentes, welches eng mit anderen verzahnt ist [156]. Fertigungssysteme lassen sich in die Kategorien manuelles, teilautomatisches und vollautomatisches Fertigungssystem unterteilen.

Das manuelle System beruht auf dem alleinigen Einsatz von Arbeitskräften und Werkzeugen. Der Großteil der Prozessschritte wird durch den Mitarbeiter ausgeführt. Dieses System zeichnet sich durch geringe Rüstzeiten und hohe Flexibilität aus, was v.a. bei kleinen Losgrößen von Vorteil ist. [157]

Das teilautomatisierte Fertigungssystem weist im Vergleich zum manuellen System einen höheren Automatisierungsgrad auf. Sowohl die Steuerung einzelner Anlagen als auch die Transportvorgänge der Werkstücke erfolgen teilweise selbstständig. Teile der Arbeitsschritte sind allerdings noch eine Kombination von automatisierten und manuellen Arbeitsschritten z.B. Werkstückentnahmen oder die Montage vorgefertigter Halbzeuge. Bezüglich der Eigenschaften steht der steigenden Ausbringungsmenge die geringere Flexibilität und Variantenvielfalt gegenüber. [158]

Der hohe Automatisierungsgrad bei einem vollautomatisierten Fertigungssystem spiegelt sich in Maschinen, Transportvorgängen und auch Prüfprozessen wider. Die manuelle Arbeitskraft übernimmt Aufgaben der Instandsetzung und Überwachung.

¹² Beim der Durchführung der wirtschaftlichen Analyse wurde ich unterstützt von Herrn Tim Pfeiffer und Frau Katarina Maihöfer.

Bei diesem System sinkt die Anzahl fertiger Varianten, v.a. aufgrund der Rüstzeiten. Durch die notwendigen hohen Investitionskosten besteht jedoch die Möglichkeit, die Ausbringungsmenge zu steigern [159]. Das flexible robotergestützte Fertigungssystem soll die jeweiligen Vorteile der Systeme durch den Einsatz eines Roboters verknüpfen.

Eine parametrisierte Programmierung und universelle Werkzeuge sollen die Flexibilität gewährleisten und Rüstzeiten minimieren. Jedoch sind auch bei diesen Fertigungssystemen hohe Investitionskosten zu erwarten [33]. Die Gliederung von Montagesystemen (manuell, hybrid und automatisch) und auch die Kriterien für die Auswahl ergeben sich analog [160] [161].

Bei der Gestaltung eines neuen Fertigungssystems besteht einerseits die Möglichkeit, die Produktion standardisiert, also analog zu einer vorhandenen Produktion, aufzubauen. Vorteile sind einheitliche Standards bei Qualität, Steuerung und Prozessen. Zudem sind die Systeme leichter zu koordinieren und zu vergleichen. Andererseits kann jedoch auch die Strategie verfolgt werden, die Produktion an den jeweiligen Standort anzupassen und so die Ressourcen optimal einzusetzen. [156] Nur wenn sowohl die jeweiligen Vor- und Nachteile eines Standortes in der Strategie berücksichtigt werden als auch die technisch-organisatorischen Elemente mit dem Menschen zusammenwirken, ist eine flexible und wirtschaftliche Produktion möglich. [161]

Für den Vergleich von Produktionssystemen existiert eine Vielzahl an Verfahren. Die Auswahl des Verfahrens hängt stark von der Phase ab, in welcher der Vergleich durchgeführt wird. Während der Planung und Auslegung, in welcher häufig globale und strategische Entscheidungen getroffen werden, ist auch die Anwendung analytischer Warteschlangenmodelle sinnvoll [162]. Mit diesen Modellen können verschiedene Konfigurationen verglichen werden, ohne dass ein komplexes und zeitintensives Simulationsszenario entwickelt werden muss. Eine weitere Möglichkeit ist der Vergleich der Kosten von Systemen. [163] [164]

Ebenfalls möglich ist der zeitliche Vergleich zur Herstellung eines Produktes. Methoden sind die analytische Zeitermittlung nach MTM oder die Ermittlung nach REFA. Auch die Ergonomie, welche bei falscher Auslegung die Effizienz eines Systems bestimmt, kann als vergleichender Aspekt eingehen [165]. Das Gleiche gilt für die Qualität der einzelnen Fertigungssysteme.

Bei der Analyse von Fertigungssystemen sollte aber nicht nur eine Zielgröße (eindimensional) betrachtet werden. Beispiele hierfür sind die mehrdimensionale Zielfunktion der Nutzwertanalyse und auch die Kosten-Nutzen-Analyse, welche die Ausgaben Einzahlungen gegenüber stellt. [159] [166]

Zudem sollte auch die Außensicht des Unternehmens mit in den Vergleich eingehen. Langfristiger Erfolg hängt vom Gewinnziel ab, welches von Faktoren wie Motivation, Flexibilität oder Qualität beeinflusst wird. [161] [167]

8.2 Darstellung der Einzelprozesse der Statorfertigung

Im Folgenden werden die Abläufe der Statorfertigung in verschiedenen Demonstrations-Montagesystemen näher beschrieben. Der Fokus liegt hierbei auf Kosten, Qualität und Zeiten sowie den flexiblen Einsatz der Systeme. Die Blechpakete und Nutgrundisolation werden in dieser Betrachtung als Zukaufteile berücksichtigt. Die Basis für den Vergleich stellt ein Stator IEC 112/4.103 mit dem Innendurchmesser 103 mm, einer Länge von 140 mm und der Nutzahl 36 dar.

8.2.1 Manuelles Montagesystem

Die detaillierte Beschreibung der Prozesse des manuellen Montagesystems (MMS) wurde bereits in Kapitel 2.2 dargestellt und soll hier zusammenfassend wiederholt werden. Zu Beginn wird der Stator in eine Vorrichtung eingespannt und der Nutgrund isoliert. Die Nutgrundisolationen werden mit einer Falzmaschine gefertigt und anschließend stückweise von einem Werker axial oder radial eingelegt. Der nächste Arbeitsgang ist das Einträufeln der Einzelspulen. Der Draht wird von einer Arbeitskraft geführt und auf den auf der Wickelmaschine rotierenden Formkörper abgelegt. Sobald die statorspezifische Anzahl der Rotationen (Windungszahl) erreicht ist, werden die Spulen fixiert. Der Formkörper fährt zusammen und die Wicklung kann entnommen werden. Nötige Rüstprozesse sind die Einstellung der Wicklungslänge und das Spannen des Drahtes. Da der Querschnitt der Wicklungsseite größer ist als der Nutschlitz, wird die Spule drahtweise in die Nuten eingelegt (eingeträufelt) [17]. Um die Wicklung zu fixieren und zu isolieren, werden folgend die Deckschieber eingeschoben. Hierbei ist darauf zu achten, dass Deckschieber und Nutgrundisolation sich überdecken.

Beim Abbinden und Ausrichten werden die Drahtableitungen mit einem Band abgebunden und ausgerichtet. Dies dient zur Vermeidung von Fehlkontaktierungen und als Transportsicherung zum folgenden Arbeitsplatz, der Schweißkabine. Es folgt die Kontaktierung der Spulenden inklusive der vorangehenden Entfernung des Isolationsmaterials der Spulenden. [17]

Im nächsten Arbeitsschritt wird der Wickelkopf bandagiert. Beim manuellen Prozess kommt ein verdrehter Faden zum Einsatz, der mittels einer gebogenen und gekrümmten Bandagiernadel im Schlingstich vernäht wird. Abschließend wird der Wickelkopf mittels Nuteisen, Hammer, Klopfeilen und Zange in seine endgültige Form gebracht.

8.2.2 Teilautomatisiertes Montagesystem

Der Mitarbeiter spannt das Blechpaket beim teilautomatisierten Montagesystem (TAMS) in die Nutgrundisoliermaschine ein. Diese kann ohne Umrüstvorgänge für verschiedene Statorn das passende Isolationsmaterial Nut für Nut produzieren und einschieben. Das Blechpaket wird hierbei mittels angetriebener Werkstückaufspannung um die eigene Achse gedreht.

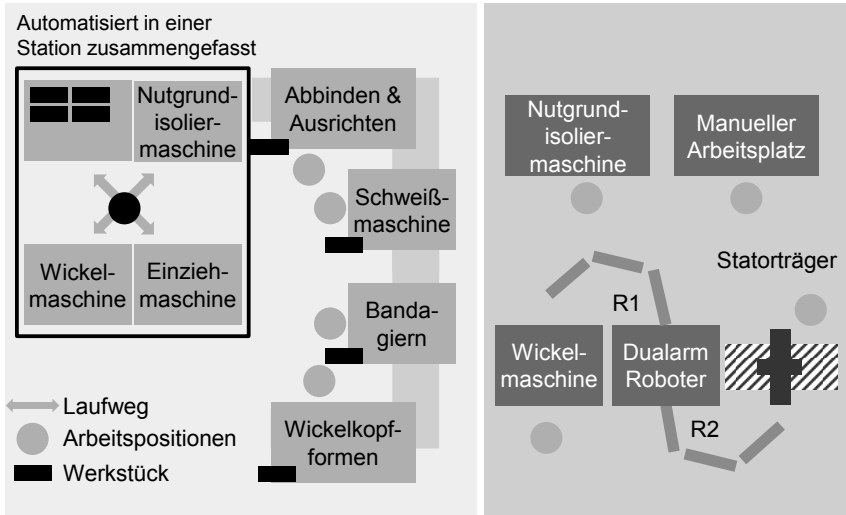


Bild 8.1: (Teil-)automatisches (links) und robotergestütztes System (rechts) zur Statormontage [168]

Nach dem Einlegen startet der Werker den Spulprozess der Einzelspulen an der Wickelmaschine. Zur Verwendung kommt eine Schablone mit drei Kammern, die es erlaubt drei Spulen in einem Prozess zu wickeln. Diese werden abgebunden und mittels eines Übertragungswerkzeuges in die Nadeln des Einziehwerkzeuges eingehängt. [33]

Nachdem alle Einzelspulen übertragen sind, wird der nutgrundisolierte Stator ebenfalls in die Einziehmaschine eingelegt. Im sogenannten Einziehverfahren werden anschließend die Einzelspulen gleichzeitig von einem Einziehpilz in die Nuten gezogen. Die Montage der Deckschieber erfolgt wie beim MMS während der Stator noch in der Einziehvorrichtung gespannt ist. Der isolierte Stator wird dann mit einem Kran vom Einziehwerkzeug zu vier in Serie liegenden teilautomatisierten Arbeitsplätzen transportiert, welche durch Transportbänder verbunden sind. Erster manueller Prozess ist das Abbinden und Ausrichten der Wicklungsenden.

Die Kontaktierung erfolgt am zweiten Arbeitsplatz mit Hilfe eines Kontaktierautomaten, der das Abtrennen der Isolation der Wicklungsenden integriert. Auch das Bandagieren erfolgt automatisch. Der Werker legt den Stator in einen Automaten, der zunächst die erste und nach manueller Drehung die zweite Seite des Stators bandagiert. Über das letzte Transportband gelangt der Stator dann zur Pressvorrichtung. Diese formt ebenfalls zunächst die erste und dann die zweite Seite des Wickelkopfes. [161]

8.2.3 Vollautomatisiertes Montagesystem

Der erste Schritt beim automatischen Montagesystem (AMS) ist das manuelle Einlegen des Blechpaketes in das Montagezentrum. Dieses führt die folgenden Prozessschritte automatisch aus: Die Nutgrundisolation wird gestanzt, gefalzt und eingeschoben. Gleichzeitig werden die Einzelspulen auf ein Dreifachwerkzeug gewickelt und in das Einziehwerkzeug eingefädelt. Nachdem dieses voll bestückt ist, legt ein Werkstückwechsler den nutgrundisolierten Stator ein. Durch eine Hubbewegung werden die Spulen in die Nuten gezogen sowie parallel die Deckschieber eingeschoben. Der Stator wird zur nächsten Station befördert und die folgenden Prozessschritte analog zur teilautomatisierten Montage durchgeführt. [161]

8.2.4 Robotergestütztes Montagesystem

Auch bei einem flexiblen / robotergestützten System (FRMS) zur Statormontage mit einem zweiarmigen Roboter wird im ersten Schritt das Blechpaket in die Haltevorrichtung gespannt und anschließend die vorgefertigte Nutgrundisolation eingelegt. Während die beiden Roboterarme bereits für die Wicklungsmontage gerüstet sind, wird vom Werker die statorspezifische Wickelschablone an der Wickelmaschine festgeschraubt. Der Roboter greift und fixiert den Draht an der Schablone. Der Wickelprozess wird gestartet und die drei Kammern der Wickelschablone werden in der eingestellten Windungszahl bewickelt. Nachdem die Einzelspulen gewickelt sind, greift der Roboterarm die Spulen und entnimmt sie. Das neue, freie Drahtende wird automatisch an der Wickelschablone fixiert. Während der Wickelprozess neu startet, transportiert der Roboter die Wicklung zum im Stator eingelegten Nadelwerkzeug. Das Werkzeug wird mit den Wicklungen durch den Stator gedrückt und dabei die Wicklung in die Nut eingezogen.

Bevor der Stator im angetriebenen Einspannring weiterrotiert und der zweite Roboterarm das Nadelwerkzeug neu positioniert, werden die Drahtenden vom Roboter in einer Klemmleiste definiert abgelegt. Der Vorgang wird wiederholt, bis der Stator komplett bewickelt ist. Anschließend werden die beiden Roboterarme umgerüstet. Der rechte Arm wird mit dem Werkzeug für die Deckschiebermontage und Imprägnierung gerüstet. Während in der Vorwärtsbewegung die Nut über ein pneumatisch betriebenes Einspritzwerkzeug imprägniert wird, kann der Deckschieber auf der Rückfahrt mit demselben Werkzeug aufgespritzt werden.

Parallel sammelt der linke Arm mit einem Hakenwerkzeug die definiert abgelegten Spulenden ein und kontaktiert sie mittels Crimpprozess, sodass ein geschlossener Leiter entsteht. Für das anschließende Pressen der Wickelköpfe werden die Werkzeuge an beiden Armen nochmals gewechselt, um im Anschluss an diesen Prozess wieder auf die ursprünglichen Wickelwerkzeuge zurückgerüstet zu werden. Am nachgeordneten manuellen Arbeitsplatz finden das Bandagieren und Abbinden des Wickelkopfes statt. Diese Arbeitsschritte erfolgen analog zum manuellen Prozess. [161]

8.3 Analyse der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Fertigungssysteme

Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Vergleich der vorgestellten Fertigungssysteme ist eine ähnliche jährliche Ausbringungsmenge. Da automatisierte Montagesysteme nur schwer herabskalierbar sind, werden alle Systeme im Zweischichtbetrieb ausgelastet und auf die gewählte Stückzahl von 50.000 Statoren pro Jahr hochskaliert. Um diese Ausbringungsmenge einer automatisierten Linie mit manuellen Montagesystemen zu gewährleisten, werden 36 der vorgestellten manuellen Linien benötigt.

Teilautomatisiert werden zwei Systeme benötigt, von den flexiblen / robotergestützten wiederum 15 Linien. Bei einer Skalierung der Ausbringungsmenge auf automatisierten Linien werden zwangsläufig diese auch priorisiert. Zielführender ist daher die Definition möglicher Einsatzszenarios. Ein mögliches Szenario für robotergestützte Fertigungssysteme ist eine Ausbringung von 18 Statoren pro Arbeitstag. [33]

Bild 8.2 stellt ein weiteres Szenario dar. Bei nur einer Variante ist erkennbar, dass bis zu 820 Statoren das manuelle System kostengünstiger ist als die anderen Systeme. Bei einer jährlichen Produktion zwischen 820 und 2580 Statoren einer Variante ist ein robotergestütztes Montagesystem kostengünstig einsetzbar. Mit Erhöhung der Varianz vergrößert sich auch der Einsatzbereich des flexiblen Robotersystems. Grundlage dieser Berechnung bilden die in [33] aufgestellten Kosten, welche in ein entwickeltes Berechnungstool übergeben werden. Es berechnet aus Investitionskosten sowie den verbundenen Kapital- und variablen Kosten (Personalkosten, Materialkosten, Energiekosten und Ausschusskosten), die Aufwände für einen Stator. Differenziert werden hierbei die verschiedenen Prozesse und die unterschiedlichen Montagesysteme. Die Berechnung fundiert auf einer Kostenvergleichsrechnung, bei der zunächst die Kostenarten beschrieben, daraus periodische, unterteilt in fixe- und variable Kosten, Kosten ermittelt und auf die Einzelprozesse aufgeteilt werden. Fixe Kosten beziehen sich auf eine Systemeinheit des Montagesystems und berücksichtigen Skaleneffekte sowie Kapitalkosten (Summe aus kalkulatorischen Zinsen und Abschreibungen).

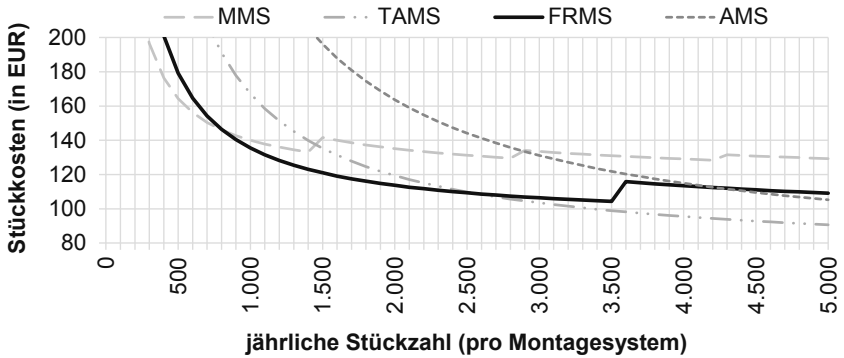


Bild 8.2: Stückkostenverlauf der vorgestellten Montagesysteme [34]

Variable Kosten sind dagegen von der Stückzahl abhängig. Die Stückkosten ergeben sich dann aus den Einzelprozesskosten und den in der Berechnung der Einzelprozesskosten nicht berücksichtigten fixen und variablen Kosten [48]. Die in Bild 8.2 abgebildeten Sprünge in der Stückkostenfunktion entstehen bei Überschreiten einer Grenzstückzahl verbunden mit der Anschaffung einer neuen Systemeinheit.

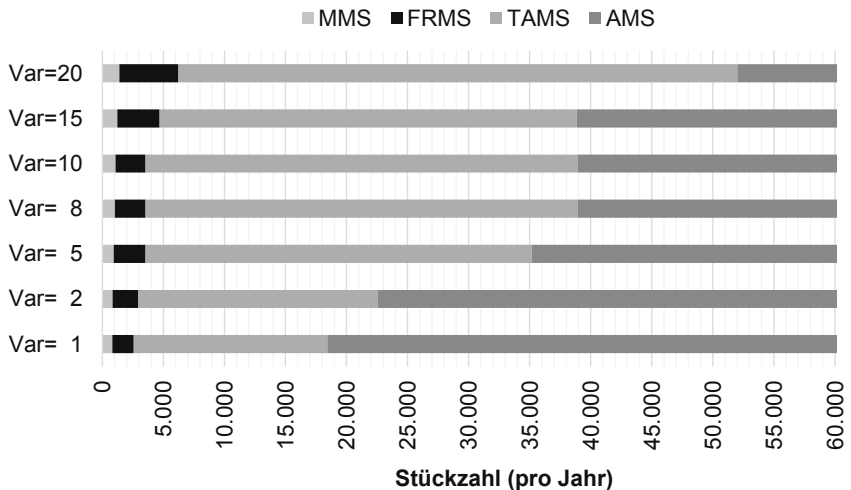


Bild 8.3: Einsatzbereiche der Systeme abhängig von der Variantenzahl (Var)

8.4 Analyse der Prozessqualität der Statormontage

Die Analyse der Qualität verschiedener Prozesse in unterschiedlichen Umfeldern und Unternehmenszielen ist nur sehr schwer möglich. In der Regel sind die Elektromaschinenbauer nach DIN EN ISO 9001 [169] qualifiziert und wenden verschiedene Qualitätswerkzeuge, wie Kaizen, Poka Yoke oder Balance Scoreboard an. Je nach Montagesystem existieren Fehler in unterschiedlichen Häufigkeiten und Ausprägungen. So hat in der manuellen Montage der Werker einen wesentlich höheren Einfluss auf die Produktqualität als bei einer automatisierten Montage, bei der er nur für Rüst- und Wartungsprozesse eingesetzt wird. In Bild 8.4 ist eine Zusammenfassung der möglichen Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten eines Fehlers je Prozessschritt aufgezeigt. Die Ergebnisse sind Teil der Auswertung verschiedener subjektiver Erfahrungswerte.

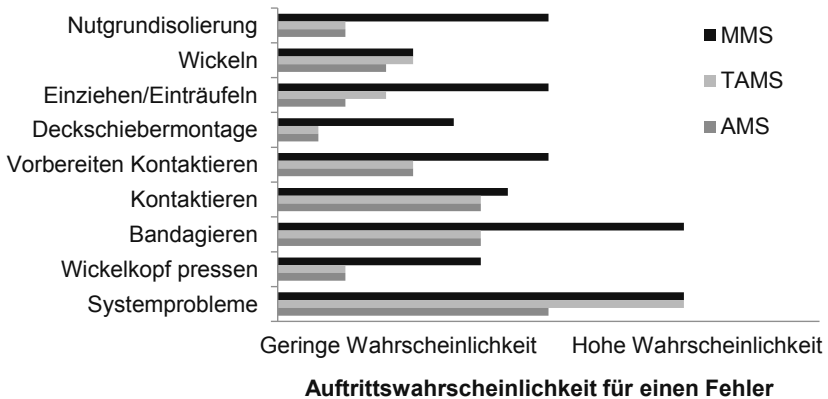


Bild 8.4: *Auftrittswahrscheinlichkeit von Qualitätsproblemen verschiedener Systeme zur Montage von Statoren [33] [170]*

Die am häufigsten auftretenden Probleme sind systembedingt. Darunter zusammengefasst sind Probleme, die das Montagesystem betreffen und nicht einem spezifischen Prozessschritt zugeordnet werden können. Als eine der Hauptursachen wird hierbei die schleichende Veränderung der bereits eingestellten Parameter genannt. Diese sollten idealerweise vor jedem neuen Stator überprüft werden, um eine gleichbleibende Qualität zu gewährleisten. Als weiteres Systemproblem gilt der manuelle Werker. Über alle Systeme mit gleicher Wahrscheinlichkeit treten ebenfalls Probleme mit dem Material auf, z.B. Löcher in Deckschiebern sowie der Nutgrundisolation oder unterschiedliche Drahtdicken.

Bei manuellen Montagesystemen ist der kritische Prozessschritt das Bandagieren. In beiden Fällen wird dieser Prozess wie oben beschrieben manuell durchgeführt. Die Schritte bei beiden Systemen sind daher identisch. Hauptprobleme sind unterschiedlich fest oder falsch vernähte Wickelköpfe oder Beschädigungen der Drähte.

Diese Probleme lassen sich durch die Verwendung eines Bandagierautomaten vermeiden. Ein weiterer kritischer Prozessschritt ist das Einlegen der Wicklung. Ebenfalls größte Herausforderung ist die kreuzungs- und beschädigungsfreie Montage der Drähte in der richtigen Nut. Die Prozessschritte Kontaktieren und Bandagieren werden beim vollautomatischen und teilautomatischen Montagesystem identisch auf den gleichen Anlagen ausgeführt und gelten bei beiden als die kritischen Prozessschritte. Hauptprobleme sind Beschädigungen der Isolation oder des Drahtes.

Bei genauerer Betrachtung der Systeme lässt sich resümieren, dass die meisten Qualitätsprobleme bei manuellen Montagesystemen auftreten. Am besten schneiden die automatisierten Prozessketten ab.

8.5 Analyse des Zeitbedarfs in der Statormontage

Die Gesamtzeit setzt sich zusammen aus folgenden Begriffen

- Prozesszeit: Dauer des reinen Arbeitsvorgangs
- Rüstzeit: Rüsten der Anlage auf den aktuellen Statortyp
- Mitarbeiterzeit: Beschäftigungszeit des Werkers pro Arbeitsschritt
- Maschinenzeit: Belegungszeit der Maschine pro Arbeitsschritt
- Roboterzeit: Belegungszeit des Roboters pro Arbeitsschritt

Die aufgezeigten Daten basieren auf Befragung von Mitarbeitern und Simulationsstudien sowie auf einer detaillierten Aufnahme und MTM-Analyse der einzelnen Prozesse.

Für die Fertigung eines Stators im manuellen Montagesystem werden insgesamt knapp 50 Minuten benötigt. Der Mitarbeiter wird während der gesamten Prozessdauer benötigt, außer in den ersten 20 s, in denen die Nutgrundisolation gestanzt wird. Die Rüstzeit beträgt 6 Minuten und unterteilt sich in die Schritte Kontaktieren, Wicklungsherstellung und Nutgrundisolierung. Die Maschinenzeit von ca. 8 Minuten teilt sich auf die gleichen Prozesse auf. Die größten Prozesszeiten nehmen das Einträufeln der Wicklung und das Kontaktieren ein.

Teilautomatisiert wird ein Stator in 20 Minuten montiert. Die Prozessschritte Wickeln der Einzelspulen und Nutgrundisolierung finden parallel zueinander statt, weshalb die kleinere Prozesszeit der Nutgrundisolierung nicht berücksichtigt werden muss.

Gerüstet werden muss für die Prozesse Wickelkopfformen, Bandagieren, Wicklungsmontage und Wickeln der Einzelspulen. Die steigende Maschinenzeit erklärt sich über die Ausführung von zehn (manuell drei) Prozessschritten auf entsprechenden Anlagen. Teilautomatisiert ist der längste Prozessschritt das Herstellen der Wicklung mit 6 Minuten.

Vollautomatisiert werden für die Montage eines Stators 13 Minuten benötigt. Im Gegensatz dazu steigt die Rüstzeit auf 46 Minuten an und ist damit wesentlich höher, als bei den anderen Systemen. Die längsten Prozessschritte stellen das teilautomatisierte Kontaktieren sowie das Abbinden und Ausrichten mit je 3 Minuten dar.

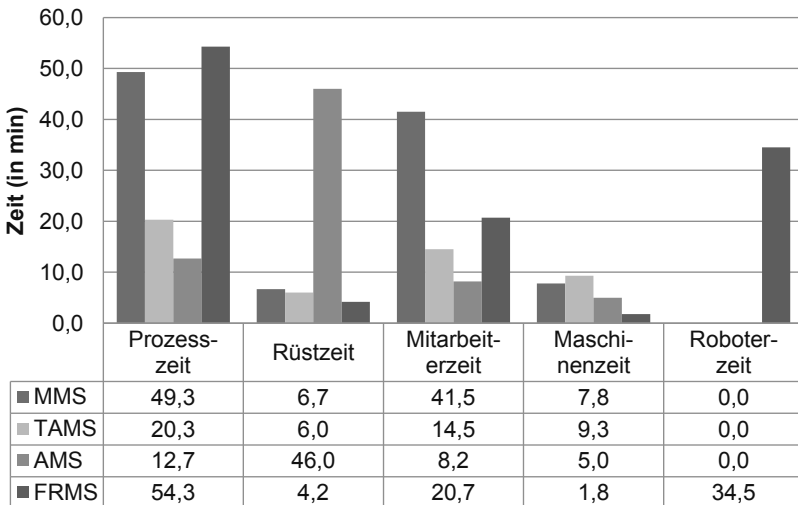


Bild 8.5: Zeiten bei Systemen zur Statormontage

Robotergestützt wird ein Stator in 54 Minuten montiert. Die Roboterzeit beträgt hierbei ca. 34 Minuten. Die Prozesszeit ist geringer als die Summe der Einzelprozesse, da einige Schritte parallel verlaufen. Nachdem die ersten Einzelspulen gewickelt sind, werden diese montiert und gleichzeitig der neue Satz Einzelspulen auf der Dreikammerschablone gewickelt. Auch die Prozesse Kontaktieren und Isolieren erfolgen parallel, die kürzere Prozesszeit des Kontaktierens kann daher wieder vernachlässigt werden.

Die Roboterzeit setzt sich zusammen aus den Prozessen Wicklungsmontage, Deckschiebermontage, Kontaktierung und Pressen. Die Mitarbeiterzeit wird maßgeblich bestimmt von den Prozessschritten Bandagieren und Wickelkopfformen.

Der längste Prozess ist das Einbringen der Deckschieber (15 Minuten). Zusammengefasst gilt der Fertigungsprozessschritt Wickeln als der zeitlich dominante Prozess, der die Gesamtprozesszeit des entsprechenden Systems bestimmt. [161]

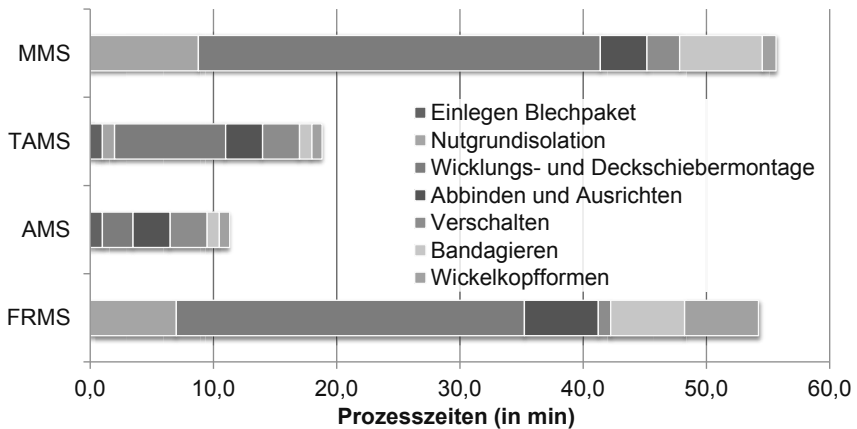


Bild 8.6: Vergleich der Einzelprozesszeiten der unterschiedlichen Systeme

8.6 Simulative Optimierung des robotergestützten Montagesystems¹³

Das in Kapitel 3.6 vorgestellte robotergestützte Montagesystem zur Produktion von Elektromotorstatoren integriert alle im Laufe der Arbeit vorgestellten Prozesse und Werkzeuge. Das umgesetzte Layout lässt jedoch noch Potential zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des Systems. Einerseits wurden die Werkzeuge und Prozesse zunächst nur funktional den verschiedenen Roboterarmen zugewiesen und andererseits kann auch durch eine Änderung der Prozessabfolge die Auslastung der Anlage erhöhen. Zu detaillierten Analyse wurden Simulationsstudien durchgeführt. „Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ [171]. Der Begriff Ablaufsimulation entspricht der ereignisdiskreten Simulation (engl.: Discrete Event Simulation, DES). Es handelt sich um dynamisch-stochastisch-diskrete Simulationsmodelle [172].

¹³ Bei der Erstellung des Simulationsmodells der Zelle wurde ich unterstützt von Herrn Maximilian Dietz

In der Literatur bestehen verschiedene Modelle zum Vorgehen bei Simulationsstudien, u.a. [172] [173] [174]. Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse wurden mit der Materialflusssimulationssoftware Plant Simulation der Firma Siemens AG erzielt.

Die Bibliothek der Software bietet viele fertige Standardbausteine, welche sich in bewegliche und stationäre Elemente untergliedern. Die Software unterstützt einen strukturierten und hierarchischen Modellaufbau sowie eine große Anzahl von Analysewerkzeugen zur Interpretation, wie statische Analysen, Diagramme und Gantt-Charts. [175]

8.6.1 Vorbereitung des Simulationsmodells

Ziel ist der Aufbau von Simulationsmodellen für Fertigungssysteme flexibler robotergestützter Statormontage. Das Modell soll helfen, Schwachstellen im System wie Auslastungen, Engpässe oder dynamisches Verhalten zu identifizieren sowie Konzeptideen in einer virtuellen Testumgebung zu analysieren und weiter zu optimieren. Als Basis dient das in Kapitel 8.2.4 dargestellte robotergestützte Fertigungssystem. Die Prozesszeiten sind in Bild 8.7 dargestellt. Zu Prozessbeginn sind die beiden Roboterarme für den Wickeln- bzw. Einträufelprozess gerüstet. Der Prozess startet, indem der Mitarbeiter das Blechpaket in den Roboterarbeitsplatz einlegt und fixiert.

Anschließend werden die Isolierungen auf einer Isoliermaschine hergestellt und manuell durch den Mitarbeiter in die Nuten eingeschoben. Nach Abschluss des Isolierprozesses wird die Wickelstation gerüstet. Der Rüstprozess enthält das Einbauen der Wickelschablonen sowie das Einstellen auf das richtige Abstandsmaß. Nach Fertigstellung löst der linke Arm den Start der ersten Spulenwicklung aus.

Hierzu greift der Roboter den aus der Drahtzufuhr kommenden Draht und wickelt ihn eine volle Umdrehung um die Schablone. Gemäß der Wicklungsanzahl der Spule rotiert die Schablone um die eigene Achse. Der Arm greift mit seinem Werkzeug die fertig gewickelten Spulen und trennt sie vom Draht. Den abgeschnittenen Zuführdraht befestigt er wieder an der Wickelmaschine, sodass nach dem Herausnehmen ein weiterer Wickelprozess starten kann.

Der Roboter transportiert die fertig gewickelte Spule zur Haltevorrichtung, fügt die Spule in die Nut und legt die Wicklungsenden ab. Nachdem alle Spulen in den Stator montiert wurden, werden beide Arme des Roboters umgerüstet. Der linke Arm wird für den Kontaktierprozess mit einer Schweißzange, der rechte Arm zum Isolieren der Statornuten mit einem speziellen Imprägnier- und Isolierwerkzeug gerüstet. Für die Kontaktierung muss der linke Arm die Spulenden zuerst einsammeln und anschließend verschweißen. Das Isolieren der Wicklung stellt beim FRMS eine Besonderheit dar. Zum Einsatz kommt ein Einspritzwerkzeug, welches zwei Prozesse integriert. Der Roboter fährt die Nut axial ab und imprägniert diese. Beim Zurückfahren führt er den Deckschieber in die Nut ein.

Der Isolierprozess des rechten Armes erfolgt parallel zum Kontaktierungsprozess des linken Arms. Für den anschließenden Formgebungsprozess müssen beide Roboterarme umgerüstet werden.

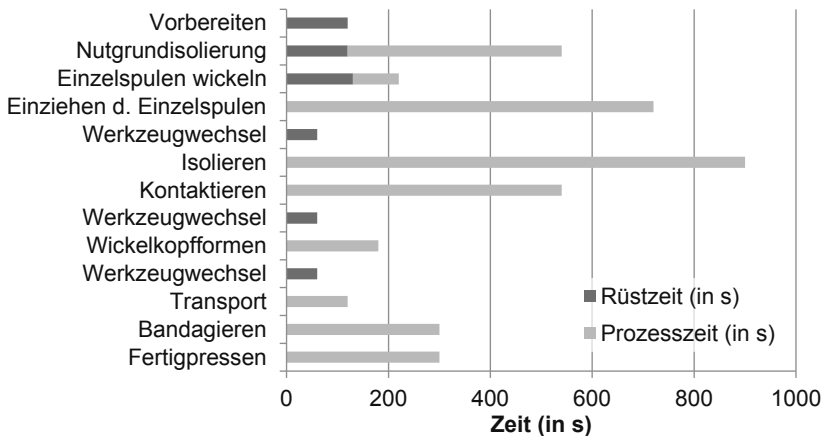


Bild 8.7: Prozess- und Rüstzeiten bei der Statormontage mit einem FRMS

Nach dem Pressen des Wickelkopfes werden beide Arme wieder auf das Ausgangswerkzeug zurückgerüstet. Der Mitarbeiter entnimmt den Stator aus der Vorrichtung und transportiert ihn zu einem manuellen Arbeitsplatz. Dort erfolgt das Bandagieren und anschließende Formen des Wickelkopfes wie beim manuellen Fertigungssystem.

Wie in Kapitel 8.3 dargestellt, wurden ideale Losgrößenbereiche errechnet, in denen das Fertigungssystem jeweils am rentabelsten arbeitet.

8.6.2 Modellierung und Validierung der Simulation

Das Zellenlayout wird in sinnvoll zusammenhängende Elemente freigeschnitten und durch Verknüpfung, Ablaufsteuerung und Parametrierung umgesetzt. Aufgrund der Systemkomplexität wird der Roboter als Blackbox behandelt und erst im zweiten Schritt genauer betrachtet. Der Ablauf wird mit der Freigabe eines Blechpaketbausteins gestartet, gefolgt von der Nutgrundisolation. Für den anschließenden Wickelprozess werden sechs Drahtpakete freigegeben und auf den Puffer gelagert. Sobald das isolierte Blechpaket freigegeben ist, kann die Wicklungsmontage erfolgen. Nach Abschluss kann der Stator auf den manuellen Arbeitsplatz transportiert werden. Der zugeteilte Mitarbeiter wird dabei zu dem anfordernden Baustein gesendet, um die vorgegebenen Aufgaben zu erledigen. Jeder Arm des ambidexteren Roboters ist über einen „Pick-and-Place“-Baustein abgebildet.

Sechs Werkzeugwechselstationen bilden den Rüstprozess ab, da pro Arm drei Umrüstvorgänge stattfinden. Die Verteilstation bildet die Schnittstelle zum manuellen Arbeitsplatz ab.

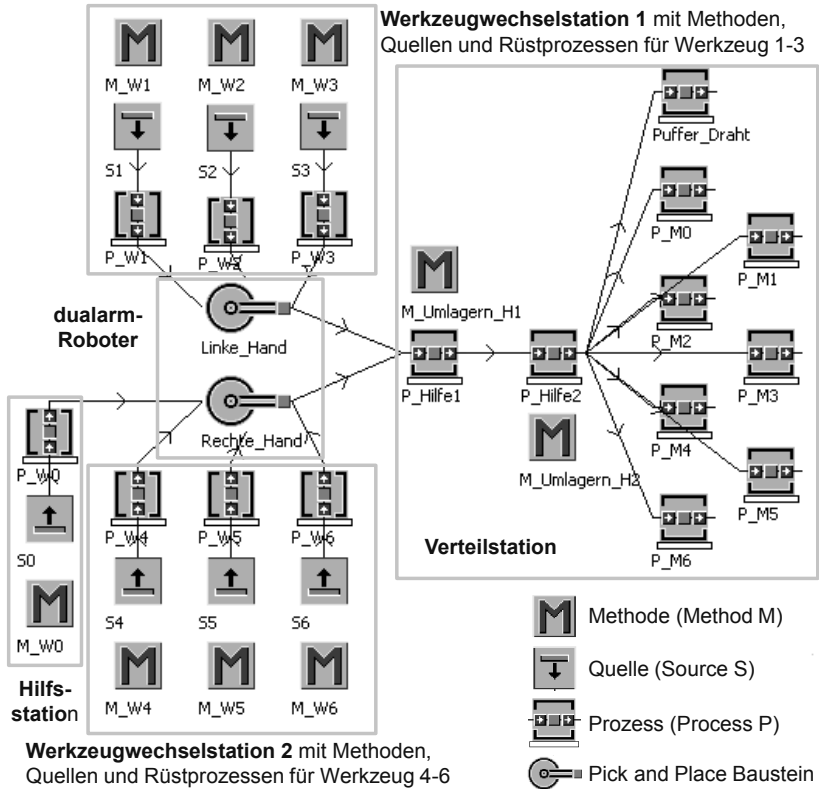


Bild 8.8: Softwaremodell des ambidexteren Roboters

8.6.3 Optimierung des robotergestützten Montagesystems

Die Analyse des projektierten Robotermodells zeigt, dass der rechte Roboterarm während eines Prozesslaufes 56% und der linke Roboterarm zu 46% wertschöpfend arbeitet. Zur Steigerung der Auslastung sollen nach dem Einziehen der Spulen zunächst beide Arme die Montage der Deckschieberisolation übernehmen. Der linke Roboter wird nach 540 s Prozesszeit auf das Kontaktierwerkzeug umgerüstet. Damit isoliert der Roboter mit seinem rechten Arm sechs Nuten weniger. Der Kontaktier- und der Isolierprozess sollten gleichzeitig enden.

Nach Modellierung und Simulationslauf ergibt sich eine Reduzierung des Isolierprozesses von 900 s auf 750 s und somit eine Gesamteinsparung der Roboterzelle von 5%. Zudem steigt die Mitarbeiterauslastung um 2%.

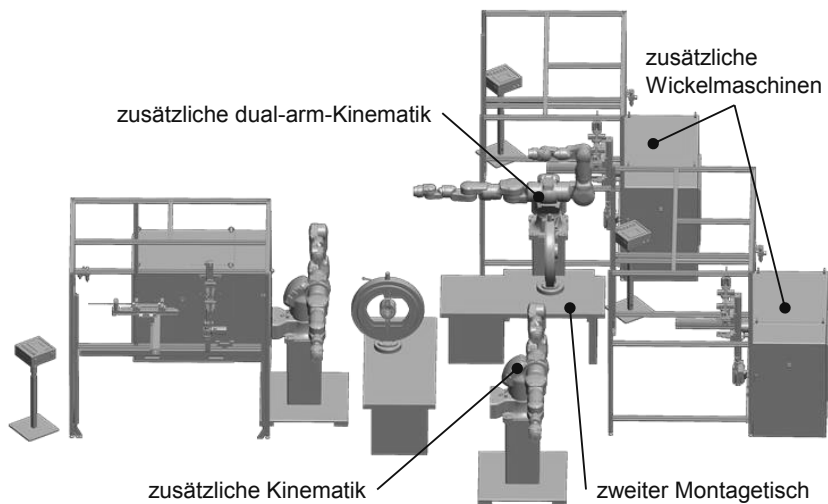


Bild 8.9: Erweitertes Systemmodell mit zusätzlichen Robotern

Als weitere Schwachstelle gilt die hohe Prozesszeit des Roboters, speziell durch die Prozesse Isolieren (900 s), Einziehen der Wicklungen (720 s) und Kontaktieren (540 s). Zudem entspricht die Mitarbeiterauslastung lediglich 43%. Zur Produktivitätssteigerung wurden verschiedene Konzepte entwickelt. Ein erfolgsversprechender Ansatz ist die Erweiterung um eine zweite Roboterzelle inklusive einer zweiten Wickelstation und einer zusätzlichen Kinematik. Dieser soll bei den Prozessen Isolieren, Einziehen und Kontaktieren unterstützend tätig sein (siehe Bild 8.9). Durch die Verdopplung der Wickelzellen und Handhabungsgeräte kann die Zeit für den Einziehprozess halbiert werden, die Rüstzeit verdoppelt sich jedoch. Nach Abschluss der Wicklungsmontage werden die rechten Arme der beiden ambidexteren Zellen und der zusätzliche Roboter für den Isolierprozess, die linken Arme für die Kontaktierung verwendet. Die Isolierzeit halbiert sich. Die Durchlaufzeit kann mit dem vorgeschlagenen System um 17% reduziert werden. Ebenfalls simuliert werden konnte, dass ein Mitarbeiter zwei Zellen gleichzeitig bedienen kann.

8.7 Vergleich der verschiedenen Montagesysteme

Die vorgestellten Montagesysteme haben spezifische Vor- und Nachteile und müssen je nach Anforderung (Varianten, Losgrößen, Mitarbeiterzahl, Investition) nachhaltig ausgewählt werden. Tabelle 8.1 fasst die einzelnen Montagesysteme, bezogen auf Kosten, Qualität und Zeiten zusammen.

Bei der eingangs erwähnten Skalierung auf eine jährliche Produktion von 50.000 Statoren schneidet das AMS kostengünstig ab und zeigt zudem eine sehr geringe Fehlerwahrscheinlichkeit. Die angegebenen Zeiten beziehen sich auf den Fall, dass nach jedem Stator gerüstet wird. Hierbei schneidet das teilautomatisierte System am besten ab, gefolgt vom robotergestützten Montagesystem. [161]

Tabelle 8.1: Vergleich verschiedener Systeme zur Statormontage [33] [161]

	MMS	TAMS	AMS	FRMS
Stückkosten (Systeme skaliert auf 50.000 Stück pro Jahr)	130 €	94 €	88 €	170 €
Qualität	2,8 von 5	1,8 von 5	1,7 von 5	2,3 von 5
One-Piece-Flow Produktionszeiten	8.394 s	1.575 s	3.520 s	3.505 s

Die Skalierung der Systeme auf eine jährliche Produktion von 50.000 Statoren bedeutet jedoch auch, dass für das robotergestützte Montagesystem enorme Investitionskosten anfallen. Daher ist die Anwendung dieser in Kapitel 8.3 dargestellten Systeme nur in bestimmten Szenarios, z.B. bei einer jährlichen Produktion zwischen 820 und 2580 Statoren einer Variante, sinnvoll.

9 Zusammenfassung

Die fortgeschrittene Globalisierung stellt auch die Branche des Elektromaschinenbaus vor die große Herausforderung, in einem Land mit hohem Einkommensniveau global wettbewerbsfähig zu produzieren. Um die Wertschöpfung nachhaltig im Land halten zu können, ist für die Hersteller elektrischer Antriebe die Entwicklung kundenorientierter Produkte sowie effizienter und innovativer Montageprozesse entscheidend. Ziel der vorliegenden Arbeit war daher die Konzeption dieser Prozesse unter dem Fokus der Flexibilität der Produktionsmittel. Die Montage von Wicklungen und Deckschiebern mit Hilfe einer dualarm-Roboterkinematik, die Einordnung des entwickelten Montagesystems sowie die Konzeption der übrigen Prozessschritte bildeten die Schwerpunkte.

Bestehende Montagesysteme zur Produktion elektrischer Antriebe zeichnen sich entweder durch eine sehr starre Automatisierung oder viele manuelle Tätigkeiten aus. Da Vorrichtungen automatisierter Linien auf bestimmte Stator Typen ausgelegt und trotz der fehlenden Flexibilität sehr kostenintensiv sind, ist die Weiterverwendung manueller Hilfsmittel für robotergestützte Montagezellen deutlich zielführender umzusetzen. Die gegenüber einer menschlichen Arbeitskraft dem Roboter fehlenden Sinne und kognitiven Fähigkeiten erfordern jedoch eine Anpassung an den Einsatz dieser Hilfsmittel. In diesem Zusammenhang erfolgte im Rahmen der Arbeit zunächst die Konzeption einer Wickelschablone die ohne Kollisionsgefahr von einem Roboter angefahren werden kann. Die entwickelte Dreikammern-Schablone stellt eine kostengünstige, zugängliche und schnell zu rüstende Alternative zu universellen Wickelschablonen dar. Nach Erweiterungen besteht ebenfalls die Möglichkeit, die Positionen der Drahtenden festzulegen und damit definiert zu übergeben. Auch bisherige Lösungen, in der Zelle einen Stator definiert zu spannen, erweisen sich als ungeeignet für eine robotergestützte Montage. Beim Spannen des Blechpakets in eine Vorrichtung, die den Stator während des manuellen Einziehens fixiert, ist es nur mit einem hohen Zeitaufwand möglich, den Stator konzentrisch einzulegen. Die einzelnen Spannzangen wurden daher durch einen Kniehebel ersetzt. Dieser ermöglicht das schnelle Spannen mit definierter Mittelachse und Bezugsebene. Die Flexibilität gegenüber verschiedenen Statordurchmesser wird durch kostengünstige, schnell zu rüstende, austauschbare Schalen gewährleistet.

Nach der automatisierungsgerechten Vorbereitung der Montagezelle war es möglich, die Prozesskette zur flexiblen Montage von Statoren zu konzeptionieren. Ausgehend von einem nutgrundisolierten Stator ist der erste Prozessschritt die Montage der Wicklung. Die beschädigungsfreie Handhabung der biegeschlaffen Drähte ist hierbei eine der wesentlichen Herausforderungen. Um diese zu realisieren, wurden verschiedene Konzepte erstellt, bewertet und aufgebaut.

Bei diesen nimmt der eine Roboterarm die Wicklung aus der definierten Lage in der Schablone der Wickelmaschine auf und positioniert sie in der Statornut. Der zweite Roboterarm unterstützt diesen Einziehvorgang, durch die Handhabung des Gegenwerkzeuges. Beide Konzepte unterscheiden sich in der Anzahl der übertragbaren Spulen. Während der elektromechanische Greifer des ersten Prototypens dafür ausgelegt wurde, Einzelspulen möglichst flexibel einzulegen, werden beim Prototypen des zweiten Konzeptes Spulengruppen mit Hilfe eines Einziehwerkzeuges in den Stator gezogen. Neben der Verkürzung der Prozesszeit ist hierbei v.a. der Kontaktierprozess wesentlich effektiver durchzuführen.

Nach der Montage müssen die Wicklungen fixiert und isoliert werden. Bei Versuchen mit ersten Prototypen wurde klar, dass die robotergestützte Montage vormagazinierter Deckschieber v.a. aufgrund der biegeschlaffen Wicklungen innerhalb und außerhalb des Stators nur sehr schwierig zu realisieren ist. Neben den Problemen mit der Zugänglichkeit stellte sich v.a. das Einfädeln und Einschieben des Materials als problematisch dar. Mit der Weiterentwicklung zu einem zweiten Prototyp, welcher Transport, Formgebung, Zuschnitt, Zuführung und Einschieben der Deckschieber aus dem Lieferzustand des Isolierbandes übernimmt, können die Probleme der Zugänglichkeit und des Materialtransportes überwunden werden. Ein drittes Werkzeug umgeht die genannten Probleme durch eine Substitution des Prozesses. Nach ausführlicher Materialrecherche und Auswahl konnte an Stelle des seitlichen Einschiebens eines festen Stoffes ein geeigneter Kleber von oben in die Nut appliziert und mittels UV-Licht ausgehärtet werden. Das System ist flexibel gegenüber dem Statortyp, sowie der Anzahl der zu produzierenden Motoren und ermöglicht zudem die Erweiterung um den Prozessschritt der Nutimprägung. Für die künftige Weiterentwicklung der Deckschieber-Technologie ist neben der Untersuchung von Prozess- und Materialalternativen auch eine verbundene, detaillierte Analyse der Lebensdauer der Wicklung zielführend. Neben mechanischen, thermischen und elektrischen Einflüssen können hier auch Funktionsmaterialien berücksichtigt werden.

Zur Schließung der Prozesskette wurden die folgenden Schritte Kontaktierung und Wickelkopfformen konzeptioniert. Die vorgestellten Werkzeuge ermöglichen das schaltrichtige Einsammeln der freien Wicklungsenden sowie die Zuführung zu einer Heißscrimanlage. Die Integration des Kontaktierprozesses in ein robotergeführtes Werkzeug ist aufgrund der spezifischen Prozessparameter, der hohen Ströme und Spannungen nur bedingt sinnvoll. Ebenfalls nicht ohne zusätzliche Werkzeuge und Aktoren kommt das Wickelkopfformen aus. Aufgrund der hohen Prozesskräfte übernimmt der Roboter lediglich die Handhabung der Werkzeuge. Die Prozesskräfte werden über einen linearen Pneumatikaktor auf ein Werkzeug übertragen, welches durch seinen komplexen geometrischen Aufbau diese nutzt, um die Wicklung axial und radial zu komprimieren.

Die vorgestellten Prozesse wurden zu einem Montagesystem projiziert. Im Fokus stand hierbei, Prozesse - wenn möglich - zu parallelisieren und nur - wenn nötig - mit einer Kooperation der beiden Roboterarme abzuarbeiten. Das System wurde im Rahmen der Arbeit simulativ untersucht. Neben der Offline-Programmierung stand hierbei v.a. die Systemoptimierung durch eine Ablaufsimulation im Vordergrund.

Es wurden kritische Prozessschritte, wie die zeitintensive Montage der Deckschieber durch einen Roboterarm, detektiert und Maßnahmen, wie die Erweiterung um eine zweite Wickel- und Roboteranlage vorgeschlagen, die zu einer Effizienzsteigerung des Systems führen.

Die Analyse der Wirtschaftlichkeit und der Prozesszeiten sowie der qualitative Vergleich der Prozessschritte validiert die Zelle mit einem resultierenden Einsatzzenario. Hierbei kann nachgewiesen werden, dass ein flexibel roboter-gestütztes Montagesystem, wie in dieser Arbeit konzeptioniert, bei einer jährlichen Produktion in mittleren Stückzahlen wirtschaftlicher arbeitet als eine manuelle oder vollautomatisierte Linie.

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wurden Technologien, Prozesse und Systeme aufgezeigt, die eine effiziente und flexible Montage von Elektromotorstatoren ermöglichen. Für eine Umsetzung in einer industriellen Umgebung müssen jedoch einerseits die konzeptionierten Werkzeuge weiterentwickelt, andererseits auch die Technologien unternehmensexterner Partner (Kontaktierung) flexibler gestaltet werden. Eine wichtige Voraussetzung für die Industrialisierung der Prozesse im nächsten Schritt ist die steuerungsseitige Weiterentwicklung und der Einsatz von CAD/CAM-Ketten über die gesamte Prozesskette. Nach Erfüllung aller Rahmenbedingungen sind die Potentiale, wie eine schnelle Programmierung der Anlage und der Werkzeuge sowie Rückschlüsse auf die montagegerechte Konstruktion von Statoren, enorm. Ebenfalls wichtig ist die Optimierung moderner Sensoriksysteme. Eine prozesssichere Detektion von Objekten mit kleinen geometrischen Abmessungen ermöglicht durch eine CAD/CAM-Kopplung neben der Korrektur von Montagefehlern auch das Greifen von freien Spulen- oder Wicklungsenden.

Nach einer erfolgreichen Einführung und Umsetzung der robotergestützten Prozesse als Alternative zur manuellen oder automatisierten Prozesskette eröffnen sich für den Produzenten elektrischer Antriebe deutliche Potentiale zur Steigerung der Produktionsflexibilität und -effizienz.

10 Summary

The ongoing globalization presents the sector of electrical engineering with the great challenge of producing competitively in a country with high wage level. To keep the value added sustainably in the country, the development of customer-oriented products, as well as more efficient and innovative assembly processes is crucial for the manufacturer of electric actuators. The aim of this dissertation was the conception of these processes under the focus of flexible production goods. The emphasis was put on assembly of windings and slot cover slides, with the help of a robotic kinematic, as well as the classification of developed mounting system and the design of the other process steps.

Existing assembly systems for the production of electric actuators are characterized by either a very rigid automation or many manual activities. Due to the fact that production devices of automated lines are designed for certain stators and are usually very expensive despite a lack of flexibility, the re-use of manual tools for robot-assisted robot cells should be implemented more effectively. However, the use of these tools needs to be adapted, taking into account the missing human senses and cognitive abilities of a robot. In this context, the first step of the present work was the design of a stator-specific stencil, which can be reached by a robot, without any risk of collision. The developed three chambers stencil represents a cost-effective and accessible alternative with a low setup time. After extension, it is also possible to determine the positions of the wire ends and thus to hand them over in a defined manner. Also previous solutions, to fix a stator with a defined position in the cell are not suitable for a robotic assembly. The concentric insertion of the sheet metal package in a device which fixed the stator during the manual feeding involves a very time-consuming process. The individual collets have been replaced by a toggle lever. This enables the quick tensioning with a defined central axis and reference plane. The cost-effective, fast to upgrade, interchangeable shells ensure the flexibility regarding different stators.

After the automation-specific preparation of the assembly cell, it was possible to conceptualize the process chain for the flexible assembly of stators. Starting from an isolated sheet metal package, the first process step is the assembly of the winding. The damage-free handling of the wires is one of the main challenges. To realize this, various concepts have been created, evaluated and built up. A robotic arm picks up the winding from the defined location, in the stencil of the winding machine and positions them in the slot of the stator. The second robot arm supports this pulling process through the handling of the counter tool. Both concepts differ in the number of transferable coils. While the electro-mechanical gripper of the first prototype is designed to flexibly insert single coils, the coil groups in the second concept are assembled into the stator, using a draw-in counter tool.

In addition to the reduction of process time, the bonding process needs to be performed much more efficiently. After the assembly, the windings must be fixed and isolated. In experiments with first prototypes, it became clear that the robotic installation of pre-racked cover slides, is very difficult to realize, especially due to the bending windings inside and outside of the stator. Apart from the problems with accessibility, the threading and inserting of the material has been problematic. The progression to a second prototype, which adopts the transportation, shaping, cutting, feeding and insertion of the cover slide directly from the supplied insulating tape, can help to fix the problems of accessibility and material handling. A third tool avoids the mentioned problems through a substitution of the process. Following a comprehensive material research and selection, a suitable adhesive was applied from above into the groove, and cured using UV light, instead of the side sliding of a solid substance. The system is flexible with regard to different type of stators, as well as the number of engines to be produced and also enables an extension to an impregnation process. For the future development of the cover assembly technology the research on process and material alternatives and a related, detailed analysis of the life of the winding is purposeful. In addition to mechanical, thermal and electrical influences functional materials can be considered as well.

To close the process chain, the following steps concerning the bonding and shaping of the winding head were planned and designed. The described tools enable the correct gathering of the winding ends and the supply to a crimping machine. The integration of the crimping process in a robot-guided tool on the basis of specific process parameters (high currents and voltages), is only sensible to a limited extent. For the shaping process of the winding head, additional tools and actuators have to be developed as well. Due to the high forces of the process, the robot only handles the tools. The process forces are transferred by a linear pneumatic actor that makes use of its complex geometrical structure to compress the winding axially and radially.

The described processes have been projected to an assembly system. The focus was set on a potential parallelization of processes. If necessary, the process could be handled through a cooperation of two robotic arms. The system was also calculated by simulation in the context of this work. In addition to the offline-programming, it was optimized by a flow simulation, to detect critical process steps and to propose measures inducing an increased efficiency of the system.

The analysis of the economic efficiency and process times, as well as the qualitative comparison of the process steps validate the cell and presented a resulting usage scenario: with an annual production volume of between 820 and 2580 stators, a flexible, robot-based mounting system, as designed in this dissertation works more economically than a manual or fully automated line.

In the presented work technologies, processes and systems have been pointed out that provide an efficient and flexible assembly of stators of electric drives. For implementation in an industrial environment the well-conceived tools need to be further developed on the one hand and the technologies of external partners (e.g. bonding) have to become more flexible on the other hand.

An important prerequisite for the industrialization of the processes is the control side development and the use of CAD / CAM chains along the entire process chain. Once all conditions are met, the described potentials are enormous. Of equal importance is the optimization of modern sensor systems. A reliable detection of objects with small geometric dimensions enables the correction of assembly errors and also the gripping of free windings or coil ends, using a CAD / CAM interface.

11 Abkürzungsverzeichnis

1-K.....	Einkomponentenkleber
2-K.....	Zweikomponentenkleber
AMS.....	(voll-)automatisches Fertigungssystem
FEP	Polyfluoräthylenpropylen
FRMS	flexibel robotergestütztes Fertigungssystem
k.....	Einflussfaktoren
m	Faktorstufenkombination
MMS	manuelles Fertigungssystem
MTM	Methods-Time-Measurement
PA6.....	Polyamid 6
PHG.....	Programmierhandgerät
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SEG	Spuleneinziehgerät
SQV	Schlauchquetschventil
TAMS	teilautomatisiertes Fertigungssystem
TMU.....	Time-Measurement Units
UAS	Universelles Analysier-System
UP	ungesättigte Polyesterharze
UV	Ultraviolett
W	Gewichtungsfaktor W bei der technischen Bewertung

12 Literatur

- [1] BARD, A. J.; INZELT, G.; SCHOLZ, F.: *Electrochemical Dictionary*. Berlin: Springer, 2008
- [2] BARLOW, P.: *A curious electro-magnetic experiment*. In: *The Philosophical Magazine and Journal* 59 (1822), S. 241–242
- [3] DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006 (Springer-Lehrbuch)
- [4] MENON, M.: *MEGA TRENDS: Asia Pacific Market Insights - Frost & Sullivan's commentary on the effect of Mega Trends across industries, addressing opportunities, best practices, and major events*. Mountain View, CA, 2011
- [5] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT: *GreenTech made in Germany 2.0: Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland*. 2. Aufl. München: Vahlen, 2009
- [6] United Nations Statistics Division: *United Nations Commodity Trade Statistics Database: 8501 (Electric motors and generators (excluding generating sets))*. <http://comtrade.un.org/db/dqBasicQueryResults.aspx?cc=8501&px=H2&r=156,%20251,%20276,%20381,%20842&y=2007,%202008,%202009,%202010,%202011,%202012&p=0&rg=2&so=9999&qt=n> – Überprüfungsdatum 2013-12-06
- [7] Mediengruppe Münchner Merkur tz: *Siemens streicht und verlagert Stellen: Sparmaßnahmen konkretisiert*. <http://www.merkur-online.de/aktuelles/wirtschaft/siemens-streicht-verlagert-stellen-erlangen-muenchen-offenbach-krefeld-zr-2811422.html>. – Aktualisierungsdatum: 2013-03-20 – Überprüfungsdatum 2014-03-18
- [8] STATISTISCHES BUNDESAMT: *EU-Vergleich der Arbeitskosten und Lohnnebenkosten für das Jahr 2011: Pressemitteilung 144/12*. Wiesbaden, 24.04.2012
- [9] *Handwerk in Bayern: Ergebnisse der Registerauswertung 2010*. München, April 2013 (E52003 201000). – Herausgegeben im April 2013
- [10] Maschinenkatalog. In: International Academy der RWTH Aachen (Hrsg.): *Zertifikatskurs Elektromotoren- und Batterieproduktion, 2013*
- [11] HOERNER, K.: *Grundzüge der Starkstromtechnik*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 1928
- [12] VON LIEBENSTEIN, R.: *Energietechnik*. In: PLAßMANN, W.; SCHULZ, D. (Hrsg.): *Handbuch Elektrotechnik*. 5. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009, S. 809–916
- [13] MERZ, H.; LIPPARDT, G.: *Elektrische Maschinen und Antriebe: Grundlagen und Berechnungsbeispiele für Einsteiger*. 2. Aufl. Berlin: VDE-Verlag GmbH, 2008

- [14] BUSCH, R.: *Elektrotechnik und Elektronik: Für Maschinenbauer und Verfahrenstechniker*. 6. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011 (Studium Grundlagen Maschinenbau)
- [15] SCHRÖDER, D.: *Elektrische Antriebe - Grundlagen: Mit durchgerechneten Übungs- und Prüfungsaufgaben*. 4. Aufl. Dordrecht: Springer, 2009
- [16] BARTENSCHLAGER, J.: *Fachkunde Mechatronik*. 3. Aufl. Haan-Gruten: Verl. Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer, 2008
- [17] TZSCHEUTSCHLER, R.; OLBRICH, H.; JORDAN, W.: *Technologie des Elektromaschinenbaus*. 1. Aufl. Berlin: Verlag Technik GmbH, 1990
- [18] JORDAN, W.: *Technologie kleiner Elektromaschinen: Teil 1*. 1. Aufl. Dresden: technoexpert, 2013
- [19] BAUER, S.; BLOCHER, D.: *Method, Tool and Apparatus for Producing Lamination Packs, and Lamination Pack*. Kienle & Spiess Stanz & Druckgieswerk GmbH, Sachsenheim. Anmeldenr. 68403707, US. 13.09.2007. US. Veröffentlichungsnr. US020070209175A1. IPC H02K 15/00
- [20] JORDAN, W.: *Technologie kleiner Elektromaschinen: Teil 2*. 1. Aufl. Dresden: technoexpert, 2013
- [21] BRITSCHGI, J.; EICHENBERGER, W.; LEUMANN, F.; SUTER, J.: *SMEA Ausbildungshandbuch „Automatischer Tätigkeitsgebiet Elektromaschinenbau“*. Ballwil
- [22] RIST, O.: *Werkzeug zum Einschieben von Deckschiebern in Nuten einer elektrischen Maschine*. Otto Rist Ing. Konstruktion und Maschinenbau, 7980 Ravensburg. Anmeldenr. 2712755, Deutschland. 08.02.1979. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE000002712755A1. IPC H02K 15/06
- [23] WEINERT, S.; MIETH, W.: *Vorrichtung zum Einziehen von Spulen in die Nuten elektrischer Maschinen*. VEB Elektromat, 8080 Dresden. Anmeldenr. 2408552, Deutschland. 03.10.1974. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE000002408552A. IPC H02K 15/085
- [24] DÖTSCH, C.: *Wicklungsisolaton für elektrische Maschinen (speziell Motoren und Generatoren) in Strangprofilform*. Dötsch, Christian, 95111 Rehau. Anmeldenr. 202004011322, Deutschland. 25.11.2004. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE202004011322U1. IPC H02K 3/34
- [25] FRANZ, H.; FRANZ, T.: *Nutenisolation für eine elektrische Maschine*. Siemens AG, 80333 München, DE. Anmeldenr. 102007019555, Deutschland. 13.11.2008. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE102007019555A1. IPC H02K 3/34
- [26] BEHRENS, H.: *Werkzeug zum Einführen der rinnenförmigen, die spulengewickelten abdeckenden Deckschieber in die Nut von Elektromaschinen*. Garbe Lahmey-

- er & Co AG, 5100 Aachen. Anmeldnr. 2133170, Deutschland. 11.01.1973. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE000002133170A. IPC H02K 3/48
- [27] RIST, O.: *Maschine zum automatischen Einschieben von Nuten-Isolation in Statorn oder Anker elektrischer Maschinen*. Rist, Otto, 7980 Ravensburg. Anmeldnr. 2251218, Deutschland. 25.10.1973. Deutschland. Veröffentlichungsnr. P 22 51 218.1. IPC H02K 15/10
- [28] FISCHER, R.; LINSE, H.: *Elektrotechnik für Maschinenbauer: Mit Elektronik, elektrischer Messtechnik, elektrischen Antrieben und Steuerungstechnik*. 14. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013 (Lehrbuch)
- [29] EN 60270:2001-03-00, *Hochspannungs-Prüftechnik - Teilentladungsmessungen (IEC 60270:2000)*
- [30] KÜCHLER, A.: Prüfen, Messen, Diagnose. In: KÜCHLER, A. (Hrsg.): *Hochspannungstechnik: Grundlagen, Technologie, Anwendungen*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 2009 (VDI-Buch), S. 339–476
- [31] MUCH, W.: *Wicklungen und Montage rotierender elektrischer Maschinen*. 3. Aufl. München: Pflaum, 1983
- [32] DIN EN 50347:2003-09, *Drehstromasynchronmotoren für den Allgemeingebrauch mit standardisierten Abmessungen und Leistungen - Baugrößen 56 bis 315 und Flanschgrößen 65 bis 740*
- [33] KÜHL, A.; FRANKE, J.: *Roboterassistierte Montage von Wicklungen „RobStat-Mont“: Forschungsbericht*, 2013
- [34] PFEIFFER, T.; KÜHL, A.; FRANKE, J.: *Wirtschaftliche Analyse der Einzelprozessschritte in der Statornmontage*. Erlangen, 2013. – Diplomarbeit
- [35] WOWRECZKO, D.: Maschinen und Anlagen in der Elektromotorenproduktion. In: International Academy der RWTH Aachen (Hrsg.): *Zertifikatskurs Elektromotoren- und Batterieproduktion*, 2013
- [36] 钟仁康, 仇.: *Stator wire machine*. 常州新区金康精工机械有限公司. Anmeldnr. CN 201320433691, China. 12.02.2014. China. Veröffentlichungsnr. CN203434821U. IPC H02K15/085
- [37] OLBRICH, R.: *Aufbau einer Zeitwirtschaft: Beschreibung der Vorgehensweise*. Köln: Wirtschaftsverlag Bachem, 1993
- [38] MESENHÖLLER, E.: *Methoden der Zeitwirtschaft: Von der Zeit-/Arbeitswirtschaft zum Zeit-Management - Erfolgspotenziale des modernen Zeit-Managements (AWF Seminar)*. 22.04.2004
- [39] *Datenermittlung*. München: Hanser, 1997 (REFA Methodenlehre der Betriebsorganisation 2)

- [40] SCHLICK, C.; LUCZAK, H.; BRUDER, R.: *Arbeitswissenschaft*. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010
- [41] BOKRANZ, R.; LANDAU, K.: *Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen: MTM-Handbuch*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2006
- [42] LOTTER, B. (Hrsg.); WIENDAHL, H.-P. (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006 (VDI)
- [43] BINNER, H. F.: *Handbuch der prozessorientierten Arbeitsorganisation: Methoden und Werkzeuge zur Umsetzung*. 2. Aufl. München: Hanser, 2005 (REFA-Fachbuchreihe Unternehmensentwicklung)
- [44] BOKRANZ, R.; LANDAU, K.: *Handbuch Industrial Engineering: Produktivitätsmanagement mit MTM*. 2. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2012
- [45] DEUTSCHE MTM-VEREINIGUNG: *MTM - 1: Lehrgangsunterlagen*. Hamburg: Deutsche MTM-Vereinigung e.V., 2010
- [46] DEUTSCHE MTM-VEREINIGUNG: *MTM - UAS: Lehrgangsunterlagen*. Hamburg: Deutsche MTM-Vereinigung e.V., 2010
- [47] KUBITSCHKE, F.; KÜHL, A.; FRANKE, J.: *Analyse der manuellen Einzelprozessschritte der Statorenmontage*. Erlangen, 2013. – Projektarbeit
- [48] VOEGELE, A.; SOMMER, L.: *Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure: Kostenmanagement im Engineering*. München: Hanser, 2012
- [49] GÖTZE, U.; HACHE, B.; SCHMIDT, A.; WEBER, T.: *Methodik zur kostenorientierten Bewertung von Prozessketten der Werkstoffverarbeitung*. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 42 (2011), Nr. 7, S. 647–657
- [50] PLINKE, W.; RESE, M.: *Industrielle Kostenrechnung: Eine Einführung*. 7. Aufl. Berlin: Springer, 2006
- [51] BANGSOW, S.: *Praxishandbuch Plant Simulation und SimTalk: Anwendung und Programmierung in über 150 Beispiel-Modellen*. München: Hanser, 2011
- [52] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung ; Methoden und Anwendung*. 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007 (Springer-Lehrbuch)
- [53] JÜRGENHAKE, C.; SCHIERBAUM, T.; FISCHER, C.; DUMITRESCU, R.: Integrative Entwicklung von MID-Bauteilen. In: FRANKE, J. (Hrsg.): *Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID): Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendungen für spritzgegossene Schaltungsträger*. München: Hanser, 2013, S. 229–289

- [54] WEBER, W.: *Industrieroboter: Methoden der Steuerung und Regelung*. 2. Aufl. München: Hanser, 2009
- [55] VDI 2860:1990-05, *Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*
- [56] PRUTHI, S.: *Wireless Robotics: A History, an Overview, and the Need for Standardization*. In: *Wireless Personal Communications* 64 (2012), Nr. 3, S. 597–609
- [57] HESSE, S. (Hrsg.): *Taschenbuch Robotik - Montage - Handhabung*. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2010
- [58] DIPPOLD, T.; KÜHL, A.; FRANKE, J.: *Programmierung eines Greifers zur robotergestützten Wicklungsmontage unter Anwendung des Träufelverfahrens*. Erlangen, 2012. – Projektarbeit
- [59] HESSE, S.: *Grundlagen der Handhabungstechnik*. 2. Aufl. München: Hanser, op. 2010
- [60] POTT, A.; NAUMANN, M.; HÄGELE, M.; VERL, A.: Industrieroboter und Handhabungsgeräte. In: FELDMANN, K.; SCHÖPPNER, V.; SPUR, G. (Hrsg.): *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*. 1. Aufl. München: Hanser, 2014 (Edition: Handbuch der Fertigungstechnik), S. 316–336
- [61] BARTENSCHLAGER, J.; HEBEL, H.; SCHMIDT, G.: *Handhabungstechnik mit Robotertechnik: Funktion, Arbeitsweise, Programmierung*. Braunschweig: Vieweg, 1998 (Viewegs Fachbücher der Technik)
- [62] FRANKE, J.; DOBROSCHKE, A.: A Robot-Based Winding-Process for Flexible Coil Production. In: EMCWA (Hrsg.): *EMCWA Conference*. Imperial Beach, 2009
- [63] FRANKE, J.; DOBROSCHKE, A.; TREMEL, J.; KÜHL, A.: Innovative processes and systems for the automated manufacture, assembly and test of magnetic components for electric motors. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings: EDPC 2011*. Piscataway, N.J: IEEE, 2011, S. 228–234
- [64] ALBRECHT, T.; KÖNIG, W.; BICKEL, B.: Proceeding for wiring integrated winding of segmented stators of electric machines. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings: EDPC 2011*. Piscataway, N.J: IEEE, 2011, S. 132–138
- [65] HULTMAN, E.; LEIJON, M.: *Utilizing cable winding and industrial robots to facilitate the manufacturing of electric machines*. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 29 (2013), Nr. 1, S. 246–256
- [66] DOBROSCHKE, A.: *Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte*. Bamberg: Meisenbach, 2011 (Fertigungstechnik-Erlangen)

- [67] DOBROSCHKE, A.; WELLER, W.: *Verfahren und Vorrichtungen zum Erzeugen von Spulenwickeln*. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 91054 Erlangen. Anmeldenr. 102007048254, Deutschland. 09.04.2009. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE102007048254A1. IPC H02K 15/08
- [68] BICKEL, B.; FRANKE, J.; ALBRECHT, T.: Manufacturing cell for winding and assembling a segmented stator of PM-synchronous machines for hybrid vehicles. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings: EDPC 2012*. Piscataway, N.J.: IEEE, 2012, S. 156–160
- [69] BARNITZKE, A.: *2-Arm-Roboter blasen zur Montage-Offensive*. In: *Automationspraxis* (2011), 07-08, S. 1, 13
- [70] pi4_robotics GmbH: *pi4 Workerbot 2: Datenblatt*. http://www.pi4.de/fileadmin/material/Videos/robotics/Datenblatt_pi4_Workerbot_2.pdf – Überprüfungsdatum 2014-03-15
- [71] rethink robotics: *baxter: Datasheet*. http://rweb.s3.amazonaws.com/assets/Baxter_datasheet_5.131.pdf – Überprüfungsdatum 2014-03-15
- [72] Meka Robotics: *m1 mobile manipulator*. <http://mekabot.com/products/m1-mobile-manipulator/> – Überprüfungsdatum 2013-07-12
- [73] Universal Robots: *UR5: Technische Spezifikationen*. http://media1.limless.dk/UR_Tech_Spec/UR5_DE.pdf – Überprüfungsdatum 2014-03-15
- [74] LEMBURG, J.; GEA FERNANDEZ, J. de; EICH, M.; MRONGA, D., et al.: AILA - design of an autonomous mobile dual-arm robot. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings: ICRA 2011*. Piscataway, N.J.: IEEE, 2011, S. 5147–5153
- [75] HÖPNER, A.: *Roboter werden extrem gelenkig: Mehr Funktionen*. In: *Handelsblatt* (2011). <http://www.handelsblatt.com/technologie/forschung-medizin/forschung-innovation/mehr-funktionen-roboter-werden-extrem-gelenkig/5808450.html> – Überprüfungsdatum 2013-12-18
- [76] FRANKE, J.; BUSCHHAUS, A.; DOBROSCHKE, A.: Optimierung der Industrieroboter-Geschicklichkeit durch Zwei-Arm-Kinematik, PMD-Sensorüberwachung und aufgabenorientierte Programmierung für die flexibel automatisierte Komplettmontage von Elektromotoren. In: VDI (Hrsg.): *Industrielle Robotik*. Düsseldorf: VDI Wissensforum GmbH, 2011
- [77] KEFERSTEIN, C. P.: *Fertigungsmesstechnik: praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren*. 7. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011 (Fertigung)

- [78] WEINZIERL, R.; KÜHL, A.; FRANKE, J.: *Simulative Auslegung flexibler Fertigungszellen für die robotergestützte Wicklungsmontage in der Elektromotorenfertigung*. Erlangen, 2013. – Projektarbeit
- [79] KÜHL, A.; FRANKE, J.: *Roboterbasierte Wicklungsmontage: Flexible Statormontage unter Anwendung ambidexterer Kinematiken*. In: *wt - Werkstattstechnik online* 103 (2013), Nr. 09
- [80] KÜHL, A.; FRANKE, J.: Robot-Based Assembly of Stators. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of EJDPC 2013*. Piscataway, N.J.: IEEE, 2013
- [81] KÜHL, A.; GÜNTHER, S.; FRANKE, J.: Robot-Based Assembly of Stator-Windings. In: EMCWA (Hrsg.): *EMCW Expo*, 2013
- [82] HEYDER, A.; KÜHL, A.; FRANKE, J.: *Robotergestützte Wicklungsmontage unter Anwendung des Einziehwickelverfahrens*. Erlangen, 2012. – Studienarbeit
- [83] HESSE, S.; KRAHN, H.; EH, D.: *Betriebsmittel Vorrichtung: Grundlagen und kommentierte Beispiele*. 2. Aufl. München: Hanser, 2012
- [84] Röhm GmbH: *Drehfutter Planscheiben: Katalog 2013/2014*. Sontheim, 2013
- [85] SCHULZ, T.; KÜHL, A.; FRANKE, J.: *Entwicklung einer Statoraufnahme zur robotergestützten Wicklungsmontage*. Erlangen, 2012. – Bachelorarbeit
- [86] BREIING, A.; FLEMMING, M.: *Theorie und Methoden des Konstruierens*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1993 (Springer-Lehrbuch)
- [87] TRUMMER, A.; WIEBACH, H.: *Vorrichtungen der Produktionstechnik*. Braunschweig: Vieweg, 1994 (Viewegs Fachbücher der Technik)
- [88] DIN 6885-1:1968-08, *Mitnehmerverbindungen ohne Anzug; Paßfedern, Nuten, hohe Form*
- [89] JUNKER, S.: Prozesse und Technologien für den Elektromaschinenbau. In: FELDMANN, K.; SCHÖPPNER, V.; SPUR, G. (Hrsg.): *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*. 1. Aufl. München: Hanser, 2014 (Edition: Handbuch der Fertigungstechnik), S. 751–769
- [90] GRIMME, T.; KÜHL, A.; FRANKE, J.: *Entwicklung eines Greifers zur robotergestützten Wicklungsmontage unter Anwendung des Träufelverfahrens*. Erlangen, 2012. – Projektarbeit
- [91] VESER, F.: *Vorrichtung zum Einziehen von Spulen in Statoren von Elektromotoren*. Vesper, Franz, 7980 Ravensburg. Anmeldenr. 3812726, Deutschland. 26.10.1989. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE000003812726A1. IPC H02K 15/06

- [92] DIN EN 60317-0-1:2009-02-00, *Technische Lieferbedingungen für bestimmte Typen von Wickeldrähten - Teil 0-1: Allgemeine Anforderungen - Runddrähte aus Kupfer, lackisoliert*
- [93] WEIDAUER, J.: *Elektrische Antriebstechnik*. 3. Aufl. Erlangen: Publicis, 2013
- [94] GEBHARDT, C.: *Konstruktionsbegleitende Berechnung mit ANSYS DesignSpace*. München: Hanser, 2009 (Edition CAD.DE)
- [95] FALTUS, F.; KÜHL, A.; FRANKE, J.: *Entwicklung eines Durchziehgreifers zur robotergestützten Wicklungsmontage unter Anwendung des Träufelverfahrens*. Erlangen, 2013. – Projektarbeit
- [96] GRÜNSTEUDEL, H.; KÜHL, A.; FRANKE, J.: *Montage verteilter Wicklungen mit Hilfe einer ambidexteren Kinematik*. Erlangen, 2014. – Bachelorarbeit
- [97] STONE, G. C.: *Electrical insulation for rotating machines: Design, evaluation, aging, testing, and repair*. New York: IEEE Press, 2004
- [98] SCHINDEL-BIDINELLI, E. H.; GUTHERZ, W.: *Konstruktives Kleben: Ein Lehrgang*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1988
- [99] SCHON, K.: *Stoßspannungs- und Stoßstrommesstechnik: Grundlagen - Messgeräte - Messverfahren*. Berlin: Springer, 2010
- [100] DOMININGHAUS, H. (Hrsg.); ELSNER, P. (Hrsg.); EYERER, P. (Hrsg.); HIRTH, T. (Hrsg.): *Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen*. 7. Aufl. Berlin, New York: Springer, 2008 (VDI-Buch)
- [101] HENNING, F.; DIEMERT, J.; SANDOZ, B.: Polyethylenterephthalat (PET). In: DOMININGHAUS, H.; ELSNER, P.; EYERER, P.; HIRTH, T. (Hrsg.): *Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen*. 7. Aufl. Berlin, New York: Springer, 2008 (VDI-Buch), S. 819–854
- [102] KARWEL, U.; KLOPF, H.; NÖTH, C.; WÖHNER, N.: *Elektrische Maschine mit Deckschiebern*. Siemens AG, 80333 München. Anmeldenr. 102004015243, Deutschland. 20.10.2005. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE102004015243A1. IPC H02K 3/493
- [103] SCHWEIER, J.; KÜHL, A.; FRANKE, J.: *Entwicklung einer Vorrichtung zur robotergestützten Isolation von Wicklungen in elektrischen Antrieben*. Erlangen, 2013. – Masterarbeit
- [104] DIN 8593-0:2003-09, *Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*
- [105] DIN EN 923:2008-06, *Klebstoffe - Benennungen und Definitionen; Deutsche Fassung EN 923:2005+A1:2008*

- [106] HABENICHT, G.: *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. 6., aktualisierte Aufl. Berlin: Springer, 2009
- [107] RASCHE, M. (Hrsg.); KOCH, K.-U. (Mitarb.): *Handbuch Klebtechnik*. München: Hanser, 2012
- [108] ONUSSEIT, H.: *Grundlagen*. Heidelberg: Hüthig, 2008 (Praxiswissen Klebtechnik / Hermann Onusseit (Hrsg.) 1)
- [109] SAEED-AKBARI, A.; ARAGH TALEB, B.; ARNTZ, K.; BAGCIVAN, N., et al.: Hybride Produktionssysteme. In: BRECHER, C. (Hrsg.): *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer (VDI-Buch)*: Springer, 2011, S. 465–745
- [110] KOETTING, G.: *Untersuchung der Klebschichtmorphologie und der beanspruchungsabhängigen Deformations- und Versagensmechanismen in der Klebfuge von Metallklebverbindungen*. Paderborn, Universität, Gesamthochschule. Dissertation:1984
- [111] BROCKMANN, W.; GEIß, P. L.; KLINGEN, J.; SCHRÖDER, B. K.: *Klebtechnik: Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren*. 1. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005
- [112] EHRENSTEIN, G.: *Polymer-Werkstoffe: Struktur; Eigenschaften; Anwendung*. 3. Aufl. München: Hanser, 2011
- [113] HAYNES, W. M. (Hrsg.): *CRC handbook of chemistry and physics: A ready-reference book of chemical and physical data*. 93. ed. Boca Raton Fla.: CRC Press / Taylor & Francis Group, 2012
- [114] MEIER-WESTHUES, U.: *Polyurethane: Lacke, Kleb- und Dichtstoffe*. Hannover: Vincentz Network, 2007 (Technologie des Beschichtens)
- [115] MÜLLER, B.; RATH, W.: *Formulierung von Kleb- und Dichtstoffen*. 2. Aufl. Hannover: Vincentz Network, 2009 (Farbe-und-Lack-Edition)
- [116] DELO Industrie Klebstoffe: *DELO-DUALBOND® AD761: Datenblatt*. http://www.delo.de/fileadmin/datasheet/DELO-DUALBOND_AD761_%28TIDB-D%29.pdf – Überprüfungsdatum 2013-07-13
- [117] DELO Industrie Klebstoffe: *DELO-ML® DB180: Datenblatt*. http://www.delo.de/fileadmin/datasheet/DELO-ML_DB180_%28TIDB-D%29.pdf – Überprüfungsdatum 2013-07-13
- [118] MONTGOMERY, D. C.: *Introduction to statistical quality control*. 7. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2013
- [119] KLEPPMANN, W.: *Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*. 7. Aufl. München: Hanser, 2011 (Praxisreihe Qualitätswissen)

- [120] FRANKE, J.; TREMEL, J.; KÜHL, A.: Innovative developments for automated magnet handling and bonding of rare earth magnets. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings: IEEE ISAM 2011*. Piscataway, N.J: IEEE, 2011, S. 1–5
- [121] VDI 2225:1998-11, *Technisch-wirtschaftliches Konstruieren*
- [122] BROCKMANN, W.; NEEB, T.: *Untersuchung zur Wirkungsweise mechanischer Oberflächenvorbehandlungsverfahren* (14. Internationales Symposium Multifunktionelle Klebeverbindungen - Swissbonding 2000). Rapperswil, 16. - 18.05.2000
- [123] DIN EN ISO 62:2008-05, *Kunststoffe - Bestimmung der Wasseraufnahme (ISO 62:2008); Deutsche Fassung EN ISO 62:2008*
- [124] DIN VDE 0303-4:1969-12, *Bestimmungen für elektrische Prüfungen von Isolierstoffen; Teil 4: Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften*
- [125] DIN EN ISO 527:2012-06, *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO 527-1:2012); Deutsche Fassung EN ISO 527-1:2012*
- [126] DIN EN 14869-2:2011-07, *Strukturklebstoffe - Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen - Teil 2: Scherprüfung für dicke Fügebauteile (ISO 11003-2:2001, modifiziert); Deutsche Fassung EN 14869-2:2011*
- [127] KAISER, W.: *Kunststoffchemie für Ingenieure: Von der Synthese bis zur Anwendung*. 3. Aufl. München: Hanser, 2011
- [128] BUHL, D.; HECKMANN, W.; HESSE, A.; HOFMANN, J.: *Styrolfreie Polyesterharze*. BASF AG, 67063 Ludwigshafen. Anmelde-nr. 4217955, Deutschland. 02.12.1993. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE4217955A1. IPC C08L 23/06
- [129] GOOCH, J. W.: *Encyclopedic dictionary of polymers*. New York: Springer, 2007 (Springer reference)
- [130] DÜRRBECK, F.; KÜHL, A.; FRANKE, J.: *Verguss von Wicklungen mit Hilfe eines Dualarmroboters*. Erlangen, 2013. – Bachelorarbeit
- [131] HABERHAUER, H.; BODENSTEIN, F.: *Maschinenelemente: Gestaltung, Berechnung, Anwendung*. 17. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2014 (Springer-Lehrbuch)
- [132] KÜHL, A.; HÖFT, A.; FRANKE, J.: *Robotergestützte Montage von Elektromotoren: Methoden und Werkzeuge zur Montage von Wicklungen und Deck-schiebern*. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 109 (2014), Nr. 05
- [133] MATEK, W.; MUHS, D.; ROLOFF, H.: *Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung*. 21. Aufl. Braunschweig: Springer Vieweg, 2013

- [134] KOLLMER, J.; KÜHL, A.; FRANKE, J.: *Flexibel automatisierte Montage von Deckschieber in Elektromotorstator*. Erlangen, 2013. – Diplomarbeit
- [135] Vieweg GmbH: *Dosiertechnik: Katalog*.
http://www.dosieren.de/fileadmin/catalog/cat_de_web.pdf – Überprüfungsdatum 2013-07-13
- [136] DELO Industrie Klebstoffe: *Schlauchquetschventil: Betriebsanleitung: Schlauchquetschventil: Betriebsanleitung*. 10/2012
- [137] REITER, M. K.; KÜHL, A.; FRANKE, J.: *Entwicklung eines Greifers zur Fixierung der Wicklungsenden während der robotergestützten Wicklungsmontage*. Erlangen, 2013. – Masterarbeit
- [138] EIGLER, H.; BEYER, W.: *Einführung in die Technologie der Elektrotechnik, Elektronik*. 2. Aufl. Heidelberg: Hüthig, 1986
- [139] DIN EN 60352-2:2006-11, *Lötfreie Verbindungen - Teil 2: Crimpverbindungen - Allgemeine Anforderungen, Prüfverfahren und Anwendungshinweise*
- [140] MATTHES, K.-J. (Hrsg.); RICHTER, E. (Hrsg.): *Schweißtechnik*. 3. Aufl. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2006
- [141] NEHER, M.; KÜHL, A.; FRANKE, J.: *Kontaktierung von Wicklungen mit Hilfe "zweiarmiger Roboter"*. Erlangen, 2013. – Bachelorarbeit
- [142] WATTER, H.: *Hydraulik und Pneumatik: Grundlagen und Übungen - Anwendungen und Simulation*. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008
- [143] DRESCHER, U.: *Linearaktuatoren ersetzen Hydraulik- und Pneumatikzylinder*. In: *Konstruktionspraxis* 22 (2011), Nr. 7.
<http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/themen/antriebstechnik/lineareinheitenn/articles/322319/> – Überprüfungsdatum 2013-12-08
- [144] BERGER, F.; KÜHL, A.; FRANKE, J.: *Wickelkopfformen von Statorwicklungen mit Hilfe "zweiarmiger Roboter"*. Erlangen, 2013. – Bachelorarbeit
- [145] BRAUER, H. J.; KASPER, K. A.; DONCKER, R. W. de: Design and analysis of a pancake switched reluctance machine for use in household applications. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings: PEDS 2009*. Piscataway, N.J: IEEE, 2009, S. 1050–1055
- [146] SAN ANDRES, U.; ALMANDOZ, G.; POZA, J.; ESCALADA, A. J.: Thermal test procedure and analytical model calibration method for electrical machines. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings: WEMDCD 2013*. Piscataway, N.J: IEEE, 2013, S. 95–103
- [147] WERNER, J. Dr.; TAUBER, H.: *Echtzeit-Simulation von elektrischen Maschinen*. In: *HANSER automotive* 9 (2010), Nr. 10, S. 47–49

- [148] RAHIM, N. A.; PING, H. W.; TADJUDDIN, M.: Design of Axial Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor for Direct Drive of Electric Vehicle. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings: PES 2007*. Piscataway, N.J: IEEE Service Center, 2007, S. 1–6
- [149] BLANC, F. S.-L.; RUPRECHT, E.; FLEISCHER, J.: Material based process model for linear noncircular coil winding processes with large wire gauge: Investigation of wire material influences on the winding process and compensation approaches. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings: E|DPC 2013*. Piscataway, N.J: IEEE, 2013
- [150] BICKEL, B.: *Flexible Automatisierung der Wicklungsherstellung durch verschiedene Roboterkinematiken* (Fachseminar Elektromaschinenbau - Aktuelle Entwicklungen in der Wickeltechnik). Nürnberg, 24.04.2013
- [151] CORBAN, M.: *Versionsstände weltweit exakt im Griff*. In: *CAD-CAM-Report 30* (2011), 01/02, S. 22–24. <http://www.plm-it-business.de/edm-pdm/PLM-Technologie---Versionsstaende--weltweit-exakt-im-Griff.htm> – Überprüfungsdatum 2013-12-16
- [152] NÖRDINGER, S.: *Roboter: Mehr Macht dem Anwender*. In: *Produktion 51* (2013), 25-26, S. 1. <http://www.produktion.de/ausgaben-archiv/>
- [153] LIPKOWSKI, S.; SCHERER, M.: *Verbesserung der 3D-Punktgenauigkeit einer PMD-Kamera durch Kombination mit einer 2D-Kamera*. In: *avn - allgemeine vermessungs-nachrichten 120* (2013), Nr. 02
- [154] FELDMANN, K.: Einführung. In: FELDMANN, K.; SCHÖPPNER, V.; SPUR, G. (Hrsg.): *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*. 1. Aufl. München: Hanser, 2014 (Edition: Handbuch der Fertigungstechnik).
- [155] SPUR, G.; HELWIG, H.-J.: Einführung in die Montagetechnik. In: SPUR, G.; STÖFERLE, T. (Hrsg.): *Handbuch der Fertigungstechnik: Band 5: Fügen, Handhaben, Montieren*. München: Hanser, 1986, S. 591–606
- [156] MÄRZ, R. H. B.: *Methodik zur prozessorientierten Generierung und Bewertung standortgerechter Fertigungssysteme*. 1. Aufl. Aachen: Shaker, 2011 (Innovation Fertigungstechnik)
- [157] VOIGT, K.-I.: *Gabler Wirtschaftslexikon: Stichwort: manuelle Produktion*. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/57114/manuelle-produktion-v4.html>. – Aktualisierungsdatum: 07.11.203
- [158] VOIGT, K.-I.: *Gabler Wirtschaftslexikon: Stichwort: teilautomatisierte Produktion*. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/57116/teilautomatisierte-produktion-v5.html>. – Aktualisierungsdatum: 07.11.203
- [159] ZANGEMEISTER, C.: *Erweiterte Wirtschaftlichkeitsanalyse (EWA): Grundlagen, Leitfaden und PC-gestützte Arbeitshilfen für ein "3-Stufen-Verfahren" zur*

- Arbeitssystembewertung*. 2. Aufl. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 2000 (Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin Forschung , Fb 879)
- [160] LOTTER, B.: Einführung. In: LOTTER, B.; WIENDAHL, H.-P. (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006 (VDI), S. 1–10
- [161] MAIHÖFNER, K.; KÜHL, A.; FRANKE, J.: *Analyse der Einzelprozessschritte der Statorenmontage*. Erlangen, 2013. – Projektarbeit
- [162] WIENDAHL, H.-P.; HEGENSCHIEDT, M.: Verfügbarkeit von Montagesystemen. In: LOTTER, B.; WIENDAHL, H.-P. (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006 (VDI), S. 369–406
- [163] CARSTENSEN, P.: *Investitionsrechnung kompakt*. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2008 (Lehrbuch)
- [164] BAUER, F.: *Prozeßorientierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von CA-Technologien*. Frankfurt am Main: Lang, 1995 (Europäische Hochschulschriften, Reihe V, Volks- und Betriebswirtschaft 1813)
- [165] FREUDENBERG, R.; HERPER, H.: Simulation von Personal in Fertigungssystemen mit flexiblen Arbeitsstrukturen. In: ENGELI, M.; HRDLICZKA, V. (Hrsg.): *12. Symposium Simulationstechnik: Tagungsband*. Zürich: Vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 1998 (Fortschritte in der Simulationstechnik).
- [166] POGGENSEE, K.: *Investitionsrechnung*. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2011 (Lehrbuch)
- [167] REICHWALD, R.; HÖFER, C.; WEICHELBAUMER, J. S.: *Erfolg von Reorganisationsprozessen*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1996 (Controlling : Anwendungen)
- [168] DIETZ, M.; KÜHL, A.; FRANKE, J.: *Simulative Auslegung flexibler Fertigungssysteme für die Elektromotorenmontage*. Erlangen, 2013. – Projektarbeit
- [169] DIN EN ISO 9001:2008-12, *Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen (ISO 9001:2008)*
- [170] KELLER, H.: *Qualitätsprobleme in der Statorenmontage*. Interview:16.07.2013. KÜHL, A.; MAIHÖFNER, K. (Adressat)
- [171] VDI 3633:2000-12, *Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen – Grundlagen*

- [172] LAW, A. M.; KELTON, W. D.: *Simulation modeling and analysis*. 3. ed. Boston: McGraw-Hill, 2000 (McGraw-Hill series in industrial engineering und management science)
- [173] SHANNON, R. E.: *Systems simulation*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall, 1975
- [174] BANKS, J.; CARSON, J. S.: *Discrete-event system simulation*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall, 1984 (Prentice-Hall international series in industrial and systems engineering)
- [175] *Tecnomatix Plant Simulation: Simulation, Visualisierung, Analyse und Optimierung von Produktions- und Logistikprozessen*. Köln, 2008

Reihe Fertigungstechnik - Erlangen

www.mb.uni-erlangen.de/diss

Band 1 - 52
Carl Hanser Verlag, München

ab Band 53
Meisenbach Verlag, Bamberg
45,-- Euro

Band 1: Andreas Hemberger
Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissenschaftliche Systeme
208 Seiten, 107 Bilder. 1988.

Band 2: Detlef Classe
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
194 Seiten, 70 Bilder. 1988.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting
Projektierung von Montagesystemen
201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Band 4: Karsten Schlüter
Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
177 Seiten, 97 Bilder. 1989.

Band 5: Shir-Kuan Lin
Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
168 Seiten, 46 Bilder. 1989.

Band 6: Rudolf Nuss
Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989.

Band 7: Wolfgang Scholz
Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen
194 Seiten, 89 Bilder. 1989.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989.

Band 9: Rainer Eisele
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion
183 Seiten, 86 Bilder. 1990.

Band 10: Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990.

Band 11: Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
201 Seiten, 82 Bilder. 1990.

- Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
- Band 13: Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990.
- Band 14: Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991.
- Band 15: Uwe Geißler
Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991.
- Band 16: Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
- Band 17: Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991.
- Band 18: Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
- Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991.
- Band 20: Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikuß mit Industrierobotern
XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991.
- Band 21: Egon Sommer
Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen
188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
- Band 22: Georg Geyer
Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage
192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
- Band 23: Rainer Flohr
Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)
186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
- Band 24: Alfons Rief
Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung
VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991.
- Band 25: Christoph Thim
Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation
188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
- Band 26: Roland Müller
CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992.
- Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
195 Seiten, 76 Bilder. 1992.

- Band 28: Martin Hoffmann
Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
- Band 29: Peter Hoffmann
**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen :
Prozessführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung
von Blechformteilen**
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992.
- Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
- Band 31: Hubert Reinisch
**Planungs- und Steuerungswerkzeuge
zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen**
XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
- Band 32: Brigitte Bärnreuther
**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens
von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**
XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
- Band 33: Joachim Hutfless
**Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage**
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993.
- Band 34: Uwe Günzel
**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative
und strategische Probleme der Produktionsplanung und –steuerung**
XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993.
- Band 35: Bertram Ehmann
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung
auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**
XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
- Band 36: Harald Kolléra
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems
für das Laserstrahlschneiden**
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993.
- Band 37: Stephanie Abels
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen
in einem integrierten Simulationssystem**
188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
- Band 38: Robert Schmidt-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993.
- Band 39: Norbert Lutz
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe
mit XeCl-Excimerlaserstrahlung**
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994.
- Band 40: Konrad Grampp
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung
an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien**
178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
- Band 41: Martin Koch
**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung
in der Investitionsgüterindustrie**
169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
- Band 42: Armin Gropp
**Anlagen- und Prozessdiagnostik
beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser**
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995.

- Band 43: Werner Heckel
Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren
149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995.
- Band 44: Armin Rothhaupt
Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung
180 Seiten, 101 Bilder. 1995.
- Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995.
- Band 46: Bodo Vormann
Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile
126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995.
- Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
144 Seiten, 75 Bilder. 1995.
- Band 48: Rainer Klotzbücher
Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen
156 Seiten, 62 Bilder. 1995.
- Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
144 Seiten, 96 Bilder. 1995.
- Band 50: Jörg Franke
Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)
196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995.
- Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995.
- Band 52: Michael Solvie
Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996.
- Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996.
ISBN 3-87525-070-2
- Band 54: Thomas Rebhan
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern – Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen
148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-075-3
- Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik
157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-074-5
- Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern
188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-076-1
- Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-079-6

Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim 3D–Laserstrahlschweißen von Blechformteilen
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-080-X

Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer CA–Anwendungen über einem STEP–Produktmodell
198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-081-8

Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-082-6

Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)
182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7

Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-083-4

Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt– und Prozeßplanung
190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2

Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-086-9

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997.
ISBN 3-87525-089-3

Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC–Steuerungen zur Prozeß– und Programmoptimierung
168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5

Band 67: Klaus–Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs– und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln
186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D–Laserstrahlbearbeitung
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-093-1

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-094-X

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-095-8

- Band 71: Michael Steber
**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen
in der automatisierten Montage**
168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-096-6
- Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik
162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-097-4
- Band 73: Volker Franke
**Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung**
143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2
- Band 74: Herbert Scheller
**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**
184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-099-0
- Band 75: Arthur Meißner
**Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile
– Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung**
164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-100-8
- Band 76: Mathias Glasmacher
Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen
184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-101-6
- Band 77: Michael Schwind
**Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften
von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren**
124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-102-4
- Band 78: Manfred Gerhard
**Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung
der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen**
179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-103-2
- Band 79: Elke Rauh
**Methodische Einbindung der Simulation
in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe**
192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-104-0
- Band 80: Sorin Niederkorn
**Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung
bei umformtechnischen Prozessen**
99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-105-9
- Band 81: Stefan Schubert
**Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern
unter Einsatz von adaptiven Optiken**
140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-106-7
- Band 82: Armando Walter Colombo
**Development and Implementation of Hierarchical Control Structures
of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets**
216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1
- Band 83: Otto Meedt
**Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling
durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung**
186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3

Band 84: Knuth Götz

**Modelle und effiziente Modellbildung
zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion**
212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-112-1

Band 85: Ralf Luchs

**Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe
zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT**
176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-113-7

Band 86: Frank Pöhlau

**Entscheidungsgrundlagen zur Einführung
räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**
144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8

Band 87: Roland T. A. Kals

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-115-6

Band 88: Gerhard Luhn

**Implizites Wissen und technisches Handeln
am Beispiel der Elektronikproduktion**
252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1999.
ISBN 3-87525-116-4

Band 89: Axel Sprenger

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-117-2

Band 90: Hans-Jörg Pucher

**Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken
und Laserstrahllöten von Mikrokontakten**
158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-119-9

Band 91: Horst Arnet

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-120-2

Band 92: Doris Schubart

**Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung
beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung**
133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-122-9

Band 93: Adrianus L. P. Coremans

**Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung,
Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper**
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-124-5

Band 94: Hans-Martin Biehler

**Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung
und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung**
194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1

Band 95: Wolfgang Becker

**Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften
excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken**
175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-127-X

Band 96: Philipp Hein

**Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren:
Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung**
129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-128-8

Band 97: Gunter Beitinger

**Herstellungs- und Prüfverfahren
für thermoplastische Schaltungsträger**
169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-129-6

Band 98: Jürgen Knoblach

**Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von
Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden**
155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-130-X

Band 99: Frank Breitenbach

**Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie
elektronischer SMT-Bauelemente**
147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-131-8

Band 100: Bernd Falk

**Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage
für Werkzeuge der Kaltmassivumformung**
134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-136-9

Band 101: Wolfgang Schlögl

**Integriertes Simulationsdaten-Management
für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung**
169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-137-7

Band 102: Christian Hinsel

**Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter
Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung**
130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-138-5

Band 103: Stefan Bobbert

**Simulationsgestützte Prozessauslegung
für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren**
123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8

Band 104: Harald Rottbauer

**Modulares Planungswerkzeug
zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion**
166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3

Band 105: Thomas Hennige

Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7

Band 106: Thomas Menzel

**Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse**
152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3

Band 107: Thomas Stöckel

**Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene
in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks**
147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-143-1

Band 108: Frank Pitter

**Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen
durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen**
158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-144-X

Band 109: Markus Korneli

**Integration lokaler CAP-Systeme
in einen globalen Fertigungsdatenverbund**
121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-146-6

- Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern – Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tabellen. 2001
ISBN 3-87525-159-8
- Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-147-4
- Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-151-2
- Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-152-0
- Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-153-9
- Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-157-1
- Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-156-3
- Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-164-4
- Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-165-2
- Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-166-0
- Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-175-X
- Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-183-0
- Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-181-4

Band 123: Mark Geisel

Prozeßkontrolle und –steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik
135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-180-6

Band 124: Gerd Eßer

Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik
148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-171-7

Band 125: Marc Fleckenstein

Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte
159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-170-9

Band 126: Stefan Kaufmann

Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik
159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-172-5

Band 127: Thomas Fröhlich

Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung
143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-186-5

Band 128: Achim Hofmann

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen
113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tabellen
ISBN 3-87525-182-2

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik
129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-169-5

Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen
133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tabellen. 2002
ISBN 3-87525-173-3

Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern
167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tabelle. 2002.
ISBN 3-87525-174-1

Band 132: Matthias Negendanck

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen
116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tabellen
ISBN 3-87525-184-9

Band 133: Oliver Kreis

**Integrierte Fertigung –
Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation**
167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tabellen
ISBN 3-87525-176-8

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten
179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-177-6

Band 135: Roland Meier

**Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher
spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**
155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-178-4

Band 136: Jürgen Wunderlich

**Kostensimulation – Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung
komplexer Produktionssysteme**
202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-179-2

Band 137: Stefan Novotny

**Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und
Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur**
132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-185-7

Band 138: Andreas Licha

**Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter
Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter**
158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-189-X

Band 139: Michael Eisenbarth

**Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik
für mechatronische Baugruppen**
207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-190-3

Band 140: Frank Christoph

**Durchgängige simulationsgestützte Planung von
Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion**
187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-191-1

Band 141: Hinnerk Hagenah

**Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden
Maßhaltigkeit für das Blechbiegen**
131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-192-X

Band 142: Ralf Eckstein

**Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile –
Materialeinfluss und Materialverhalten**
148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-193-8

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

**Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien
mit homogener Lichtlinie**
138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-196-2

Band 144: Andreas Kach

**Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen
an Bauteilabweichungen**
139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-197-0

Band 145: Stefan Hierl

**System- und Prozeßtechnik für das simultane Löten mit
Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen**
124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-198-9

Band 146: Thomas Neudecker

**Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge-
Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung**
166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-200-4

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze
132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-203-9

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz
188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-204-7

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren – Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik
122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-206-3

Band 150: Martino Celeghini

Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie
146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-207-1

Band 151: Ralph Hohenstein

Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung
282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-210-1

Band 152: Angelika Hutterer

Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse
149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-212-8

Band 153: Emil Egerer

Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur
158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-213-6

Band 154: Rüdiger Holzmann

Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen
186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-217-9

Band 155: Marco Nock

Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen
Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-218-7

Band 156: Frank Niebling

Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlintern metallischer Bauteile
148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-219-5

Band 157: Markus Meiler

Großserientauglichkeit trockenschmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk
Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche
104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-221-7

Band 158: Agus Sutanto

**Solution Approaches for Planning of Assembly Systems
in Three-Dimensional Virtual Environments**

169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-220-9

Band 159: Matthias Boiger

**Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen
auf der Basis flexibler Schaltungsträger**

175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-222-5

Band 160: Matthias Pitz

Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle

120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-223-3

Band 161: Meik Vahl

**Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses
beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen**

165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-224-1

Band 162: Peter K. Kraus

**Plattformstrategien – Realisierung einer varianz- und
kostenoptimierten Wertschöpfung**

181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-226-8

Band 163: Adrienn Cser

Laserstrahlschmelzabtrag – Prozessanalyse und -modellierung

146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-227-6

Band 164: Markus C. Hahn

**Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von
Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern**

143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-228-4

Band 165: Gordana Michos

Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen

146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-230-6

Band 166: Markus Stark

Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays

158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-231-4

Band 167: Yurong Zhou

**Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen
Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion**

156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-232-2

Band 168: Werner Enser

**Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer
Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen**

190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-233-0

Band 169: Katrin Melzer

**Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen
Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle**

155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-234-9

Band 170: Alexander Putz

**Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von
armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall**

137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-237-3

Band 171: Martin Prechtl

Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien – System- und Prozesstechnik

154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-238-1

Band 172: Markus Meidert

Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung

131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-239-X

Band 173: Bernd Müller

Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile

147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-240-3

Band 174: Alexander Hofmann

Hybrides Laserdurchstrahlsschweißen von Kunststoffen

136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-243-9
ISBN 3-87525-243-8

Band 175: Peter Wöflück

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen

177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0
ISBN 3-87525-246-2

Band 176: Attila Komlódi

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods

155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-248-4
ISBN 3-87525-248-9

Band 177: Uwe Popp

Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen

140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-249-1
ISBN 3-87525-249-7

Band 178: Veit Rückel

Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter

148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-250-7
ISBN 3-87525-250-0

Band 179: Manfred Dirscherl

Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse

154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tabellen. 2007.
ISBN 978-3-87525-251-4
ISBN 3-87525-251-9

Band 180: Yong Zhuo

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)

181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tabellen. 2007.
ISBN 978-3-87525-253-8

Band 181: Stefan Lang

Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion

172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-257-6

Band 182: Hans-Joachim Krauß

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere

171 Seiten, 100 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-258-3

Band 183: Stefan Junker
Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten
173 Seiten, 75 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-259-0

Band 184: Rainer Kohlbauer
Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse
135 Seiten, 50 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-260-6

Band 185: Klaus Lamprecht
Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge
137 Seiten, 81 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-265-1

Band 186: Bernd Zolleiß
Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen
180 Seiten, 117 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-266-8

Band 187: Michael Kerausch
Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten
146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tabellen. 2007.
ISBN 978-3-87525-267-5

Band 188: Matthias Weber
Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tabellen. 2007.
ISBN 978-3-87525-269-9

Band 189: Thomas Frick
Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen
104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tabellen. 2007.
ISBN 978-3-87525-268-2

Band 190: Joachim Hecht
Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen
107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tabellen. 2007.
ISBN 978-3-87525-270-5

Band 191: Ralf Völkl
Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung
178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tabellen. 2008.
ISBN 978-3-87525-272-9

Band 192: Massimo Tolazzi
Innenhochdruck-Umformen verstärkter Blech-Rahmenstrukturen
164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tabellen. 2008.
ISBN 978-3-87525-273-6

Band 193: Cornelia Hoff
Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5
133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tabellen. 2008.
ISBN 978-3-87525-275-0

Band 194: Christian Alvarez
Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Lötprozessen in der Elektronikproduktion
149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tabellen. 2008.
ISBN 978-3-87525-277-4

Band 195: Andreas Kunze
Automatisierte Montage von makromechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetze
160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tabellen. 2008.
ISBN 978-3-87525-278-1

Band 196: Wolfgang Hußnätter
Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen
152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsetzgerechten elektronischen Baugruppen
175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-280-4

Band 198: Stephan Roth
Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen
113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-281-1

Band 199: Artur Giera
Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreißschweißen metallischer Werkstoffe
179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-282-8

Band 200: Jürgen Lechler
Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-286-6

Band 201: Andreas Blankl
Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlflügeoperationen
120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-287-3

Band 202: Andreas Schaller
Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte
120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-289-7

Band 203: Claudius Schimpf
Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion
162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3

Band 204: Simon Dietrich
Sensoren zur Schwerpunktlagebestimmung der optischen Prozessemissionen beim Laserstrahl-tiefschweißen
138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-292-7

Band 205: Wolfgang Wolf
Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld
167 Seiten, 98 Bilder, 2009.
ISBN 978-3-87525-293-4

Band 206: Steffen Polster
Laserdurchstrahl-schweißen transparenter Polymerbauteile
160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1

Band 207: Stephan Manuel Dörfler

Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen
190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-295-8

Band 208: Uwe Vogt

Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks
151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-296-5

Band 209: Till Laumann

Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen
117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-299-6

Band 210: Alexander Diehl

Größeneffekte bei Biegeprozessen- Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung
180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-302-3

Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche
164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-303-0

Band 212: Jens Ackermann

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe
129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-305-4

Band 213: Stephan Weidel

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten
144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-307-8

Band 214: Stefan Geißdörfer

Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation
133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-308-5

Band 215: Christian Matzner

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil
165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-309-2

Band 216: Florian Schüßler

Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-310-8

Band 217: Massimo Cojutti

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-312-2

Band 218: Raoul Plettke

Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-315-3

Band 219: Andreas Dobroschke

Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte

184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-317-7

Band 220: Azhar Zam

Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery

99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-318-4

Band 221: Michael Rösch

Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion

192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-319-1

Band 222: Thomas Rechtenwald

Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff- prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK

150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-320-7

Band 223: Daniel Craiovan

Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern

165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-324-5

Band 224: Kay Wagner

Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen

147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-325-2

Band 225: Martin Brandhuber

Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten

155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-327-6

Band 226: Peter Sebastian Feuser

Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften: Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung

195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-328-3

Band 227: Murat Arbak

Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics

109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-330-6

Band 228: Indra Pitz

Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen

137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-333-7

Band 229: Alexander Grimm

Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik

125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-334-4

Band 230: Markus Kaupper

Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit

160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-339-9

Band 231: Thomas Kroiß

Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenaufforderung

169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-341-2

Band 232: Christian Goth

Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)

176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-340-5

Band 233: Christian Ziegler

Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie

170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-342-9

Band 234: Florian Albert

Automatisiertes Laserstrahllöten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen

127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-344-3

Band 235: Thomas Stöhr

Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen

118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tabellen 2013
ISBN 978-3-87525-346-7

Band 236: Christian Kägeler

Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß

145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tabellen 2013
ISBN 978-3-87525-347-4

Band 237: Andreas Sulzberger

Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen

153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tabellen 2013
ISBN 978-3-87525-349-8

Band 238: Simon Opel

Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung

163 Seiten, 108 Bilder, 207 Tabellen 2013
ISBN 978-3-87525-350-4

Band 239: Rajesh Kanawade

In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development

124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tabellen 2013
ISBN 978-3-87525-351-1

Band 240: Stephan Busse

Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens

119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tabellen 2013
ISBN 978-3-87525-352-8

Band 241: Karl-Heinz Leitz

Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung

154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tabellen 2013
ISBN 978-3-87525-355-9

Band 242: Markus Michl

Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose

182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tabellen 2013
ISBN 978-3-87525-356-6

Band 243: Vera Sturm

Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen

113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tabellen
ISBN 978-3-87525-357-3

Band 244: Christian Neudel

Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau

178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tabellen
ISBN 978-3-87525-358-0

Band 245: Anja Neumann

Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk

162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tabellen

ISBN 978-3-87525-360-3

Band 246: Ulf-Hermann Quentin

Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen

137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tabellen

ISBN 978-3-87525-361-0

Band 247: Erik Lamprecht

Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen

148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tabellen

ISBN 978-3-87525-362-7

Band 248: Sebastian Rösel

Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium

148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tabellen

ISBN 978-3-87525-363-4

Band 249: Paul Hippchen

Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung

163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tabellen

ISBN 978-3-87525-364-1

Band 250: Martin Zubeil

Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren

171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tabellen

ISBN 978-3-87525-365-8

Band 251: Alexander Kühl

Flexible Automatisierung der Statorenmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik

142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tabellen 2014

ISBN 978-3-87525-367-2