



Mathias Aigner, BSc

Integrierte Produktionsplanung der Statormontage von Hairpin-Statoren

Masterarbeit

zur Erreichung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau

Schwerpunkt: Fahrzeugtechnik- und Sicherheit

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn., Franz Haas

Dipl.-Ing. Mathias Prechtel, BSc

Institut für Fertigungstechnik



Graz, September 2021

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

.....
Datum

.....
Aigner Mathias, BSc

Danksagung

Zu Beginn dieser Ausarbeitung möchte ich mich beim gesamten Umfeld meiner Masterarbeit für die Unterstützung herzlich bedanken. Dazu zählt in erster Linie mein Arbeitgeber, die Miba Automation Systems GmbH, welche mir dieses spannende Thema mit besonders starkem Praxisbezug ermöglicht hat. Hierbei gebührt der Dank dem gesamten eMobility Entwicklungsteam für die hilfreichen Diskussionen und für die aufgewendete Zeit zum Beantworten all meiner Fragestellungen.

Einen ganz besonderen Dank möchte ich meinem Betreuer im Unternehmen, Dipl.-Ing. Mladen-Mateo Primorac, aussprechen. Bereits ab dem Zeitpunkt der Abstimmungsphase bis hin zur Abgabe der schriftlichen Ausarbeitung konnte ich auf eine unermüdliche Unterstützung in allen Belangen bauen. Nicht nur durch die hervorragende fachliche Expertise, sondern auch durch Deine inspirierende menschliche Art konnte ich mich in dieser Zeit enorm weiterentwickeln.

Darüber hinaus gebührt mein Dank ebenso meinen Betreuern seitens der TU Graz, Herrn Dipl.-Ing. Mathias Prechtl und Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Haas, die zum Gelingen dieser Arbeit maßgeblich beigetragen haben.

Der größte Dank gilt schlussendlich meiner Familie und ganz besonders meiner Partnerin Theresa, die mich während meines Studiums mit großem Verständnis unterstützte und mir auch in dieser abschließenden Phase zu jedem Zeitpunkt den Rücken gestärkt hat.

Aurachkirchen, August 2021

Mathias Aigner

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der integrierten Produktionsplanung der Statormontage von Hairpin-Statoren für eine vollautomatisierte Serienproduktion. Die neuartige Wickeltechnologie mittels rechteckigen Kupferformstäben, die zu sogenannten Hairpins gebogen werden, bedingt eine Neuentwicklung des Produktionsprozesses.

Zu Beginn wird der Entwicklungsprozess von Hairpin-Statoren analysiert und ein Prozessmodell entworfen, welches die gesamte Produkt- und Produktionsanlagenentwicklung bis zum Serienanlauf mit gemeinsamen Meilensteinen verknüpft. Anschließend wird eine Analyse des gesamten Montageprozesses vorgenommen und für jeden Prozessschritt der Statorenfertigung mögliche Fertigungskonzepte zusammengefasst. Anhand definierter Bewertungskriterien werden die bestmöglichen Konzepte für jeden Montageschritt durch Anwendung von Nutzwertanalysen dargelegt. Bei kritischen Prozessschritten werden zusätzlich im Sinne einer integrierten Produktionsplanung Kosten- und Fehleranalysen durchgeführt.

Im letzten Kapitel wird der gesamte Montageprozess in eine diskrete Eventsimulation durch Verwendung der Software Siemens Plant Simulation 16 übergeführt. Das Ziel ist die Absicherung der Produktionsanlagenentwicklung hinsichtlich Ausbringungsmenge und Taktzeit in einem dynamischen Simulationsmodell in der frühen Entwicklungsphase. Durch den parametrischen Aufbau des Modells wird die Basis für die Simulation von beliebigen Produktkonfigurationen des Stators gelegt. Die Simulation legt außerdem die Abhängigkeit des Produktdesigns des Hairpin-Stators auf die Produktionsanlage dar.

Zusammenfassend wird mit dieser Arbeit eine Entscheidungsgrundlage für die vollautomatisierte Statorproduktion von Hairpin-Statoren in Form von Konzeptanalysen und einer Montagesimulation gegeben. Daraus lassen sich mögliche Probleme in der Produktion frühzeitig ableiten und die Qualität und Produktivität des Fertigungsprozesses verbessern.

Abstract

This paper deals with the integrated production planning of stator assembly of hairpin stators for fully automated series production. The novel winding technology using rectangular copper cross-sections bent into so-called hairpins, requires a new development of the production process.

At the beginning, the development process of hairpin stators is analyzed and a process model is designed, which links the entire product and production line development up to the start of series production with common milestones. This is followed by an analysis of the entire assembly process and a summary of possible manufacturing concepts for each process step in stator production. Based on defined evaluation criteria, the best possible concepts for each assembly step are presented by applying utility value analyses. For critical process steps, cost and failure analyses are also performed in the sense of integrated production planning.

In the last chapter the whole assembly process is transferred into a discrete event simulation by using the software Siemens Plant Simulation 16. The goal is to secure the production plant development regarding to output quantity and cycle time in a dynamic simulation model in the early development phase. The parametric structure of the model provides the basis for the simulation of any product configuration of the stator. The simulation also presents the dependence of the product design of the hairpin stator on the production line.

To sum up, this work provides a decision-making basis for fully automated stator production in the form of concept analyses and an assembly simulation. From this, possible issues in the production process can be derived at an early stage and the quality and productivity of the manufacturing process can be improved.

Abkürzungsverzeichnis

AT	Arbeitstage
ASM	Asynchronmaschine
BEV	Battery Electric Vehicle (dt. Batterieelektrisches Fahrzeug)
CAD	Computer-Aided Design (dt. Computergestützte Konstruktion)
CPS	Conductors Per Slot (dt. Leiter pro Nut)
E-PTWs	E-Powered Two Wheelers (dt. Zweirad mit Elektroantrieb)
FESM	Fremderregte Synchronmaschine
LWIR	Long Wave Infrared Radiation (dt. Langwellige Infrarotstrahlung)
MAS	Miba Automation Systems
MTTR	Mean Time to Repair (dt. Mittlere Reparaturdauer)
OEE	Overall Equipment Effectiveness (dt. Gesamtanlageneffektivität)
OEM	Original Equipment Manufacturer (dt. Originalhersteller)
PKW	Personenkraftwagen
PAI	Polyamidimid
PEEK	Polyetheretherketon
PEP	Produktentwicklungsprozess
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle (dt. Plug-In Hybrid Elektrisches Fahrzeug)
PLM	Product Lifecycle Management (dt. Produktlebenszyklus-Management)
PMSM	Permanentmagneterregte Synchronmaschine
R&D	Research and Development (dt. Forschung und Entwicklung)
SOP	Start of Production (dt. Produktionsbeginn)
SWIR	Short Wave Infrared Radiation (dt. Kurzwellige Infrarotstrahlung)
TTM	Time to Market (dt. Entwicklungszeit bis zur Markteinführung)
VDA	Verband der Automobilindustrie

VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VW	Volkswagen
V&V	Verifikation und Validierung
36/4	Stator mit 36 Nuten und vier Leitern pro Nut
48/6	Stator mit 48 Nuten und sechs Leitern pro Nut
54/8	Stator mit 54 Nuten und acht Leitern pro Nut
72/8	Stator mit 72 Nuten und acht Leitern pro Nut

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	II
Danksagung	III
Kurzfassung	IV
Abstract	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einführung	1
1.1 Ausgangssituation.....	2
1.2 Zielsetzung und Herangehensweise	2
2 Theoretische Grundlagen	4
2.1 Der Hairpin-Stator.....	4
2.2 Optimierungspotentiale der Formstabwicklung.....	8
2.3 Begriffsdefinitionen am Hairpin-Stator	11
2.3.1 Allgemeine Begriffe am Stator	11
2.3.2 Begriffe aus der Formstabtechnologie	12
3 Der Entwicklungsprozess des Hairpin-Stators im Unternehmen.....	14
3.1 Roadmap der Hairpin-Stator Entwicklung	14
3.2 Einordnung in der Automobilindustrie	15
3.3 Die Produktentwicklung des Hairpin-Stators.....	17
3.3.1 Simultaneous-Engineering Ansatz	17
3.3.2 Aufbau des Prozessmodells zur Hairpin-Stator Entwicklung	20
4 Analyse der Konzepte im Montageprozess.....	29
4.1 Methodik in der Analysephase	29
4.1.1 SIPOC-Analyse.....	30

4.1.2	Nutzwertanalyse	31
4.1.3	Kostenanalyse.....	33
4.1.4	Definition Stückzahl Szenarien.....	34
4.1.5	Definition Produktionszeiten	35
4.1.6	Produktsegmentierung.....	36
4.2	Gesamtübersicht über den Montageprozess.....	37
4.2.1	Abhängigkeiten zwischen den Prozessschritten.....	39
4.2.2	Identifikation kritischer Prozessschritte	41
4.3	Pin vorbereiten.....	42
4.3.1	Analyse des Ausgangsmaterials Kupferlackdraht	42
4.3.2	Kupferdraht abrollen	44
4.3.3	Kupferdraht richten.....	44
4.3.4	Kupferdraht ablängen.....	45
4.3.5	Kupferdraht abisolieren.....	47
4.4	Pin biegen.....	63
4.4.1	Konzeptauswahl Pin biegen.....	65
4.4.2	Fehleranalyse des Biegeprozesses	66
4.5	Statornuten isolieren	68
4.6	Hairpinlagen einsetzen	69
4.7	Drahtenden twisten.....	69
4.7.1	Konzeptauswahl Drahtenden twisten.....	72
4.8	Drahtenden reinigen	74
4.9	Drahtenden kontaktieren.....	74
4.9.1	Kalibrieren der Pin-Enden.....	74
4.9.2	Verschweißen der Pin-Enden.....	75
5	Simulation des Montageprozesses.....	82
5.1	Einführung in die Ablaufsimulation in der Produktion.....	82
5.2	Grundlagen der Simulationsmethode.....	83

5.3	Vorgehensweise einer Simulationsstudie	84
5.4	Simulationsmodelle Hairpin-Stator Montage.....	86
5.4.1	Simulationsmodell reale Kundenanlage	86
5.4.2	Simulationsmodell Kleinserienanlage	88
5.4.3	Simulationsmodell Großserienanlage	100
6	Conclusio	103
6.1	Zusammenfassung.....	103
6.2	Ausblick.....	105
7	Abbildungsverzeichnis	107
8	Tabellenverzeichnis	111
9	Literatur.....	112
10	Anhang.....	117

1 Einführung

Die Regulierung der Emissionen des Verkehrs durch den Gesetzgeber wurde in den letzten Jahren beschleunigt vorangetrieben, um die umweltschädlichen Auswirkungen zu verringern. In den wichtigsten Industrienationen der Welt (China, Europa, USA) wurden speziell die Grenzwerte von Kohlenstoffdioxid (CO₂) in immer kleiner werdenden zeitlichen Abständen gesenkt.

Europa führt den Weg der Emissionsregulierung an und plant den aktuell gültigen CO₂-Grenzwert des Gesamtflottenverbrauches eines Automobilherstellers erneut von 95 g/km bis 2030 um 37,5% auf 59 g/km zu reduzieren. Diese gesetzliche Regelung, sowie bereits beschlossene Verkaufsverbote einzelner Länder für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (Norwegen ab 2025, Dänemark ab 2030, Kanada und Großbritannien ab 2040, etc.), zwingen die Autohersteller (Abk. OEMs) ihre Antriebstechnologien zu dekarbonisieren, um empfindlichen Strafzahlungen und Marktverlusten zu entgehen. Aus diesen Gründen wird aktuell großteils auf batterieelektrische Fahrzeuge (Abk. BEV) und Plug-In Hybrid Elektrische Fahrzeuge (Abk. PHEV) gesetzt.¹

Die Prognosen für Szenarien der PKW-Neuzulassungen im Jahre 2030 reichen von 15% bis 28% für vollelektrische Fahrzeuge, 35% bis 51% für Mild- bzw. Vollhybrid und 14% für Plug-in Hybrid Fahrzeuge. Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass in mindestens 60% aller Fahrzeuge im Jahr 2030 ein elektrischer Antrieb verbaut sein wird.² Durch diese beschriebene Beschleunigung der Elektromobilität wird in den nächsten Jahren ein bedeutender Markt entstehen, den etablierte oder neue Unternehmen der Automobilindustrie bedienen. Die erwarteten hohen Stückzahlen des Elektromotors erfordern eine starke Prozessstabilität in der hochvolumigen Serienproduktion (>100.000 Stück pro Jahr) sowie das Streben nach Wirkungsgrad- und Effizienzsteigerungen des Elektroantriebes. Für diese Bestrebungen wird seit einigen Jahren im Stator der Elektromaschine auf eine innovative, neuartige Wicklung mittels rechteckigen Kupferformstäben gesetzt. Diese Art des Stators wird auch Hairpin-Stator genannt.

¹ Vgl. Cornet/Hensley/Hirschberg/Schaufluss/Tschiesner/Venus/Werra (2019), Onlinequelle: [08.06.2021].

² Vgl. Fleischer/Hausmann/Halwas/Hofmann/Wirth/Wößner (2020), S. 3, Onlinequelle: [02.07.2021].

Die Miba Automation Systems GmbH, in weiterer Folge abgekürzt mit MAS, ist eine Division der Miba AG mit ungefähr 70 MitarbeiterInnen und einem jährlichen Umsatz von 20 Millionen Euro. Das Geschäftsfeld liegt im klassischen Sondermaschinenbau mit der Planung und Konstruktion von Anlagen für unterschiedliche Industrien. Seit 2014 werden Anlagen zur Fertigung von Statoren mit dieser neuartigen Formstabwicklung für die Automobilindustrie entwickelt, womit der eigene Geschäftsbereich „eMobility“ in der MAS gegründet wurde.

1.1 Ausgangssituation

Die Miba Group tritt in ihren Divisionen als Lieferant von Komponenten für den Verbrennungsmotor sowie dem Antriebsstrang auf. Aufgrund der beschriebenen Transformation der Antriebstechnologien zukünftiger Fahrzeuge wird im Unternehmen aktiv nach neuen Produkten für diese Technologien geforscht um weiterhin als Lieferant hochwertiger Bauteile von Fahrzeugen der nächsten Generation auftreten zu können. Im Bereich der Statoren mit Formstabtechnologie wurden dafür produktseitig Patente des Wickelschemas und prozesseitig Patente von Herstellverfahren für einzelne Prozessschritte realisiert. Im Zuge dessen wird die Eigenproduktion von Hairpin-Statoren vorangetrieben. Durch die revolutionäre Wickeltechnologie von Hairpin-Statoren steht die Produktionstechnik allerdings vor neuen Herausforderungen im Vergleich zu etablierten Fertigungsverfahren von Runddraht-Statoren. Einerseits sind mehr Produktionsschritte mit unterschiedlichen Fertigungstechnologien nötig und andererseits sind die einzelnen Prozessschritte noch nicht vollständig für eine prozessichere Serienproduktion entwickelt, wodurch unterschiedliche Konzepte für die jeweiligen Prozesse in Frage kommen. Außerdem existiert noch kein standardisierter Prozessablauf im Unternehmen zur Produkt- und Produktionsanlagenentwicklung bei einem neuen Statordesign nach Kundenwunsch.

1.2 Zielsetzung und Herangehensweise

Nach einer theoretischen Einführung in die Formstabtechnologie wird in einem ersten Schritt der Produktentstehungsprozess des Hairpin-Stators analysiert und ein Prozessmodell für den gesamten Entwicklungsprozess in Anlehnung an die Automobilindustrie entworfen. Anschließend werden in der vorliegenden Arbeit unterschiedliche Konzepte und Ansätze für jeden Montageschritt analysiert und die bestmögliche Variante für eine Serienproduktion mit unterschiedlichen Stückzahlenszenarien dargelegt. Zusätzlich zur technischen Realisierbarkeit der einzelnen Konzepte wird auch eine wirtschaftliche Betrachtung einzelner Konzeptvarianten kritischer Prozessschritte für die Entscheidungsfindung durchgeführt. Nach einer umfangreichen

Analyse des gesamten Montageprozesses werden bestehende Gesamtanlagenkonzepte zur vollautomatisierten Hairpin-Stator Produktion in eine Ablaufsimulation durch Anwendung der Software Siemens Plant Simulation 16 übergeführt und hinsichtlich produktionstechnischer Parameter wie Taktzeit, Ausbringungsmenge oder Anlageneffizienz abgesichert und optimiert, um das Ziel einer wirtschaftlichen Serienproduktion von Hairpin-Statoren zu erreichen.

2 Theoretische Grundlagen

Für eine integrierte Produktionsplanung des Stators wird in einem ersten Schritt in diesem Abschnitt die Theorie der Formstabtechnologie näher betrachtet. Dazu werden in diesem Kapitel einerseits die Wicklung des Stators detailliert behandelt – insbesondere die neuartige Wickeltechnik mittels rechteckigen Kupferformstäben anstatt Runddrähten – und andererseits die technischen Begriffe des gesamten Hairpin-Stators definiert.

2.1 Der Hairpin-Stator

In den verschiedensten Antriebsarchitekturen von alternativen Antrieben wie hybrid- oder batterieelektrischen Fahrzeugen stellt der Elektromotor eine Kernkomponente dar. Die Hauptbaugruppen des Motors sind der Rotor, das Gehäuse mit Leistungselektronik und der Stator. Eine Einordnung des Elektromotors im Gesamtfahrzeug sowie die Bestandteile des Motors am Beispiel eines Volkswagen ID.3, wo bereits ein Hairpin-Stator eingesetzt wird, gibt Abb. 1.

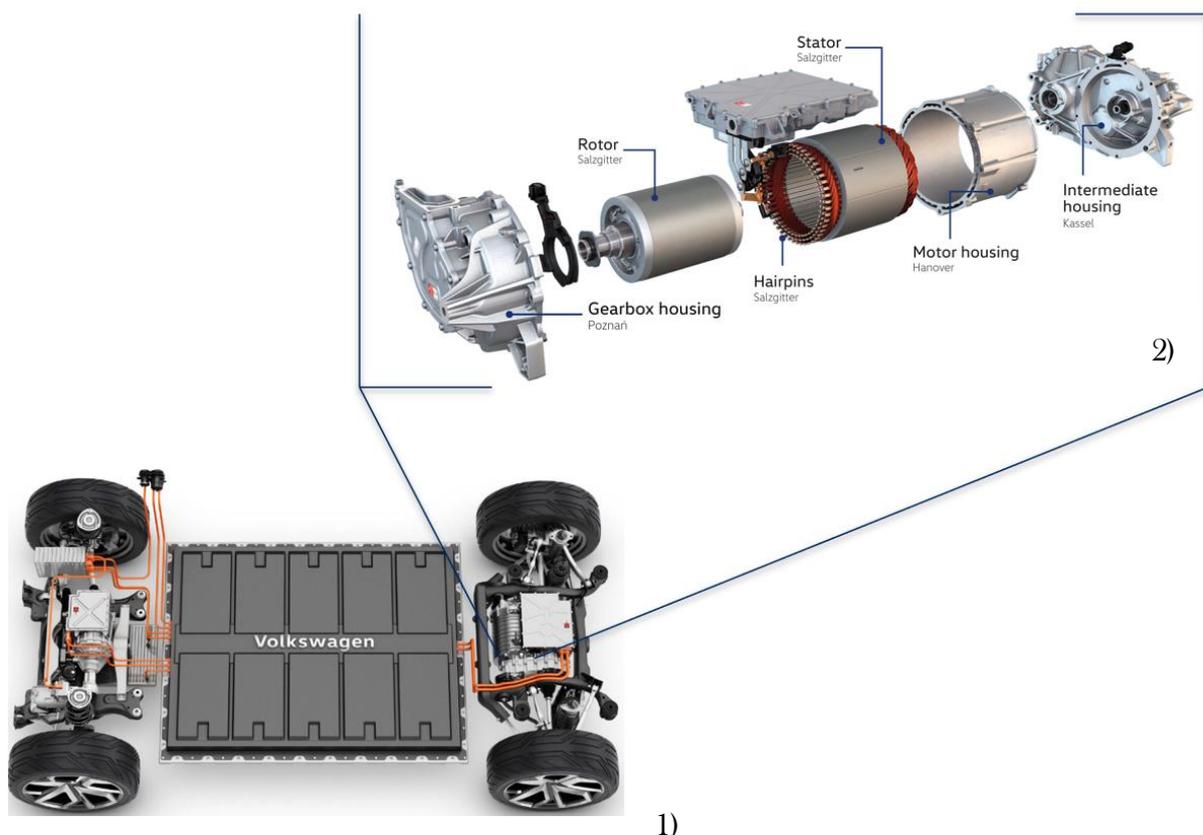


Abb. 1: Abstraktion des Elektromotors aus dem Gesamtfahrzeug am Beispiel eines VW ID.3, Quelle: 1) Volkswagen AG (2019a), Onlinequelle: [26.08.2021].; 2) Volkswagen AG (2019b), Onlinequelle: [26.08.2021].

Elektromotoren werden nach Art der Versorgungsspannung in Gleichstrommaschinen, Ein-Phasen-Wechselstrommaschinen (Universalmotor) und Drei-Phasen-Wechselstrommaschinen eingeteilt. In einem weiteren Schritt können die Elektromaschinen nach ihrem Wirkprinzip kategorisiert werden, wonach Drehstrommaschinen in Synchron- und Asynchronmaschinen und Gleichstrommaschinen in fremd- und permanenterrechte Maschinen unterschieden werden (siehe Abb. 2).

Dieses Wirkprinzip bezieht sich bei Drehstrommaschinen auf das Magnetfeld, welches bei Synchronmaschinen im Rotor und Stator in der gleichen Phasenlage liegt, es läuft synchron umlaufend mit. Zur Erzeugung des Rotormagnetfeldes können entweder Permanentmagnete oder eine separate Wicklung, welche über einen Schleifring versorgt werden muss, am Rotor zum Einsatz kommen. Bei Asynchronmotoren tritt eine Phasenverschiebung der magnetischen Felder von Stator und Rotor auf (Schlupf), welche dazu führt, dass die Drehzahl des Rotors immer zeitversetzt zum Statorfeld ist. Bei diesem Motortyp besteht der Stator aus einer Drehstromwicklung, welche bei Rotation des Magnetfeldes einen Strom in den Käfig des Rotors induziert. Dieser Stromfluss erzeugt wiederum das Magnetfeld des Rotors.³

An dieser Stelle wird nur auf diese beiden Elektromotortypen eingegangen, da die anderen dargestellten Bauformen keine Bedeutung für Traktionsantriebe in der Fahrzeugindustrie haben (siehe Abb. 2, rote Markierungen).

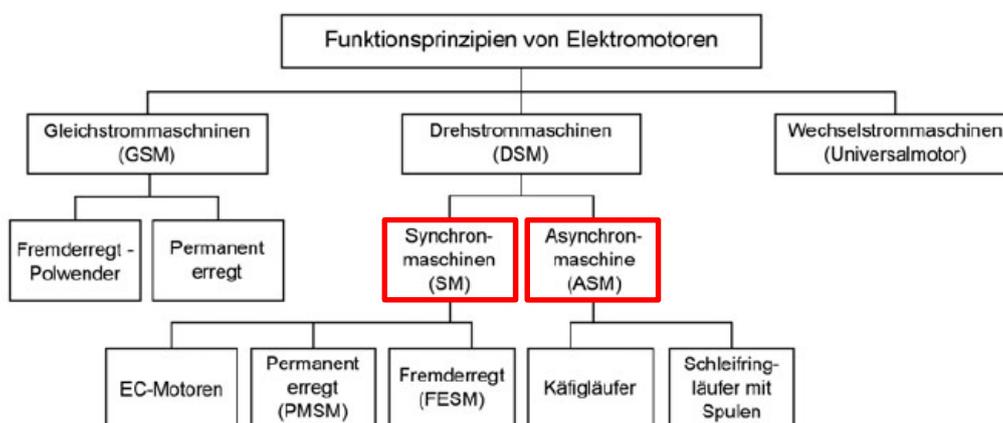


Abb. 2: Übersicht der verschiedenen Elektromotor-Typen, Quelle: Hagedorn/Sell-Le Blanc/Fleischer (2016), S. 73.

³ Hagedorn/Sell-Le Blanc/Fleischer (2016), S. 76-79.

Grundsätzlich kommen in Traktionsantrieben der Fahrzeugindustrie überwiegend permanenterregte (Abk. PMSM) beziehungsweise fremderregte (Abk. FESM) Synchronmaschinen oder Asynchronmaschinen (Abk. ASM) zum Einsatz. Beide Maschinenarten finden aktuell Anwendung bei Automobilherstellern und zeichnen sich durch konträre Vor- und Nachteile aus. Bei Asynchronmaschinen fallen geringere Kosten durch das Fehlen von teuren Magneten im Rotor an, außerdem sind sie als robust einzuschätzen. Nachteilig sind der größere Bauraum sowie eine geringere Drehmoment- und Leistungsdichte im Gegensatz zur Synchronmaschine. Die permanenterregte Synchronmaschine, welche überwiegend in Traktionsantrieben eingesetzt wird, hat ihre Vorteile in der hohen Leistungsdichte bei kompakter Bauweise und hohem Wirkungsgrad. Nachteilig sind die höheren Kosten für die Permanentmagnete sowie die Abhängigkeit von sogenannten seltenen Erden.⁴

Aufgrund des durchgehend besseren Wirkungsgrades über das gesamte Leistungsspektrum der PMSM gegenüber der ASM (siehe Abb. 3), wird die PMSM vermehrt in Fahrzeugantrieben eingesetzt, vorwiegend aber in leistungsstarken Fahrzeugen mit hohen Effizienzanforderungen.

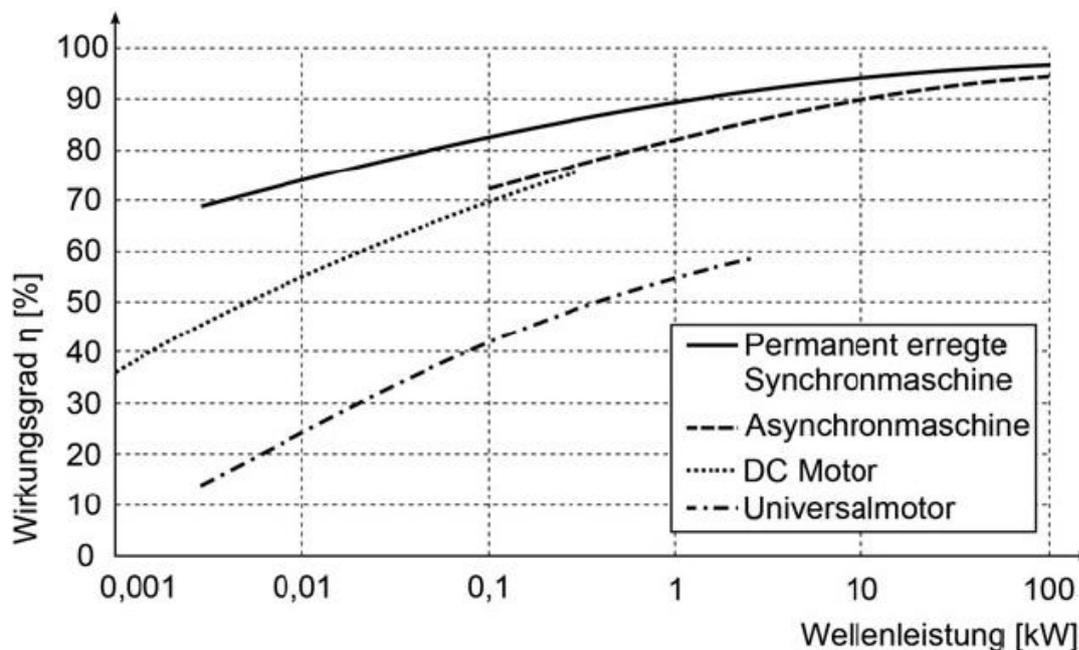


Abb. 3: Leistung über den Wirkungsgrad verschiedener Elektromotoren, Quelle: Hagedorn/Sell-Le Blanc/Fleischer (2016), S. 72.

⁴ Vgl. Fleischer/Hausmann/Halwas/Hofmann/Wirth/Wößner (2020), S. 5, Onlinequelle: [02.07.2021].

Das Herzstück eines Stators ist die Wicklung, welche mit etablierten Fertigungstechnologien wie dem Linear-, Flyer- und Nadelwickeln sowie der Einziehtechnik teil- bis vollautomatisiert gefertigt wird. Der Kupferlackdraht liegt in diesem Fall in biegeschlaffer Form mit rundem Querschnitt vor. Aufgrund der stark steigenden Produktionsmengen elektrischer Traktionsantriebe müssen diese Fertigungstechnologien den hohen Anforderungen der Automobilindustrie hinsichtlich Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit gerecht werden. Es hat sich gezeigt, dass diese Forderungen von den beschriebenen etablierten Technologien nicht zur Gänze erfüllt werden und eine Überführung in die Großserienproduktion gewisse Probleme mit sich bringt. Darüber hinaus führt das Streben nach leistungsdichten, effizienten Elektromotoren zum Einsatz von rechteckigen Leiterquerschnitten, wodurch neue Fertigungstechnologien notwendig sind, da in diesem Fall ein formstabiler, biegesteifer Lackdraht vorliegt.⁵

Somit kann nicht mehr von einer Wickeltechnik gesprochen werden, vielmehr ist der Formstab aus Kupfer durch Biegeumformungen in eine Spulenform zu bringen. Zu Beginn wird der gerade Formstab in eine haarnadelähnliche Form übergeführt, in weiterer Folge Hairpin genannt, um nach einer Vormontage zu einem Korb axial in das Blechpaket gefügt zu werden. Die freien Hairpin-Enden werden anschließend durch eine erneute Biegeumformung verschränkt, dieser Prozessschritt wird auch „Twisten“ genannt. Durch abschließendes Kontaktieren der Hairpins wird eine geschlossene, elektrisch leitende Spule erzeugt.⁶

Eine grundsätzliche Darstellung der wichtigsten Montageschritte eines Hairpin-Stators zeigt Abb. 4. Darüber hinaus sind viele weitere Prozessschritte im Montageprozess notwendig, welche in Kapitel 4 eingehend beschrieben werden. Verglichen mit etablierten Wickelverfahren zur Herstellung von Statoren ergibt sich ein viel komplexerer Montageprozess. Dieser Tatsache muss mit einem hohen Entwicklungsaufwand einerseits der einzelnen Prozessschritte und andererseits der Gesamtanlage begegnet werden, um eine prozessstabile Serienproduktion sicherzustellen.

⁵ Vgl. Gläßel (2020), S. 15–16.

⁶ Vgl. Arzillo/Braglia/Nuzzo/Barater/Franceschini/Gerada/Gerada (2020), S. 3–4.

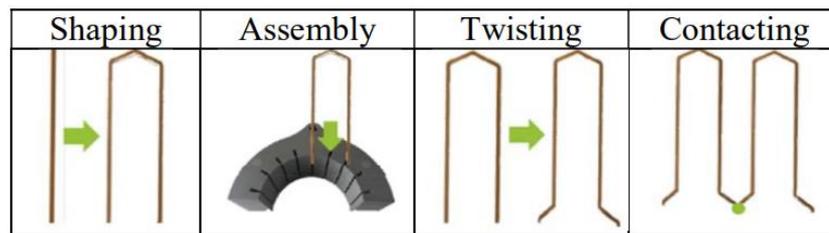


Abb. 4: Hauptschritte zur Herstellung eines Hairpin-Stators, Quelle:
Arzillo/Braglia/Nuzzo/Barater/Franceschini/Gerada/Gerada (2020), S. 5.

2.2 Optimierungspotentiale der Formstabwicklung

Die Wicklung eines Stators bietet großes Optimierungspotential hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit und Effizienz. Darum konzentriert sich aktuell die Forschungstätigkeit auf das Ersetzen des Runddrahtes zu rechteckigen Leiterquerschnitten, wodurch vielfältige Verbesserungen erzielt werden können. Diese Verbesserungen durch die sogenannte Formstabtechnologie werden in diesem Abschnitt erläutert.

Durch den rechteckigen Leiterquerschnitt steigt der Kupferfüllfaktor k_{Cu} [%], welcher aus dem Verhältnis von Leiterfläche A_{Leiter} [mm²] zu Nutfläche A_{Nut} [mm²] definiert ist (vgl. Formel 2.1), um bis zu 22 %. Konkret bedeutet dies eine Steigerung von 43 % bei Runddrahtwicklungen auf 65 % bei rechteckigen Querschnitten. Daraus resultiert eine Verringerung des Phasenwiderstandes und damit eine Reduzierung der Stromwärmeverluste der Wicklung (vgl. Abb. 5).⁷

$$k_{Cu} = \frac{A_{Leiter}}{A_{Nut}} \quad (2.1)$$

Darüber hinaus wirkt sich eine Steigerung des Kupferfüllfaktors auch auf den Wirkungsgrad des Elektromotors aus, wonach eine Erhöhung des Füllfaktors um 10 % eine durchschnittliche Wirkungsgradsteigerung um 1 % zur Folge hat.⁸

Mit rechteckigen Formstäben ist eine Reduzierung der Länge des Wickelkopfes zu realisieren,

⁷ Vgl. Juergens/Fricasse/Marengo/Gragger/Gennaro/Ponick (2016), S. 2.

⁸ Vgl. Hagedorn/Sell-Le Blanc/Fleischer (2016), S. 109.

infolge dessen sich ebenfalls der Phasenwiderstand durch geringere Wicklungslängen verringern lässt. Ein kleinerer Wickelkopf lässt zusätzlich eine Vergrößerung der aktiven Länge des Stators beziehungsweise eine Verkleinerung des axialen Bauraumes zu, womit die Anforderung von geringem Bauraum in Fahrzeugen besser erfüllt werden kann.⁹

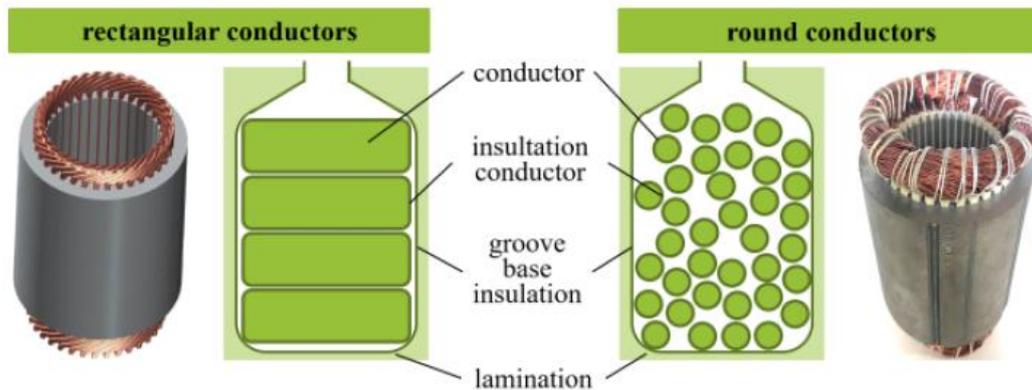


Abb. 5: Vergleich von rechteckigen und runden Leiterquerschnitten in der Statornut, Quelle: Glaessel/Seefried/Kuehl/Franke (2020), S. 1.

Ein weiterer großer Vorteil der Formstabtechnologie im Stator liegt in der besseren Kühlung der Wicklung, begünstigt durch bessere Wärmeleitung in der Nut und einer größeren umströmten Oberfläche des Kühlmediums am Wickelkopf. Rahman et al. haben aufgezeigt, dass sich die besseren Kühleigenschaften in bis zu 20 °C geringeren Wicklungstemperaturen verglichen mit Runddrahtwicklungen widerspiegeln.¹⁰ Die deutlich besseren Kühleigenschaften erlauben dem Elektromotor wesentlich längere Phasen im Hochlastbereich beziehungsweise im kontinuierlichen Betrieb auf einem Leistungsniveau, wo Statoren mit Runddrahtwicklung bereits im Spitzenbereich liegen.

Ein Nachteil von Formstabwicklungen liegt in der drehzahlabhängigen Erhöhung des Phasenwiderstandes, hervorgerufen durch Stromverdrängungseffekte bei höheren Frequenzen und großen Leiterquerschnitten. Diese Effekte werden in der Elektrotechnik auch als Skineneffekt bezeichnet, welcher bei einzelnen mit höherfrequentem Wechselstrom durchflossenen Leitern auftritt und besagt, dass der Strom nur noch in der äußersten Schicht des Leiters geleitet wird.

⁹ Vgl. Glaessel/Seefried/Kuehl/Franke (2020), S. 1–2.

¹⁰ Vgl. Rahman/Jurkovic/Stancu/Morgante/Savagian (2015), S. 7.

Die Ursache liegt in einem Magnetfeld, welches vom Leiter selbst durch den induzierten Strom aufgebaut wird und im Zentrum stärker ist als am Rand. Bei benachbarten Leitern tritt die Stromverdrängung ebenfalls auf, mit der unterschiedlichen Ursache eines magnetischen Streuflusses und wird in diesem Fall Proximity-Effekt genannt welcher in Spulen besonders relevant ist und vom Abstand der Leiter, der magnetischen Leitfähigkeit und der Frequenz des Magnetfeldes abhängt.¹¹

Bei runden Leiterquerschnitten wird dieser Effekt nicht beobachtet. Im Vergleich mit Runddrahtwicklungen wird bei Drehzahlen unterhalb von 8000 min^{-1} noch keine Beeinträchtigung der Motorleistung von Statoren mit Formstabwicklung festgestellt. In Anbetracht der Tatsache, dass die hauptsächlichen Betriebspunkte des Motors in durchschnittlichen Fahrzyklen nicht über einer Drehzahl von 5000 min^{-1} liegen, können Hairpin-Statoren im kleinen bis mittleren Drehzahlbereich als besonders Effizient angesehen werden.¹²

Die beschriebenen Vorteile von Statoren mit rechteckigen Leiterquerschnitten können zu wesentlichen Steigerungen der Leistungsparameter der Elektromaschine zusammengefasst werden. Eine Quantifizierung der Verbesserungen von Drehmoment, Leistung, Bauraum und Gewicht des Hairpin-Stators im Vergleich zu Runddrahtwicklungen nimmt Remy International Inc. vor. Demnach ergibt sich ein um bis zu 27 % höheres Drehmoment und bis zu 34% mehr Leistung sowie eine Reduktion von 22 % des Bauraumes und 13 % der Masse des Hairpin-Stators bei einem direkten Vergleich mit einem Stator der selben Größe mit runden Kupferquerschnitten.¹³ Die Reduktion von Bauraum und Gewicht sind wesentliche Ansprüche in der Automobilindustrie im Hinblick auf Platzansprüche im Innenraum des Fahrzeuges und Gewichtseinsparungen des Gesamtfahrzeuges. Eine grafische Gegenüberstellung der Verbesserungen von Rund- zu Flachdrahtwicklungen ist in Abb. 6 ersichtlich.

¹¹ Vgl. Hagedorn/Sell-Le Blanc/Fleischer (2016), S. 34–35.

¹² Vgl. Rahman/Jurkovic/Stancu/Morgante/Savagian (2015), S. 5–9.

¹³ Vgl. Remy International Inc. (2009), Onlinequelle: [25.05.2021].

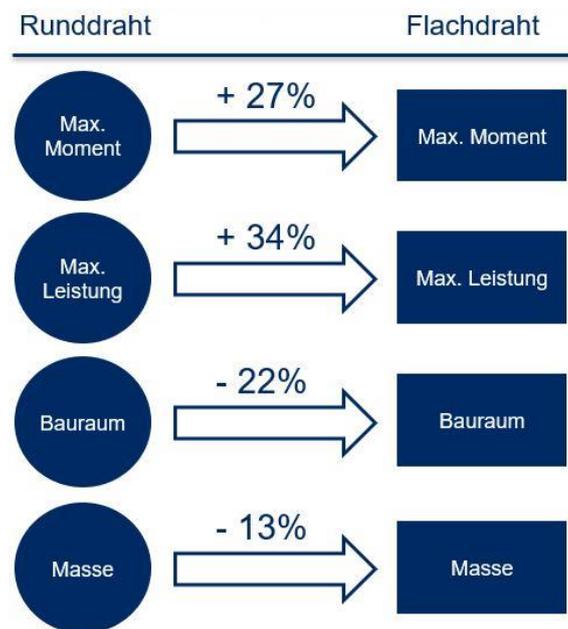


Abb. 6: Gegenüberstellung von Rund- zu Flachdrahtwicklungen, Quelle: in Anlehnung an Remy International Inc. (2009), Onlinequelle: [25.05.2021].

2.3 Begriffsdefinitionen am Hairpin-Stator

Bei einem Hairpin-Stator kommen einerseits allgemein bekannte Begrifflichkeiten aus der Elektrotechnik und andererseits speziell durch die Formstabtechnologie notwendige neue Begriffe zum Einsatz, welche in diesem Kapitel erläutert werden.

2.3.1 Allgemeine Begriffe am Stator

Ein Stator besteht in seinen Hauptbaugruppen aus dem Blechpaket und seiner Wicklung. Bei einem Hairpin-Stator unterscheidet man in axialer Richtung die Wickelköpfe in eine Hairpin- oder Biegeseite und eine Twist- beziehungsweise Schweißseite. Diese Unterscheidung hat seinen Ursprung in der Herstellung, da die gebogenen Hairpins von der Hairpinseite axial in das Blechpaket gefügt werden und nach diesem Schritt die Prozessschritte nur mehr auf der gegenüberliegenden Twist- oder Schweißseite liegen. Nach dem Verschweißen der Pins zu einer Wicklung muss sie noch miteinander durch eine sogenannte Busbar oder auch Stromschiene verschaltet werden, welche in den drei Phasenanschlüssen münden. Einen Überblick über die allgemeinen Begriffe am Hairpin-Stator gibt Abb. 7. Die unterschiedlichen Farben der Wicklung kommen aus der elektrotechnischen Sichtweise, die drei Phasen U-V-W sind mit blau-grün-gelb gekennzeichnet, unterschiedliche elektromagnetische Richtungen einer Phase sind hell und dunkel in der jeweiligen Farbe eingefärbt.

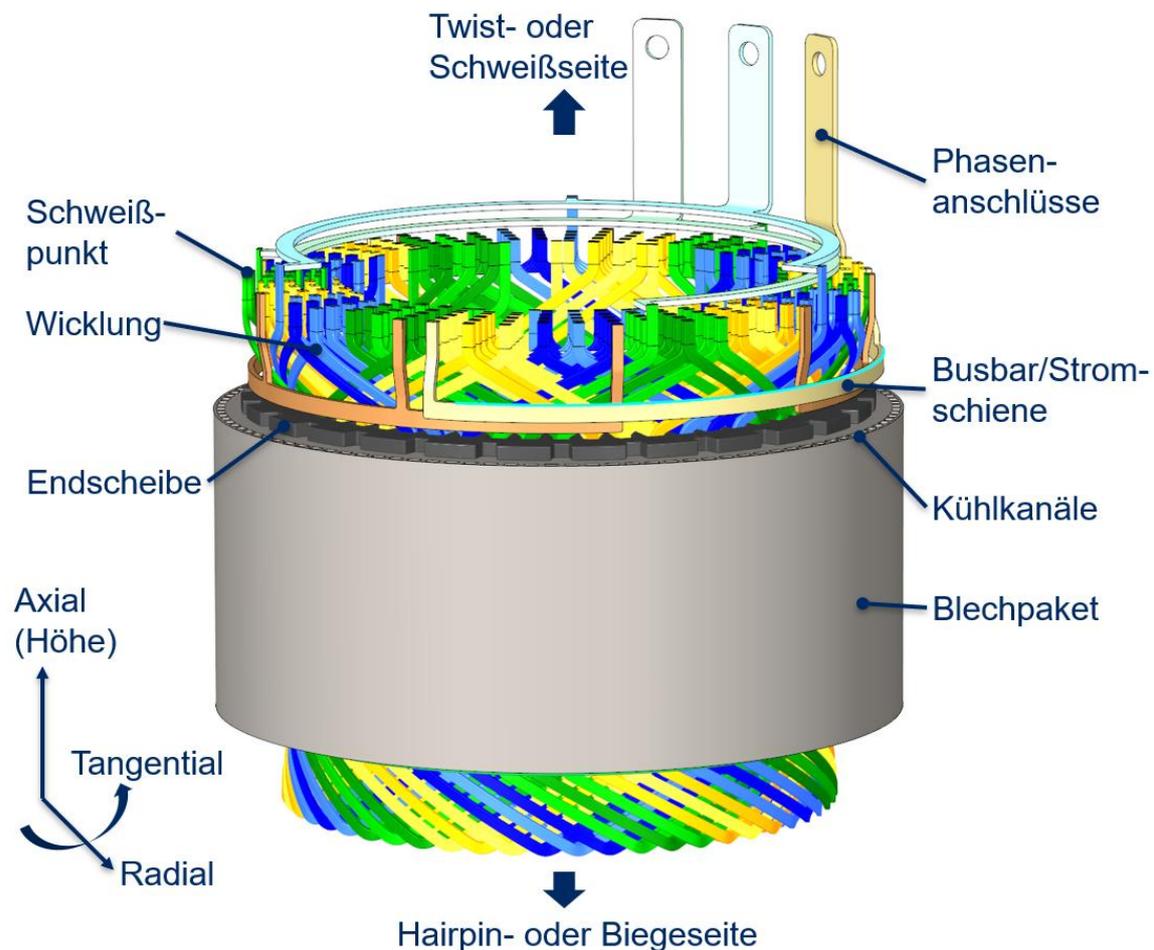


Abb. 7: Allgemeine Begriffe des Hairpin-Stators, Quelle: in Anlehnung an Firmenunterlagen MAS.

2.3.2 Begriffe aus der Formstabtechnologie

Bei einer gesteckten Stabspulenwicklung anstatt einer gewickelten Runddrahtwicklung sind unterschiedliche Pin-Geometrien notwendig, welche in Standardpins und Sonderpins unterschieden werden. Als Standardpins werden die haarnadelförmig gebogenen Hairpins bezeichnet, die hauptsächlich in der Wicklung vorkommen und zur Realisierung der Pole dienen. Für die Verschaltung der Pole über die Busbar (Anschlusspins) und zur Verwirklichung von speziellen Wickeldesigns (Umkehrpins) kommen die Sonderpins zum Einsatz, welche eine spezielle Form aufweisen und an das individuelle Stator-Design geknüpft sind. Die Anschlusspins werden auch I-Pins genannt, da sie keine Haarnadelform aufweisen. Diese Sonderpins sind aus fertigungstechnischer Sicht besonders zu berücksichtigen, da sie zu einem limitierenden Faktor einer Fertigungstechnologie werden können.

Bei der Betrachtung einer einzelnen Nut werden die Pins in Lagen und Körbe eingeteilt und

radial von innen nach außen nummeriert. Eine Lage entspricht immer einer Pinreihe über alle Nuten in Umfangsrichtung verteilt, zwei Lagen werden zu einem Korb zusammengefasst. Die Einteilung in eine Lage ist beim Stecken der einzelnen Pins zu einer Wicklung von Bedeutung, wo immer lagenweise gesteckt wird und anschließend das Vormontieren der Lagen zu einer Wicklung von innen nach außen vonstattengeht. Die fertig gesteckte Wicklung wird je nach Fügekonzept anschließend im Gesamten in das Blechpaket axial gefügt. Darüber hinaus kommt diese Benennung beim Verschränken (Twisten) der Pins zu einer Wicklung zum Einsatz, da je nach Werkzeugtechnologie lagenweise oder korbweise, also zwei Lagen gleichzeitig, verschränkt werden (siehe Kapitel 4.7). Eine gleichwertige Bezeichnung zur Anzahl der Lagen ist die Anzahl der Leiter je Nut. Dieser Begriff wird aus dem Englischen übernommen und als CPS (Abk. Conductors per Slot) bezeichnet. Eine Übersicht über die Begriffe der Pins in einer Nut im Blechpaket gibt Abb. 8.

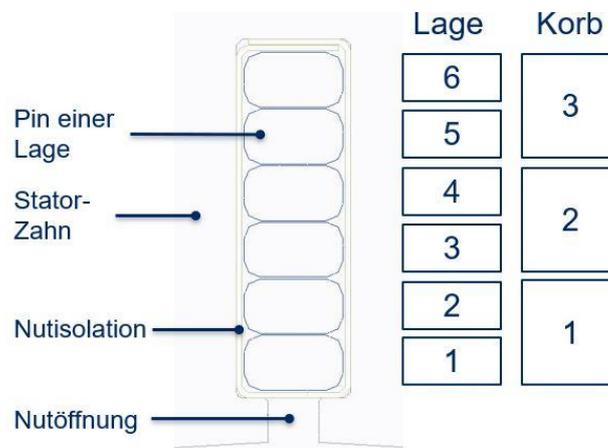


Abb. 8: Begriffe der Formstabtechnologie anhand einer Statornut, Quelle: Eigene Darstellung.

3 Der Entwicklungsprozess des Hairpin-Stators im Unternehmen

Bevor der gesamte Fertigungsprozess in Kapitel 4 analysiert wird, gibt dieser Abschnitt zu Beginn einen zeitlichen Überblick über die Entwicklungstätigkeiten der MAS im Kontext des Hairpin-Stators. Daraus wird die Notwendigkeit eines Simultaneous-Engineering Ansatzes im Entwicklungsprozess abgeleitet und die Verzahnung von Produkt- und Produktionsanlagenentwicklung herausgearbeitet. Der Hauptteil des Kapitels beschäftigt sich mit dem Entwerfen eines Prozessmodells für die Parallelarbeit während eines gesamten Entwicklungsprojekts eines Hairpin-Stators bis zum Start of Production (Abk. SOP).

3.1 Roadmap der Hairpin-Stator Entwicklung

Die Firma MAS ist seit dem Jahr 2014 im Bereich der Statoren mit Formstabwicklung vertreten. Ab diesem Zeitraum wurden einzelne Anlagen zur teilautomatisierten Fertigung von Hairpin-Statoren konstruiert und gefertigt. Die Produktentwicklung realisierte zu diesem Zeitpunkt der Kunde und darauf aufbauend entwarf die MAS das Anlagendesign. Im zweiten Schritt wurde damit begonnen, die einzelnen Prozessschritte für die Fertigung des Stators zu entwickeln, um eine vollautomatisierte Montage zu einem späteren Zeitpunkt sicherzustellen. Dazu wurde im Jahre 2017 in der eigenen Werkshalle eine Prototypanlage implementiert, um auf kürzestem Wege Versuche mit bestimmten Fertigungsverfahren durchführen zu können, sowie Prototypaufträge (A/B-Muster) von Kunden zu fertigen. Nach der ersten Entwicklungsphase konnten in weiterer Folge erste Kundenprojekte aquiriert werden. In dieser Phase wurde durch intensive Kundenkooperationen Know-How aufgebaut, welches bei den ersten erfolgreich entwickelten Prototypanlagen sowie Kleinstserienanlagen zum Tragen kommt.

In weiterer Folge entstand ab dem Jahr 2019 eine eigene Produktentwicklung, wobei der gesamte Elektromotor mit Rotor und Stator entwickelt wird: Angefangen vom Wickelschema der Formstäbe aus Kupfer, welches in weiterer Folge auch patentiert wurde, bis hin zur geometrischen und elektromagnetischen Auslegung des gesamten Stators. Die Produktentwicklung des Hairpin-Stators wird allerdings von der Miba eMobility GmbH am Standort Vorchdorf durchgeführt. Ab diesem Zeitpunkt kommen die starken Zusammenhänge von Produktauslegung und Produktion des Stators zum Vorschein (in den Simulationsmodellen dieser Arbeit in Kapitel 5.4.2.2 wird diese Thematik herausgearbeitet). Beim Twistprozess sind beispielsweise geometrische Grenzen hinsichtlich des Nutabstandes oder der Pinhöhen in axialer Richtung gegeben. Werden diese Grenzen nicht berücksichtigt, ist das entwickelte Twistwerkzeug

nicht mehr verwendbar (siehe Kapitel 4.7.1). Daraus lässt sich die Notwendigkeit einer starken Interaktion dieser beiden Entwicklungsabteilungen ableiten. In Kapitel 3.3.1 wird daher genauer auf den Simultaneous-Engineering Ansatz eingegangen. Seither wird das firmeneigene Know-How von der Produktionsanlagen- auf die Produktentwicklung erweitert. Außerdem beschäftigt sich seit dem darauffolgenden Jahr eine eigene R&D-Abteilung intensiv mit der Prozessentwicklung in enger Abstimmung mit der Produktentwicklung - ein Simultaneous-Engineering Team entsteht.

Im nächsten Schritt der Gesamtentwicklungsphase wird die Eigenproduktion von Hairpin-Statoren nach individuellen Kundenwünschen und Stückzahlenszenarien angetrebt, wobei diese Arbeit als Vorbereitung dazu dienen soll. Eine zeitliche Übersicht zum gesamten Entwicklungsprozess gibt Abb. 9.



Abb. 9: Zeitschiene bei der Hairpin-Stator Entwicklung in der MAS, Quelle: Eigene Darstellung.

3.2 Einordnung in der Automobilindustrie

Bei der zukünftigen Eigenproduktion des Hairpin-Stators ist die Einordnung der MAS in die Wertschöpfungskette der Automobilindustrie von großer Bedeutung.

In der Kette der Zulieferer für OEMs werden unterschiedliche „Tier-Gruppen“ unterschieden. Das Wort „Tier“ kommt aus dem englischen und bedeutet „Rang“, womit die Hierarchieebene

in der sogenannten Zuliefererpyramide (siehe Abb. 10) gemeint ist. Der „Third-Tier-Zulieferer“ fungiert meist als Rohmaterial- und Normteilelieferant und bildet die unterste Ebene, der „Second-Tier-Zulieferer“ ist der Komponentenlieferant, welcher sowohl direkt an die OEMs als auch an die „First-Tier-Zulieferer“ liefert. Die „First-Tier-Zulieferer“ sind komplette Systemlieferanten, welche die Verantwortung beginnend mit der Entwicklung über die Logistik bis hin zur Produktion des Systems tragen und somit einem hohen Risiko ausgesetzt sind.¹⁴



Abb. 10: Zuliefererpyramide in der Automobilindustrie, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Positionierung der MAS in dieser Pyramide hängt vom Umfang der Eigenproduktion ab. Wird nur der Hairpin-Stator als Komponente produziert, erfolgt die Einordnung als „Second-Tier Zulieferer“, welcher den Stator an einen Hersteller des gesamten Elektromotors (First-Tier) liefert. Aus Erfahrungen der MAS am Markt hat sich allerdings gezeigt, dass Produzenten des Hairpin-Stators meist als Systemlieferanten fungieren, die den kompletten Elektromotor mit Stator, Rotor und Gehäuse an den Fahrzeughersteller (OEM) liefern. Der Grund liegt in Synergien beim Herstellprozess von Stator und Rotor. Beispielsweise wird der innere Teil des Blechschnittes vom Statorblechpaket für den Rotor verwendet. Ein weiterer Grund liegt in der Forderung der Fahrzeughersteller nach einer Gesamtverantwortung des Lieferanten für den Elektroantrieb. Wird die Position des Systemlieferanten als „First-Tier Zulieferer“ angestrebt, muss das Risiko des Unternehmens durch standardisierte Arbeitsweisen und definierte Entwicklungsprozesse kombiniert mit zeitlichen Meilensteinen minimiert werden. Dieser Forderung wird im Rahmen dieser Arbeit mit dem Entwurf eines Prozessmodells durch definierte Meilensteine im Kapitel 3.3 Die Produktentwicklung des Hairpin-Stators Rechnung getragen.

¹⁴ Vgl. Schömann (2012), S. 48–49.

3.3 Die Produktentwicklung des Hairpin-Stators

Die Neuentwicklung des Hairpin-Stators bedingt an dieser Stelle die Betrachtung des Produktentwicklungsprozesses. Einerseits wird die Entwicklungsmethodik und andererseits die Einordnung im gesamten Produktentstehungsprozess mit Handlungsempfehlungen herausgearbeitet, um ein Prozessmodell für den Entwicklungsprozess zu entwerfen.

3.3.1 Simultaneous-Engineering Ansatz

In einem stark wachsenden Markt der Elektromobilität rückt die Forderung nach kurzen Entwicklungszeiten unter Berücksichtigung von Kosten und Qualität des Hairpin-Stators immer mehr in den Mittelpunkt. Zusätzlich gilt es in einem starken Konkurrenzkampf wettbewerbsfähig und somit rasch und effizient unter der Prämisse von Kosten und Qualität das Produkt nach Kundenwunsch zu entwickeln. Die zeitliche Anordnung der Produktionsplanung folgt der Strategie, einen Simultaneous-Engineering Ansatz bei der gesamten Produktentwicklung umzusetzen. Unter diesem Ansatz versteht man eine interdisziplinäre Zusammenarbeit während des gesamten Produktlebenszyklus. Somit werden die einzelnen Phasen wie Konzept- und Produktentwicklung, Erprobung, Produktionsplanung sowie Fertigungsaufbau und Vertrieb zeitlich zusammengeschoben und ineinander verzahnt. Durch schnellere Korrekturschleifen entsteht dadurch ein signifikanter Zeitgewinn in der Entwicklungsphase bis zur Serienproduktion.¹⁵

Bei der sowohl produkt- als auch anlagenseitigen Entwicklung des Hairpin-Stators steigt die Bedeutung von Simultaneous-Engineering, da sich das Produktdesign hochgradig auf die Fertigungsprozesse auswirkt und dadurch die Produktionsplanung für verschiedene Volumina so früh wie möglich im Entwicklungsprozess einbezogen werden soll.

Ein weiterer Modellansatz zur Produktentwicklung mit vielen beteiligten Abteilungen und Personen ist das V-Modell. Im V-förmig angeordneten Modell wird beginnend mit der Anforderungsdefinition der Detaillierungsgrad der Themen immer feiner und nimmt nach der Spitze beim Durchlaufen der Systemintegration wieder ab. Die Kommunikation zwischen Systemabsicherung und interdisziplinäre Entwicklung wird in diesem Modell umfassend

¹⁵ Vgl. Syska, Andreas (2006), S. 131.

berücksichtigt. Auf eine genauere Beschreibung dieses Entwicklungsmodells wird an dieser Stelle verzichtet.¹⁶

In der Automobilindustrie gehört das Arbeitsprinzip des Simultaneous-Engineerings zum Standardablauf bei der Produktentstehung. Die Vorteile gegenüber sequenziell ablaufenden Entwicklungsphasen liegen zusammengefasst in der

- Parallelisierung
- Standardisierung
- Integration

der Vorgänge im Entwicklungsprozess. Die Parallelisierung zielt auf die Prozessgestaltung ab, wonach vormals nacheinander abgelaufene Prozesse nun parallel ablaufen, das heißt sie werden bereits begonnen, bevor der vorgelagerte Prozess abgeschlossen ist. Die Parallelität reicht dabei von internen über externen Entwicklungspartnern bis zur Vorbereitung der Serienproduktion. Eine Standardisierung bezieht sich auf drei verschiedene Aspekte: den technischen (Modularisierung, Verwendung von Elementstrukturen, etc.), den prozessorientierten (Phasen, Ablauforganisation) und den aufbauorganisatorischen (Abteilungsschnittstellen, Projekte, etc.). Der letzte zentrale Baustein des Simultaneous-Engineering Ansatzes, die Integration, verfolgt das Ziel, die natürlichen Schnittstellen zwischen unterschiedlichen Bereichen (Entwicklung, Vertrieb, Einkauf, etc.) zu Verbindungsstellen zu transformieren, um während des Projektes konsistente Informationen über alle Abteilungen bereitstellen zu können.¹⁷

Die Nachteile dieses Entwicklungsansatzes ergeben sich durch einen hohen Kommunikationsbedarf zwischen den einzelnen Prozessen und einer nötigen hohen Qualifikation der einzelnen Mitarbeiter und Entscheidungsträger im Team. Außerdem ergibt sich in den frühen Phasen ein Mehraufwand, welcher kurzfristig keine sichtbaren Ergebnisse liefert. Die notwendige höhere Qualifikation resultiert aus dem gleichzeitigen Betrachten verschiedener Sichtweisen und dem damit verbundenen Mehraufwand in der frühen

¹⁶ Vgl. Bader (2020), S. 22-23.

¹⁷ Vgl. Syska, Andreas (2006), S. 132.

Entwicklungsphase.¹⁸

Dieser interdisziplinäre Ansatz kommt auch in der Analysephase der Konzeptvarianten durch Miteinbeziehung verschiedener Abteilungen und Einholen derer Sichtweisen bei den Bewertungen im Rahmen der Nutzwertanalysen zur Anwendung.

Die interne Parallelarbeit bei Produkt- und Produktionsanlagenentwicklung muss zeitlich genau abgestimmt und mit gemeinsamen Meilensteinen verknüpft sein. Abb. 11 gibt einen Überblick über die Entwicklungsprozesse kombiniert mit den Meilensteinen bei einem großen deutschen OEM in der Automobilindustrie.

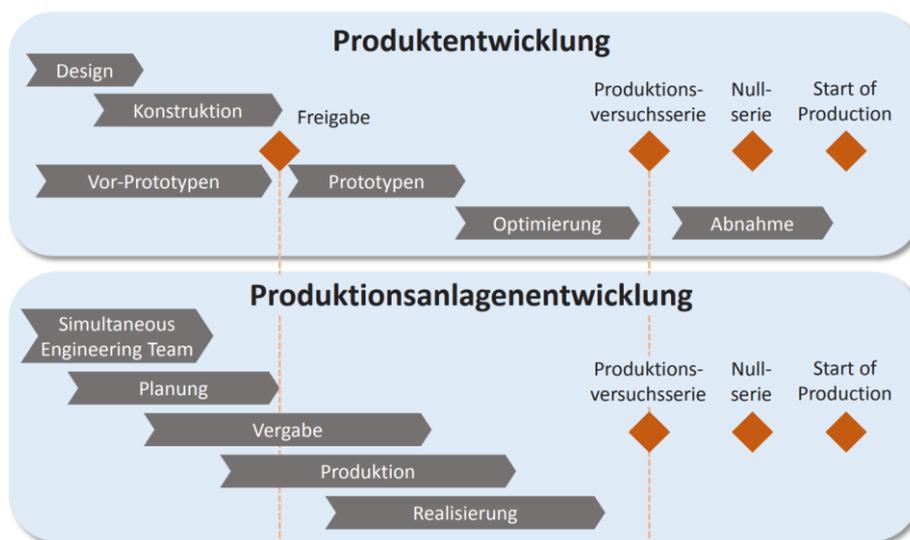


Abb. 11: Parallelarbeit zwischen Produkt- und Produktionsanlagenentwicklung eines deutschen OEM, Quelle: Kerber (2016), S. 3.

In der zukünftigen Produktionsplanung für die Eigenproduktion des Hairpin-Stators ist der Ansatz der Parallelarbeit von Produkt- und Produktionsanlagenentwicklung kombiniert mit den Meilensteinen wie Produktionsversuchsserie, Nullserie und Start of Production konsequent umzusetzen, um bei der Entwicklungszeit (TTM, Abk. Time to Market) wettbewerbsfähig zu bleiben. Neben der TTM sind auch die Produkt- und Produktionskosten ein starker Wettbewerbsfaktor und bereits in der Entwicklungsphase zu berücksichtigen. Die zukünftigen Kunden der MAS sind zum Großteil in der Automobilindustrie angesiedelt, darum muss auch

¹⁸ Vgl. Bader (2020), S. 24.

die Arbeitsweise an diese Industrie angepasst und standardisiert werden, um die Einhaltung der hohen Ansprüche hinsichtlich Zeit, Kosten und Qualität sicherstellen zu können.

3.3.2 Aufbau des Prozessmodells zur Hairpin-Stator Entwicklung

In diesem Abschnitt wird ein Prozessmodell zur Hairpin-Stator Entwicklung entworfen und in den gesamten Produktentstehungsprozess (Abk. PEP) mit Meilensteinen für eine konsequente Zielerreichung eingebettet. Als Referenzmodell dient der Referenz-PEP mit einzelnen Meilensteinen bis zum Start of Production (Abk. SOP) der Automobilindustrie von Kerber (2016) wie in Abbildung 13 dargestellt. Zunächst werden die einzelnen Prozessphasen der Statorentwicklung mit ihren Meilensteinen genauer ausgeführt, in weiterer Folge wird der Referenz-PEP, das betrachtete Prozessmodell zur Hairpin-Stator Entwicklung sowie die Planungsphasen von Rotor und Gehäuse in einem Gesamtmodell zusammengefasst. Als Grundlage zur Ableitung des Prozessmodells zur Stator-Entwicklung dient ein allgemein gültiger Produktentwicklungsprozess der Automobilindustrie, welcher mit der Projekt-Definitionsphase beginnt, in weiterer Folge in Konzeptentwicklungsphase, Produktentwicklungsphase, Produktionsanlagenentwicklungsphase und Anlaufphase unterteilt wird und mit der Serienphase endet. Dieses Referenzmodell wurde von Kerber (2016) aus vielen verschiedenen Modellansätzen abstrahiert und kann so in seiner allgemeinen Form auf spezifische Hersteller übertragen werden, da grundsätzlich jeder Fahrzeughersteller seinen eigenen spezifischen PEP verfolgt. Eine Übersicht über die unterschiedlichen Modellansätze zur Produktentwicklung in der Automobilindustrie gibt Abb. 12 wo ersichtlich wird, wie unterschiedlich sowohl zeitlich als auch inhaltlich der Produktentstehungsprozess von abweichenden Personen gestaltet werden kann.

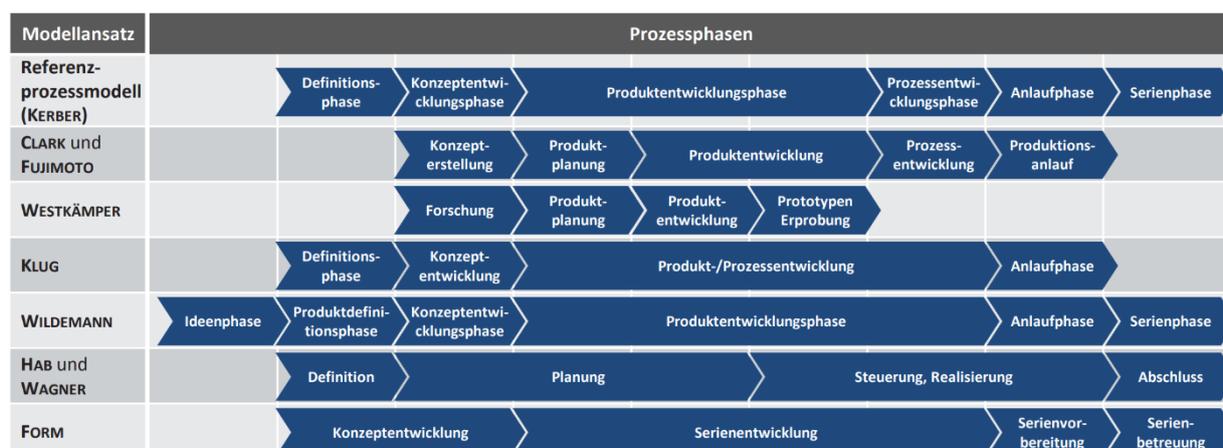


Abb. 12: Modellansätze des Produktentstehungsprozesses in der Automobilindustrie, Quelle: Kerber (2016), S. 22.

In Abb. 13 ist das verwendete Referenzprozessmodell ersichtlich, wobei die Produkt- und Produktionsanlagenentwicklungsphase abgeändert und ineinandergeschoben wurden, um einen Simultaneous-Engineering Prozess abzubilden. Der Grund hierfür liegt in der Abhängigkeit der Produktionstechnik vom Produktdesign des Stators. Ein Parameter der Produktauslegung ist beispielsweise die Anzahl der Leiter pro Nut. Wird dieser Parameter erhöht steigt proportional die Anzahl an Pins und somit die Anzahl an Schweißpunkten im Prozessschritt Drahtenden kontaktieren. Dies ist in der Taktzeit der Anlage sowie in der Auslegung der Schweißvorrichtung zu berücksichtigen. Ein Stator mit 36 Nuten und vier Leitern pro Nut weist beispielsweise eine Pinanzahl von 72 und damit auch 72 Schweißpunkte auf. Wird das Produktdesign auf 48 Nuten und sechs Leitern pro Nut geändert springt die Pinanzahl auf 144 und die Anzahl der Schweißpunkte verdoppelt sich. Durch die Teilnahme der Produktionsanlagenentwicklung an der Produktentwicklung werden im frühen Stadium die Randbedingungen aus Prozesssicht für die Auslegung definiert.

Mit den einzelnen Phasen sind die Meilensteine im Entwicklungsprojekt verknüpft, welche zentrale Elemente im Entwicklungsprozess der Automobilindustrie sind und in weiterer Folge als zeitliche Grundlage dienen.¹⁹

Diese Meilensteine zwischen den Prozessphasen werden auch als „Quality-Gates“ bezeichnet welche als Synchronisationspunkte zu verstehen sind. Bei dieser Synchronisation werden die Kriterien der vorhergehenden Phase überprüft und bei einem positiven Ergebnis die Freigabe für den nächsten Schritt im Projekt erteilt. Durch die gemeinsamen Meilensteine über die beteiligten Schnittstellen wie Entwicklung, Projektmanagement, Beschaffung und Vertrieb wird ein strukturiertes Vorgehen im Simultaneous-Engineering-Prozess sichergestellt.²⁰

Die Quality-Gates sind projektspezifisch zu definieren und können daher nicht allgemein an dieser Stelle beschrieben werden. Essentiell für die Funktionsweise der Gates sind festgelegte Anforderungen und Ziele, ohne deren Erreichung keine Freigabe für die nächste Prozessphase erteilt werden kann.

¹⁹ Vgl. Kerber (2016), S. 21-25.

²⁰ Vgl. Rudert/Trumpfheller (2015), Onlinequelle: [02.05.2021].



Abb. 13: Referenzprozessmodell für eine Produktentwicklung aus der Automobilindustrie, Quelle: Kerber (2016), S. 21–25. (leicht modifiziert).

Während eines Entwicklungsprozesses werden die einzelnen Phasen zeitlichen Abweichungen unterliegen und sollen daher nur als Referenz betrachtet werden. Eine Aussage über die Zeitdauer der einzelnen Phasen kann aus aktueller Sicht noch nicht gegeben werden, da Erfahrungen beziehungsweise Referenzwerte von Mitbewerben fehlen. Die Meilensteine der Prozessphasen sind jedoch in Kombination mit den Meilensteinen des gesamten PEP einzuhalten, um das übergeordnete Ziel, den SOP zu erreichen. Das Prozessmodell zur Hairpin-Stator Entwicklung wurde in vier Prozessphasen gegliedert, welche nachfolgend beschrieben werden.

Alle Beschreibungen der Meilensteine des Referenz-PEP, welche den entwickelten Prozessphasen zuzuordnen sind, wurden in Anlehnung an Kerber (2016), S. 23–25. verfasst.

- **1. Phase: Grundlagen Produktdesign und Machbarkeit**

Zu Beginn steht im intensiven Austausch mit dem Kunden das Produktdesign im Vordergrund. Im Aufgabengebiet „Durchführung von Produkt- und Machbarkeitsanalysen“ werden mit den definierten Kundenanforderungen hinsichtlich der Motorbetriebspunkte unterschiedliche Konzepte zum Stator- und Produktionsprozessen entworfen, welche im gleichen Schritt auf ihre Machbarkeit überprüft werden müssen. In dieser Phase werden die Parameter wie Leiter pro Nut (CPS), Nutanzahl oder Drahtquerschnitt variiert, um die Leistungsparameter des Elektromotors zu optimieren. Gleichzeitig müssen die unterschiedlichen Varianten bereits im frühen Stadium hinsichtlich der Produktionstechnik überprüft werden. Zusätzlich zählt zu den Aufgabengebieten das „Technologiescreening“, da sich die gesamte Produktionstechnologie des Hairpin-Stators noch in der Entwicklungsphase befindet und für bestimmte Prozessschritte von Mitbewerbern oder Forschungseinrichtungen laufend neue Konzepte entworfen werden. Darunter versteht

sich beispielsweise ein permanentes Patentscreening, um Technologietrends frühzeitig zu erkennen.

Folgende Meilensteine sind im allgemeinen PEP zugeordnet:

- **Projektdefinition | Projektstart Hairpin-Stator Entwicklung**

Das Projekt zur Hairpin-Stator Entwicklung wurde gestartet und gemeinsam mit dem Kunden konnte die Definition der Ziele und Anforderungen an den Hairpin-Stator beziehungsweise an den gesamten Elektromotor vollzogen werden.

- **Konzeptfreigabe | Evaluierete Konzepte**

Unterschiedliche Konzepte, welche die Kundenanforderungen zur Realisierung der fahrzeugtechnischen Anforderungen an den Hairpin-Stator erfüllen sind ausgearbeitet und in den zuständigen Abteilungen abgesprochen, vom Kunden wird das favorisierte Konzept freigegeben.

Eine Übersicht zur ersten Phase des Gesamtprozessmodells gibt Abb. 14.

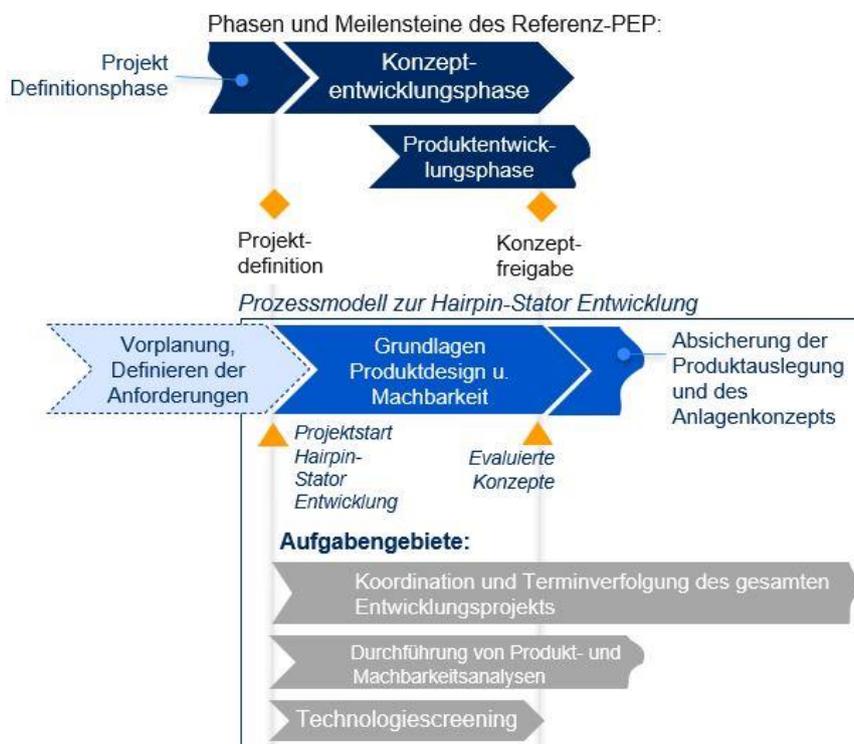


Abb. 14: Erste Phase des Prozessmodells zur Hairpin-Stator Entwicklung, Quelle: Eigene Darstellung.

- **2. Phase: Absicherung der Produktauslegung und des Anlagenkonzeptes**

Nach der Konzeptfreigabe beginnt die wichtige Phase der Absicherung, durch die virtuelle Simulation und durch reale Erprobung in Form von Versuchen. Zur virtuellen Simulation zählen die Produktsimulation der elektromagnetischen Auslegung zur Absicherung der Leistungsparameter des Elektromotors mit Hairpintechnologie. Zusätzlich kommt die Produktionsanlagensimulation der Statormontage hinzu, um mit Kunden vereinbarte Ziele hinsichtlich Taktzeit oder Ausbringungsmenge abzusichern sowie Flaschenhalse in der Montagelinie frühzeitig erkennen zu können. Da bisher in der MAS auf eine Simulation der Produktionsanlage verzichtet wurde, wird im Rahmen dieser Arbeit im Kapitel 5 detailliert darauf eingegangen. Im Aufgabengebiet „Absicherung durch Erprobung“ sind wichtige Parameter einzelner Prozessschritte der Produktionsanlage durch Versuche abzusichern. Dazu zählen beispielsweise die Abtrage des Lasers im Prozessschritt „Kupferdraht abisolieren“ oder die Qualität des Schweißpunktes im Prozessschritt „Drahtenden kontaktieren“. Neben der Absicherung von Prozessparameter müssen in diesem Abschnitt auch die Fertigungsprozesse, welche aufgrund des Statordesigns neu entwickelt werden, für eine Serienproduktion abgesichert sein. Dazu zählt zum Beispiel das automatisierte Stecken der Hairpins mittels Roboter zum festgelegten Wickelschema. Darüber hinaus erfolgt in diesem Abschnitt die Erprobung des Stators mittels Prüfstandläufe, womit die Produktauslegung abgesichert wird.

Bei diesem, zeitlich am längsten, Prozessabschnitt wird die Grundlage für die Serienanlage gelegt, wobei eine genaue Terminverfolgung in dieser Phase entscheidend ist. Folgende Meilensteine sind im allgemeinen PEP zugeordnet:

- **Designentscheid | Abgesichertes Statordesign**

Das Design für den Hairpin-Stator wird von der elektromagnetischen Auslegung für die CAD-Konstruktion vorgegeben.

- **Designfreeze**

Ab diesem Zeitpunkt ist das Produktdesign entgültig festgelegt und keine Änderungen mehr zulässig, die Phase der Produktentwicklung ist abgeschlossen. Die Entwicklung und Konstruktion der Produktionsanlagen bauen auf diesem Design auf.

- **Beschaffungsfreigabe | Abgesicherte Konzepte je Montageschritt**

Die Anlagenkonzepte sind erprobt und fertig konstruiert, die Beschaffung der Anlagenkomponenten kann beginnen.

- **Launchfreigabe | Abgesichertes Gesamtanlagenkonzept**

Die Entwicklungsphase der Produktionsanlagen ist abgeschlossen und die Lieferantentermine können eingehalten werden. Die Vorbereitungen zum Serienanlauf können beginnen.

Eine Übersicht zur zweiten Phase des Gesamtprozessmodells gibt Abb. 15.

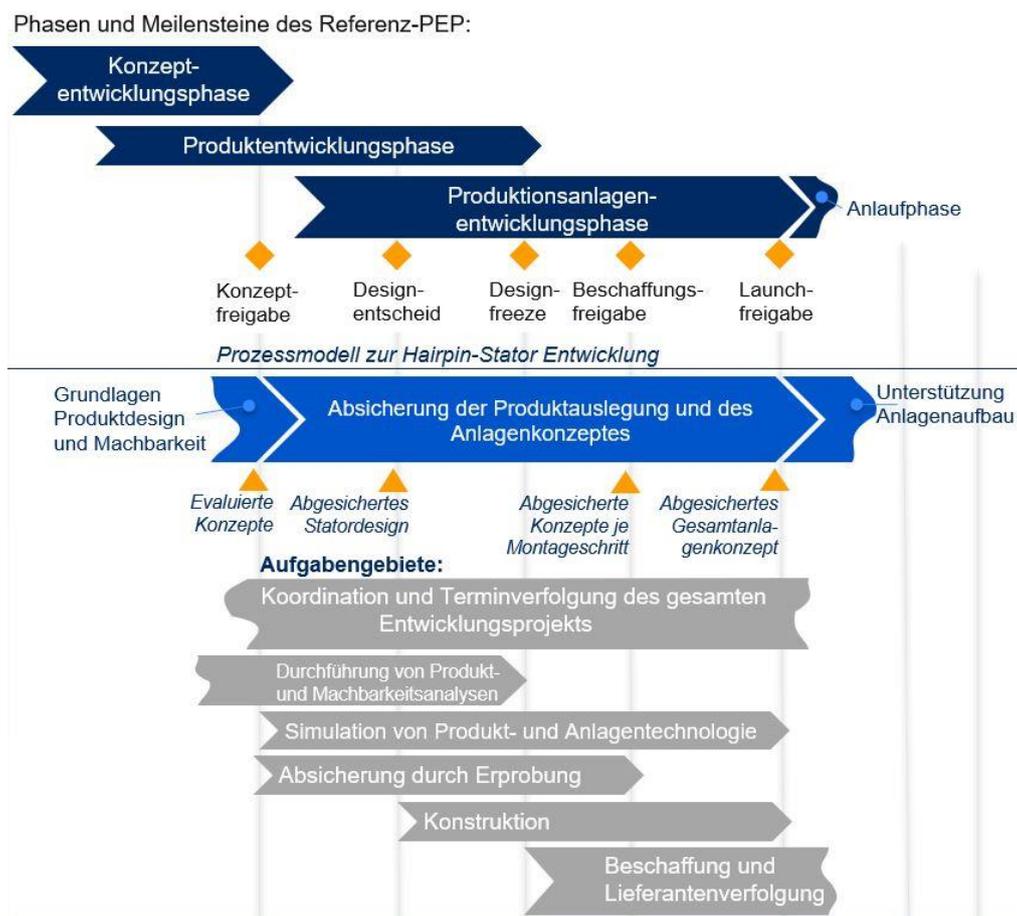


Abb. 15: Phase zwei des Prozessmodells zur Hairpin-Stator Entwicklung, Quelle: Eigene Darstellung.

- **3. Phase: Unterstützung Anlagenaufbau**

In diesem Abschnitt startet die Realisierungsphase der Produktionsanlage bis zum Serienanlauf. Im Standardablauf sind Konstruktion und Simulation in dieser

Prozessphase nur mehr wenig beteiligt, sollten jedoch im Informationsfluss der Montagephase integriert sein. Folgende Meilensteine sind im allgemeinen PEP zugeordnet:

- **Produktionsversuchsserie | Produktionsanlage in Betrieb**

Die ersten Hairpin-Statoren können unter annähernden Serienbedingungen produziert werden, die Funktion der Prozessschritte wird sichergestellt.

- **Nullserie**

Die Produktion von Statoren findet unter Serienbedingungen statt und die Gesamtanlage wird hinsichtlich Taktzeit, Durchlaufzeit und Verfügbarkeit auf den Serienprozess eingestellt.

- **Start of Production (SOP) | Abgesicherter Serienprozess**

Die Serienproduktion ist angelaufen und wird durch alle Projektbeteiligten abgesichert.

- **4. Phase: Serienbegleitung**

Im letzten Abschnitt wird die erste Serienphase noch begleitet, um den Ist-Stand im CAD und in der Simulation abzugleichen und zu dokumentieren und das gesamte Entwicklungsprojekt abzuschließen.

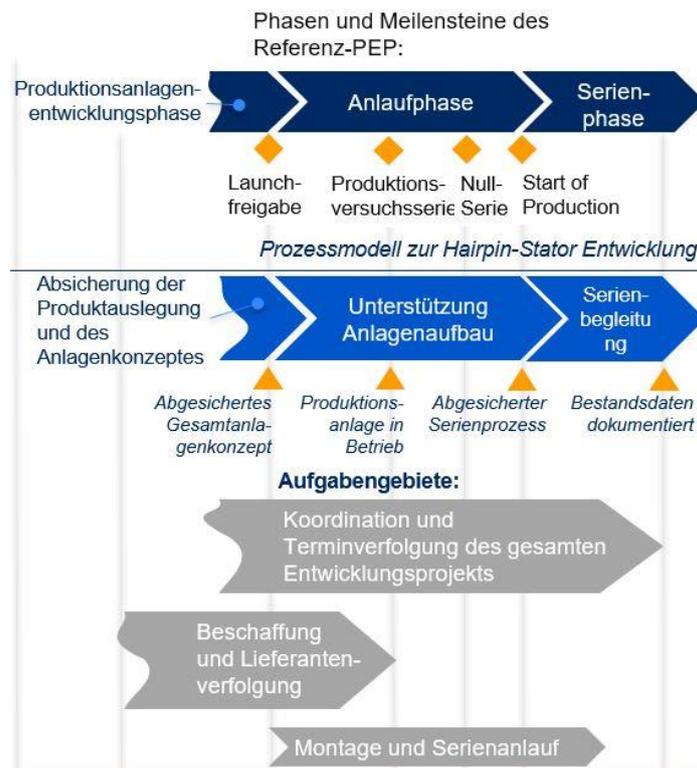


Abb. 16: Phasen drei und vier des Prozessmodells zur Hairpin-Stator Entwicklung, Quelle: Eigene Darstellung.

Zusätzlich zum Modell der Hairpin-Stator Entwicklung werden der Vollständigkeit halber die Planungsphasen der Rotorfertigung und des Gehäuses integriert, um die Planungsphasen an die gemeinsamen Meilensteine des Referenz-PEP zu knüpfen. Auf eine genauere Beschreibung dieser Planungsphasen wird an dieser Stelle verzichtet.

Einen Überblick über das Gesamtprozessmodell mit den Phasen und Meilensteinen des Referenz-PEP aus der Automobilindustrie gibt Abb. 17. Es sei erwähnt, dass die Länge der Prozessphasen nicht maßstabsgetreu dargestellt ist und somit keine Aussage über die zeitliche Dauer der Prozessphasen über dieses Modell gegeben wird.

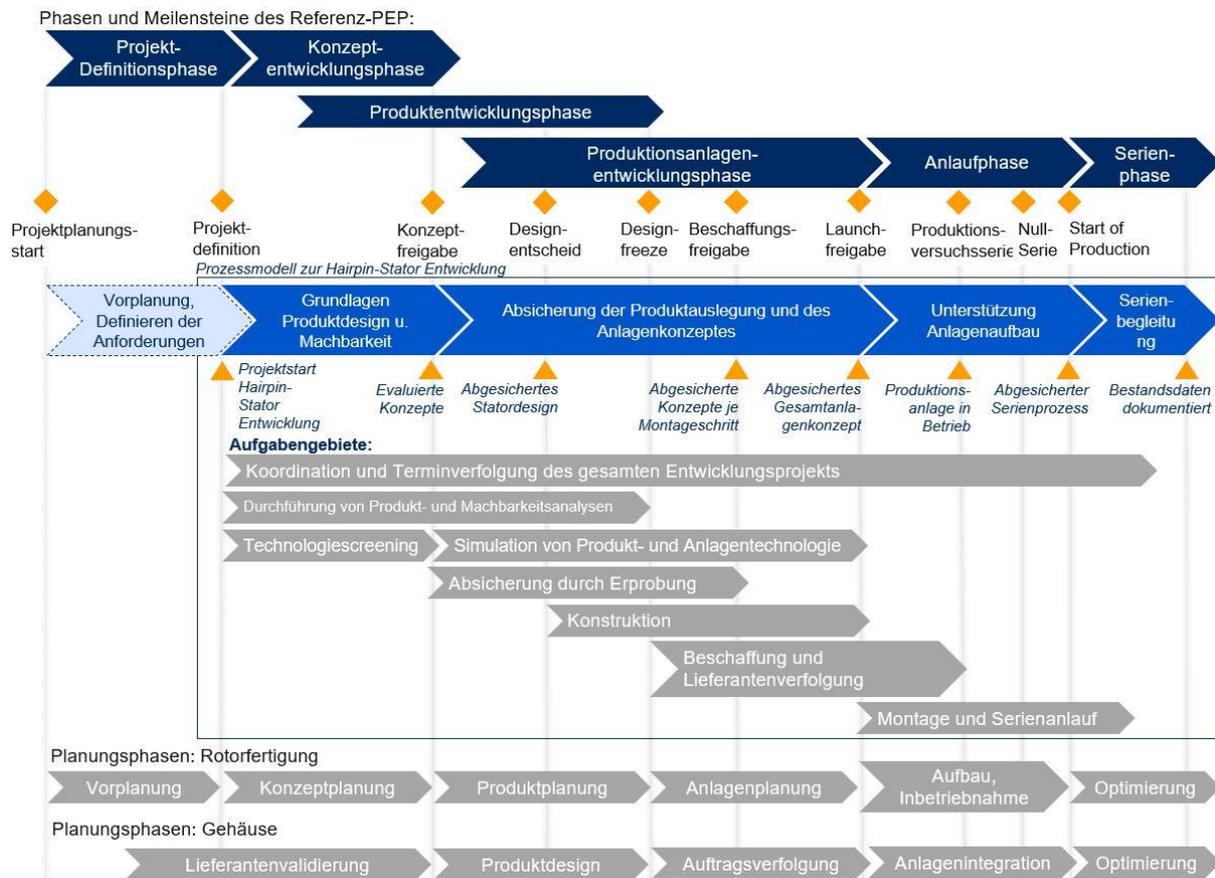


Abb. 17: Gesamtprozessmodell des Entwicklungsprozesses für den gesamten Elektromotor, Quelle: In Anlehnung an Kerber (2016), S. 160-164.

4 Analyse der Konzepte im Montageprozess

In diesem Kapitel wird die Grundlage für die Betrachtungen auf der Ebene der gesamten Montagelinie in der Simulation (siehe Kapitel 5) geschaffen. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit befinden sich noch alle Prozessschritte des Montageprozesses in der Entwicklungsphase. Die einzelnen Prozesse werden von unterschiedlichen Gruppen entwickelt, daraus resultiert eine fehlende Gesamtbetrachtung sowie eine fehlende Dokumentation über die Abhängigkeiten in der Prozesskette.

Zusätzlich existieren zu den einzelnen Prozessschritten mehrere unterschiedliche Konzepte, die ihren Ursprung einerseits firmenintern und andererseits bei Mitbewerbern haben. Diese Varianten sollen bei dieser Analyse grundlegend untersucht und eine bestmögliche Lösung je Montageschritt gefunden werden.

4.1 Methodik in der Analysephase

Aufgrund der Komplexität des gesamten Montageprozesses ist ein methodisches Vorgehen in der ersten Analysephase unerlässlich. Die komplexen Zusammenhänge fordern nach einer möglichst einfachen und eindeutigen Abbildung, denn „Komplexität kann man effizient nur mit Einfachheit begegnen.“²¹ Durch die vielen unterschiedlichen Prozessschritte (Siehe Kapitel 4.2) und den damit verbundenen unterschiedlich starken Auswirkungen auf Folgeprozesse müssen die jeweiligen Ein- und Ausgangsparameter je Prozessschritt klar definiert werden. Dies ist insofern von großer Bedeutung, als es sich bei der automatisierten Hairpin-Stator Produktion um einen völlig neuen Prozessablauf handelt, wo noch keine standardisierten Prozessschritte vorhanden sind. Die Beschreibung dieser Analysemethode erfolgt in Kapitel 4.1.1.

Zusätzlich ist in einem ersten Schritt der gesamte Produktionsprozess zu definieren, um eine Referenz für die Konzeptbetrachtungen je Montageschritt schaffen zu können. Dadurch werden die einzelnen Aufgaben der Statormontage in eine zeitliche Ordnung gebracht und ein Zusammenhang über den genauen Aufgabeninhalt gegeben. Durch den entstandenen

²¹ Mattmann (2017), S. 216.

Prozesszusammenhang wird eine gute Übersicht über die einzelnen Aufgaben sichergestellt.²²

Im zweiten Schritt ist auf der Prozessebene durch geeignete Methodik unter Berücksichtigung einer Vielzahl von Anforderungen eine geeignete Variante zu ermitteln. In der Phase der Prozessentwicklung ist es notwendig, die exakten Beziehungen zwischen den Prozesskriterien zu kennen und alle Anforderungen zu berücksichtigen. Dadurch wird es möglich, diese Anforderungen mit Bewertungskriterien zu verknüpfen und anhand dieser die am besten geeignete Variante für den Prozessschritt auszuwählen.²³ Eine Beschreibung dieser Analyse erfolgt in Kapitel 4.1.2.

Neben der Entscheidungsfindung auf Basis von technischen Prozesskriterien wird auf wirtschaftliche Kriterien im Sinne von Kostenanalysen eingegangen. Dies spiegelt sich in der Analyse der Investitionskosten wider. Im Investitionsprozess können die drei Hauptphasen Planungsphase, Realisations- oder Erstellungsphase und die Nutzungs- bzw. Betriebsphase unterschieden werden. Die Investitionsanalysen bei den Konzepten können der ersten der drei Phasen zugeschrieben werden: der Planungsphase, welche auch in die Anregungs- und Entscheidungsphase gegliedert werden kann.²⁴

4.1.1 SIPOC-Analyse

Die SIPOC-Analyse ist ein Werkzeug der Lean Six Sigma Technik und wird in frühen Projektphasen eingesetzt. Die einzelnen Buchstaben von SIPOC kommen aus dem Englischen und stehen für Supplier (Lieferant), Input (Eingangsgrößen), Process (Prozess), Output (Ausgangsgrößen) und Customer (Kunde). Da diese Analyse-Methode in der Literatur weniger verbreitet ist, wird in diesem Kapitel kurz darauf eingegangen.

Die Vorteile bei der Anwendung in frühen Projektphasen liegen in der klaren Abgrenzung der einzelnen Prozesse innerhalb der Prozesskette, einem raschen Überblick über den Gesamtprozess vor einer Detailbetrachtung im Sinne eines Top-Down Ansatzes, sowie einer klaren und strukturierten Dokumentation der Prozessparameter. Ein Nachteil kann in der

²² Vergl. Schuh/Stich (2012), S. 111.

²³ Vergl. Mattmann (2017), S. S. 215.

²⁴ Vergl. Götze (2014), S. S. 14.

intensiven Kommunikation mit den Prozessbeteiligten gesehen werden, die für diese Analyse notwendig ist, um alle Parameter zu identifizieren.

In der folgenden Analyse der Prozessschritte der Hairpin-Stator Montage wird nur ein Teil dieser Analyse verwendet, die Punkte Supplier und Customer kommen aus Gründen der Einfachheit nicht zur Anwendung. Somit werden nur die Eingangsparameter für den Prozessschritt, die Prozessparameter und die resultierenden Ausgangsparameter für Folgeprozesse identifiziert. Einen Überblick über die Grundstruktur dieser Analyse gibt Abb. 18.²⁵

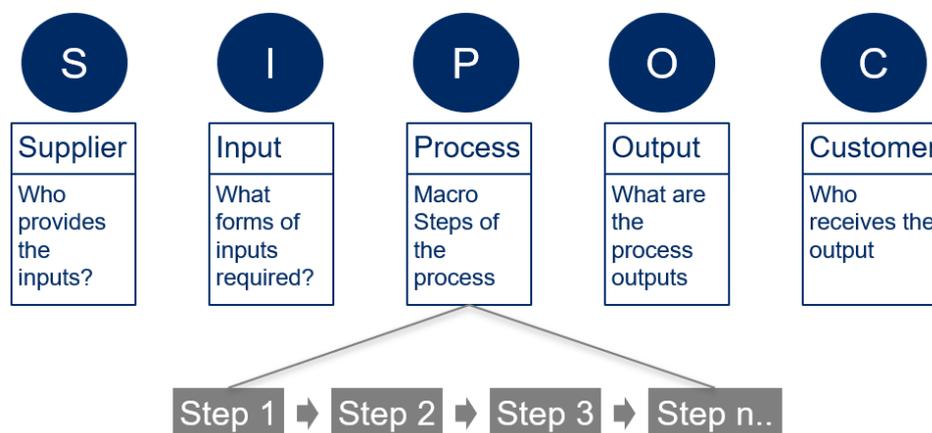


Abb. 18: Grundstruktur einer SIPOC-Analyse, Quelle:

Halimah/Smeaton/Shih/Velastin/Terutoshi/Nazlena/Ahmad (2019), S. 193.

4.1.2 Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse ist ein gängiges Tool, um aus mehreren Varianten mit definierten Bewertungskriterien und unterschiedlichen Gewichtungen durch subjektive Bewertungen eine bestmögliche Variante zu identifizieren. Auf eine nähere Beschreibung wird aufgrund der allgemeinen Bekanntheit und vielseitigen Verwendung an dieser Stelle verzichtet.

Im Kontext der Analysen in den folgenden Kapiteln wurde die Nutzwertanalyse auf unterschiedliche Stakeholder wie Entwicklung, Vertrieb und Prototypenbau ausgeweitet und deren Bewertungen je Kriterium mit den Parametern Gesamtanzahl an Bewertungen n [-] und Teilbewertungen x_i [-] arithmetisch gemittelt (Mittelwert \bar{x} , Formel 4.1), um möglichst viele Sichtweisen berücksichtigen zu können. Die Bewertungsskala wurde von eins (mangelhaft) bis

²⁵ Halimah/Smeaton/Shih/Velastin/Terutoshi/Nazlena/Ahmad (2019), S. 192-193.

fünf (sehr gut) festgelegt (siehe Tabelle 1). Zusätzlich dazu wurde aus den Bewertungen je Kriterium eine Standardabweichung s [-] errechnet (siehe Formel 4.1), um Rückschlüsse auf die Aussagefähigkeit der Bewertung und dem Verständnis der Teilnehmer über die bewertete Variante ziehen zu können. In diesem Fall wird von einer Normalverteilung der abgegebenen Bewertungen ausgegangen. Eine hohe Standardabweichung lässt somit auf eine größere Unsicherheit beziehungsweise fehlendes Wissen über das bewertete Konzept schließen. Bei den Auswertungen der Standardabweichung wird bei $s > 1$ auf eine hohe Unsicherheit geschlossen (rote Hintergrundfarbe), bei $0,5 < s < 1$ auf eine mittlere Unsicherheit (gelbe Hintergrundfarbe) und bei $s < 0,5$ auf eine geringe Unsicherheit (grüne Hintergrundfarbe).

Tabelle 1: Bewertungsskala für die Nutzwertanalysen, Quelle: Eigene Darstellung.

Bewertungsskala	Punktezahl
Mangelhaft	1
Genügend	2
Befriedigend	3
Gut	4
Sehr gut	5

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)^{26}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.2)^{27}$$

²⁶ Kohn (2005), S. 65.

²⁷ Kohn (2005), S. 74-76.

4.1.3 Kostenanalyse

Bei der Nutzwertanalyse sind die Bewertungskriterien vorrangig technischer Natur, aus diesem Grund werden die jeweils am besten bewerteten zwei Varianten in einem zweiten Schritt einer Kostenanalyse unterzogen. Dies ist nur dann sinnvoll, wenn bei dem jeweiligen Prozessschritt hohe Anfangsinvestitionen in die Montageanlage oder hohe Betriebskosten bei unterschiedlichen Stückzahlenszenarien anfallen werden.

Zur Beurteilung der relativen Vorteilhaftigkeit der Investition wird eine statische Kostenvergleichsrechnung, welche sich auf die jährlichen Periodenkosten (Zielgröße) bezieht, durchgeführt. Es wird die statische Vergleichsmethode gewählt, da eine explizite Periode in Form eines Geschäftsjahres mit der Zielgröße der Periodenkosten betrachtet wird. Die Kostenarten werden dabei in Kapital- und Betriebskosten unterteilt, um die Kostenabhängigkeit von der jährlichen Produktionsmenge und damit den variablen Teil zu berücksichtigen. Die Addition dieser Kostenkomponenten führt zu den Gesamtkosten je Alternative. Die Investition ist damit relativ vorteilhaft, falls die Periodenkosten geringer sind als die der anderen Objekte im Vergleich.²⁸

Einen Überblick über die verwendeten Kostenarten gibt Abb. 19.

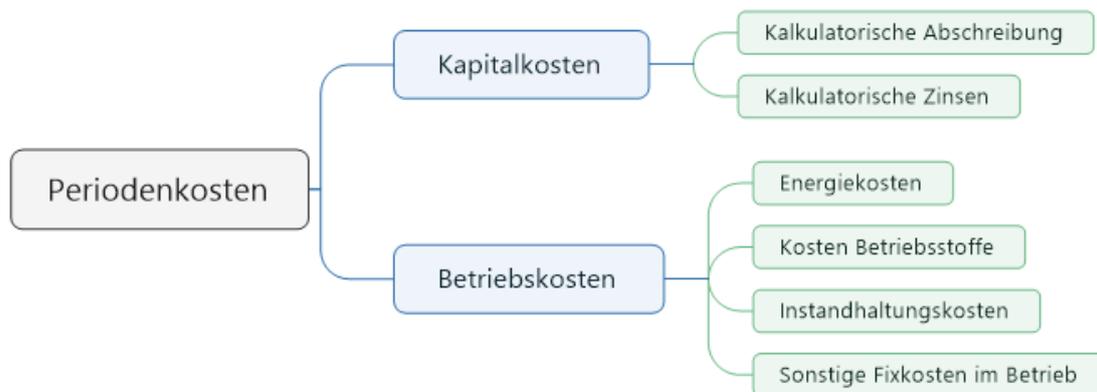


Abb. 19: Kostenarten der Periodenkosten, Quelle: in Anlehnung an Bauer (2019), S. 2-5.

Die Anfangsinvestitionskosten I_A [€] der untersuchten Systeme basieren auf Lieferantenpreise aus dem Einkauf der MAS von bereits realisierten Projekten und werden auf sechs Jahre

²⁸ Vgl. Götze (2014), S. 57-58.

abgeschrieben (Nutzungsdauer ND [a]), der kalkulatorische Zinssatz i_{kalk} [%] wurde mit 5,00% angenommen, da dieser Wert dem aktuell gültigen höchstens anzuwendenden Zinssatz für dieses Kalenderjahr entspricht (5,42 %) ²⁹. Der Berechnung der kalkulatorischen Abschreibung I_{AB} [€] sowie der kalkulatorischen Zinsen Z_{kalk} [€] mit Hilfe der Durchschnittsmethode liegen folgende Formeln zugrunde:

$$I_{AB} = \frac{I_A}{ND} \quad (4.3)^{30}$$

$$Z_{kalk} = \frac{I_A}{2} \times i_{kalk} \quad (4.4)^{31}$$

Zusätzlich zu den Periodenkosten werden die Leistungskosten, also die Kosten pro Stator bezogen auf die jeweilige Produktionsmenge pro Jahr errechnet, um einen Vergleich über verschiedene Produktionsmengen ziehen zu können.

4.1.4 Definition Stückzahlenszenarien

Die angesprochenen Produktionsmengen des vorigen Kapitels werden an dieser Stelle anhand vier Szenarien festgelegt, an denen die Konzepte untersucht werden. Anhand von Gesprächen mit dem Vertrieb und deren Erfahrungen aus dem Automotive-Umfeld wurden die nachfolgenden Skalierungsmengen aufgestellt. Die Szenarien zwei und drei entsprechen einer Anforderung für eine Kleinserienanlage, das letzte Szenario wird einer Großserienanlage zugeordnet. Diese Bezeichnungen finden sich in dieser Arbeit im Kapitel 5 bei den simulativen Betrachtungen der Gesamtanlage wieder. Eine Übersicht über die festgesetzten Stückzahlenszenarien für die Statorproduktion gibt Tabelle 2.

²⁹ Loepke (2020), Onlinequelle: [29.07.2021].

³⁰ Götze (2014), S. 60.

³¹ Götze (2014), S. 62.

Tabelle 2: Stückzahlenszenarien für die Statorproduktion, Quelle: Eigene Darstellung.

Szenario	Statoren pro Jahr
1	6.000
2	25.000
3	50.000
4	150.000

4.1.5 Definition Produktionszeiten

Die angestrebten Produktionszeiten für die Statorproduktion bilden die Basis zum einen für die Kalkulationen der erforderlichen Taktzeiten bei den jeweiligen Prozessschritten und zum anderen zur Validierung der Simulationsmodelle (siehe Kapitel 5), in dem die Produktionsmenge der simulierten Anlage pro Tag auf die Anzahl der Arbeitstage hochgerechnet wird.

Bei den bisherigen internen Planungen wurde eine dreischichtige Produktion mit sechs Arbeitstagen pro Woche und 48 Arbeitswochen angestrebt. Diese Annahmen werden in diese Arbeit übernommen, womit sich eine Produktionszeit von 288 Arbeitstagen pro Jahr ergibt. Um die Auswirkungen einer verminderten Anlageneffizienz in der Produktionszeit zu berücksichtigen, wird bei den Berechnungen der erforderlichen Taktzeiten eine niedrigere OEE (Abk. Overall Equipment Effectiveness / dt. Gesamtanlageneffektivität) von 75 % angenommen und mit der maximalen Produktionszeit multipliziert. Einen Überblick über die definierten Produktionszeiten gibt Tabelle 3.

Tabelle 3: Definierte Produktionsdaten zur Statorproduktion, Quelle: Eigene Darstellung.

Arbeitstage pro Arbeitswoche	6 [#/Woche]
Anzahl der Schichten	3 [#/Tag]
Arbeitsstunden pro Schicht	7,75 [h/Schicht]
Arbeitswochen	48 [#Jahr]
OEE	75 [%]
Maximale Produktionszeit t_{max}	6696 [h/Jahr]

4.1.6 Produktsegmentierung

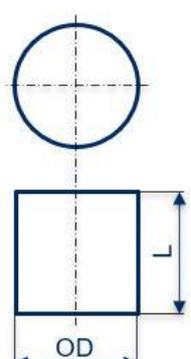
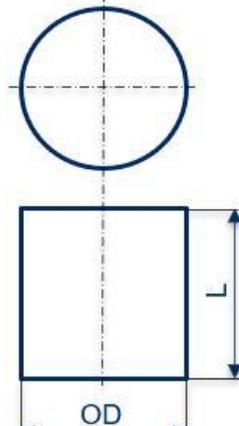
Nachdem der Hairpin-Stator hochgradig kundenspezifisch gefertigt wird, wurden zwei Produktkategorien identifiziert, welche die Produktvielfalt einschränken, um die Bewertungen der Konzepte je Montageschritt zielgerichteter gestalten zu können.

Für eine Unterscheidung in Produktgruppen wird eine Produktsegmentierung in einen Hochvolt-Stator und einen 48-Volt-Stator vorgenommen. Der Anwendungsbereich von Hochvolt-Statoren liegt dabei in reinen Traktionsantrieben bei Kraftfahrzeugen, welche derzeit großteils im elektrifizierten Antriebsstrang von PKW realisiert werden. Zukünftig sollen aber auch leichte und schwere Nutzfahrzeuge in das Portfolio des Hairpin-Statoren hinzukommen. Das zweite Produktsegment wurde mit dem 48-Volt-Stator festgelegt. Dieser kommt hauptsächlich als Hilfsbeziehungsweise Hybridantrieb in PKW oder als Antrieb für kleinere Kraftfahrzeuge, zum Beispiel sogenannte E-PTWs (Abk. E-Powered Two Wheelers), zum Einsatz. Durch die stark steigenden Produktionszahlen von Hybrid-Antrieben sowie prognostiziert hohen Produktionszahlen von E-PTWs in naher Zukunft, wird diesem Produktsegment in den nächsten Jahren besondere Bedeutung zukommen.

Das wichtigste Unterscheidungsmerkmal zwischen den beiden Produkten, welches sich am stärksten auf die Montageprozesse auswirkt, ist die Anzahl der Lagen (CPS). Beim 48-Volt-Stator liegt diese bei maximal sechs, beim Hochvolt-Stator allerdings bei bis zu zehn. Ein weiteres wichtiges Unterscheidungsmerkmal liegt in der Geometrie des Kupferflachdrahtes, ausgedrückt durch das Breite/Höhe-Verhältnis. Dieses Verhältnis liegt beim 48-Volt-Stator bei ungefähr eins, beim Hochvoltstator ist es allerdings meistens größer als zwei. Eine Übersicht über die Produktsegmentierung mit weiteren produktspezifischen Daten gibt Tabelle 4.

Die beiden Segmente stellen nun die Richtwerte für die vorliegende Arbeit bei den technischen Merkmalen für die einzelnen Fertigungsprozesse dar, welche dann in der Realität durch Kundenanforderungen mehr oder weniger stark abweichen.

Tabelle 4: Produktsegmentierung für die Konzeptbewertungen, Quelle: Eigene Darstellung.

48V-Stator		Hochvolt-Stator	
Anwendung: Hybridantriebe, Hilfsantriebe, Antrieb für kleinere Fahrzeuge (Three- und Fourwheeler, E-PTW)		Anwendung: Traktionsantrieb in PKW oder Nutzfahrzeugen	
			
Technische Daten		Technische Daten	
Außendurchmesser OD	130mm	Außendurchmesser OD	250mm
Länge Blechpaket L	80mm	Länge Blechpaket L	200mm
Nutanzahl N	72	Nutanzahl N	54
Leiter je Nut CPS	Max. 6	Leiter je Nut CPS	Max. 10
B/H-Verhältnis des Drahts	~ 1	B/H-Verhältnis des Drahts	>2
Anzahl „Körbe“	Max. 3	Anzahl „Körbe“	Max. 5
Masse m	~ 10kg	Masse m	~ 35kg
Isolationsmaterial des Drahtes	PAI	Isolationsmaterial des Drahtes	PEEK
Isolationsschichtdicke des Drahtes	<100µm	Isolationsschichtdicke des Drahtes	<200µm
Wirtschaftliche Daten		Wirtschaftliche Daten	
Verkaufspreis	~ 50€	Verkaufspreis	~ 200€

4.2 Gesamtübersicht über den Montageprozess

Der gesamte Montageprozess wird zu Beginn der Konzeptanalysen als Prozessablauf in Form eines Flussdiagrammes laut DIN 66001 dargestellt, um von den definierten Prozessschritten in weiterer Folge ausgehen zu können (siehe Abb. 20). Im ersten Schritt „Pin vorbereiten“ wird der Kupferflachdraht, welcher als Endlosmaterial auf einer Drahtrolle vorliegt, zu abgelängte und abisolierte Pins verarbeitet. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass der Prozessschritt „Kupferdraht abisolieren“ zeitlich vor oder nach dem Prozessschritt „Kupferdraht ablängen“ liegen kann. In einem zweiten Schritt „Pin biegen“ wird der gerade Pin mittels 2D- und 3D-Biegung in die gewünschte Kontur gebracht. Im dritten Prozessschritt „Statornuten isolieren“ wird jede Nut des Blechpakets mit Isolationspapier bestückt. Nach der Vormontage der gebogenen Pins zu einer

Hairpinlage kann im vierten Schritt „Hairpinlagen einsetzen“ das vormontierte Hairpinpaket mit dem Blechpaket gefügt werden. Nach dem fünften Schritt „Drahtenden twisten“, wo die geraden Pin-Enden gegenläufig verschränkt werden, werden die Pin-Enden als Vorbereitung für den Schweißprozess gereinigt („Drahtenden reinigen“). Dieser Schritt ist bis jetzt in der Prozessentwicklung und in bereits realisierten Prototypanlagen noch nicht fundamental berücksichtigt. Im Montageschritt „Drahtenden kontaktieren“ werden die freien Pin-Enden sowie die Verschaltelemente verschweißt. Im finalen Schritt muss der Stator noch isoliert, imprägniert sowie elektrisch getestet werden. Diese Prozessschritte werden in dieser Arbeit jedoch nicht näher analysiert, da sie aus strategischen Gründen in Form von kompletten Anlagen zugekauft und in die Gesamtanlage integriert werden.

Im Flussdiagramm sind zwei entscheidende Qualitätskontrollen jeweils nach den Biegeumformungen ersichtlich. Fehlerhafte Biegeprozesse können einerseits durch schwankende Materialqualität des Lackdrahtes und andererseits durch unkontrollierte Prozessführung der Umformung hervorgerufen werden. Dies resultiert wiederum in fehlerhaften nachgelagerten Prozessen wie das Vormontieren der Hairpins oder das Twisten, da der Pin durch Fehlstellungen nicht in die Werkzeuge eingeführt werden kann. Ein fehlerhafter Twistprozess ist dadurch gekennzeichnet, dass sich einzelne Pins aus dem Twistwerkzeug lösen und dadurch nicht die definierte Endposition für den Schweißprozess erreichen.

Hairpin-Stator-Produktionsprozess

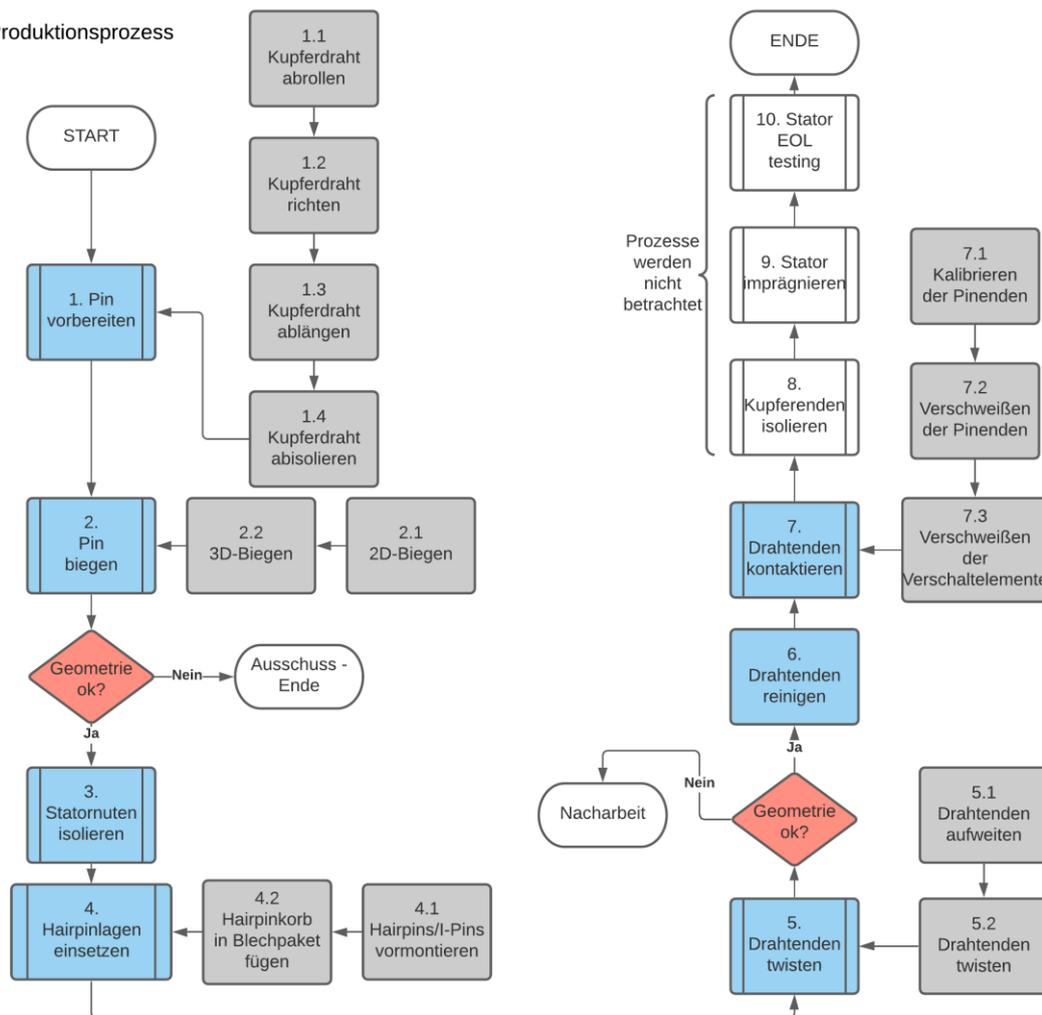


Abb. 20: Flussdiagramm der Hairpin-Stator Montage, Quelle: Eigene Darstellung.

4.2.1 Abhängigkeiten zwischen den Prozessschritten

Bei der übergeordneten Gesamtbetrachtung des Montageprozesses ergeben sich in weiterer Folge Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Prozessschritten, welche in Form von Fehlertypen, den Auswirkungen sowie potenziellen Ursachen identifiziert werden können. Dabei sind zwei Prozessschritte hervorzuheben, welche besonders stark von Vorprozessen beeinflusst werden.

Der wichtigste Prozessschritt für die Funktionsfähigkeit des Stators ist das Kontaktieren, also das Verschweißen der Drahtenden. Entstandene Fehler bei vorgelagerten Prozessen können dazu führen, dass bereits eine fehlerhafte Schweißstelle zum Gesamtausfall des Stators im Betrieb führen wird. Einen großen Einfluss auf das Schweißergebnis hat hierbei das Ablängen des Kupferdrahtes. Bleibt beim Schneid- oder Stanzprozess ein Grat zurück, führt dies zu einer

fehlerhaften Erkennung der Schweißzone durch die Erkennungssoftware und es entsteht eine unregelmäßige Schweißverbindung. Einen weiteren signifikanten Einfluss stellen organische Isolationsrückstände vom Abisolierprozess dar, welche zu qualitativ schlechten Schweißpunkten führen, bestehend aus Poren und Luftporen.³²

Aufgrund der hohen Abhängigkeit des Schweißprozesses von Vorprozessen hinsichtlich Sauberkeit, wurde der separate Prozessschritt „Drahtenden reinigen“ implementiert, welcher direkt vor dem Schweißen sämtliche Restschmutzpartikel in der Schweißzone entfernen soll (siehe Kapitel 4.8).

Ein weiterer kritischer Prozessschritt ist das „Pin-Enden twisten“, welcher ebenfalls von vielen Vorprozessen direkt beeinflusst wird. Den stärksten Einfluss übt der Biegeprozess aus, also die Formgebung der Pins. Wird kein stabiler Biegeprozess mit engen Formtoleranzen sowie beschädigungsfreien Biegeradien sichergestellt, befinden sich die geraden Pin-Enden nicht in der definierten Position für das Twistwerkzeug. Die beschriebenen Abhängigkeiten dieser vier Prozessschritte sind aus der Abhängigkeitsmatrix in Abb. 21 abzuleiten. Von den Folgeprozessen weisen die Prozesse Schweißen und Twisten die höchsten Spaltensummenwerte auf. Die Matrix ist so zu verstehen, dass die Prozessschritte in den Zeilen immer mit den Folgeprozessen in den Spalten zu kombinieren sind, um die Intensität der Abhängigkeit zu identifizieren. Die Zahl drei weist auf eine starke Abhängigkeit hin, die Zahl null auf keine Abhängigkeit der betrachteten Prozesse (siehe Abb. 21).

Diese Abhängigkeitsmatrix aus der Prozesskette der Hairpin-Stator Produktion entspricht nur zum Teil der Definition einer klassischen Einflussmatrix. In einer Einflussmatrix geht es um die Wechselwirkungen der Elemente und in weiterer Folge um die Aussage, ob eine Größe bestimmend (aktiv) oder von anderen beeinflusst wird (passiv). Die Information über eine aktive Größe wird über die Zeilensummen gewonnen, über eine passive Größe gibt die Spaltensumme Auskunft. Die logische Richtung der Matrix wird üblicherweise so festgelegt, dass die Wirkung der Einträge in den Zeilen auf die Einträge in den Spalten dargestellt wird.³³

In der erstellten Abhängigkeitsmatrix ist die logische Richtung per Definition gleich und die

³² Vgl. Kampker/Treichel/Kreiskother/Krebs/Kleine Buning (2018), S. 5-7.

³³ Lindemann (2009), S. 75-77.

Spaltensumme liefert die Information über die Stärke der Beeinflussung von Vorprozessen. Einzig die Wechselwirkung kann nicht dargestellt werden, da beispielsweise der Prozessschritt Drahtenden twisten keinen Einfluss auf die vorgelagerten Prozesse ausübt.

		Folgeprozesse											
		Kupferdraht richten	Kupferdraht abisolieren	Kupferdraht ablängen	Pin biegen	Statornuten isolieren	Hairpins vormontieren	Hairpinlagen einsetzen	Drahtenden aufweiten	Drahtenden twisten	Drahtenden reinigen	Verschweißen der Pin-Enden	Verschweißen der Verschaltetelemente
Prozessschritt	Kupferdraht richten		1	0	2	0	1	2	1	2	0	1	0
	Kupferdraht abisolieren			0	0	0	0	0	0	0	0	3	3
	Kupferdraht ablängen				1	0	1	1	1	2	1	3	3
	Pin biegen					0	1	2	1	3	0	3	2
	Statornuten isolieren						0	2	0	0	0	0	0
	Hairpins vormontieren							2	0	0	0	0	0
	Hairpinlagen einsetzen								2	2	0	0	0
	Drahtenden aufweiten									2	0	0	0
	Drahtenden twisten										0	3	3
	Drahtenden reinigen											3	2
	Verschweißen der Pin-Enden												2
	Verschweißen der Verschaltetelemente												
	Σ	0	1	0	3	0	3	9	5	11	1	16	15

3 Starke Abhängigkeit
2 Mittlere Abhängigkeit
1 Geringe Abhängigkeit
0 Keine Abhängigkeit

Abb. 21: Einflussmatrix der einzelnen Prozessschritte, Quelle: In Anlehnung an Kampker/Treichel/Kreiskother/Krebs/Kleine Buning (2018), S. 6.

4.2.2 Identifikation kritischer Prozessschritte

Die Identifikation von Prozessschritten für eine detaillierte Analyse in den nachfolgenden Kapiteln ist aus der Abhängigkeitsmatrix aus Abb. 21 abzuleiten. Der Prozessschritt Verschweißen der Pin-Enden weist von fünf Vorprozessen eine starke Abhängigkeit auf und wird daher genauer betrachtet, da auch die Funktionsfähigkeit des Stators signifikant von diesem Prozessschritt abhängt. Vom Prozessschritt Drahtenden twisten ist ebenfalls eine starke Abhängigkeit von Vorprozessen abzuleiten aufgrund der hohen Spaltensumme von elf. Die vorgelagerten Prozesse, welche die stärksten Auswirkungen auf die beiden genannten ausüben, sind Kupferdraht abisolieren (starke Abhängigkeit zum Schweißen), sowie das Pin biegen (starke Abhängigkeit zum Twisten und Schweißen).

Zusammengefasst werden folgende Prozessschritte für eine detaillierte Fehleranalyse und einen Konzeptvergleich mittels Nutzwertanalyse identifiziert:

- Kupferdraht abisolieren
- Pin biegen
- Drahtenden twisten
- Verschweißen der Pinenden

Aufgrund von hohen Investitionskosten in die Produktionsanlagen und unklaren Auswirkungen auf Stückzahlenszenarien wurden folgende Prozessschritte für eine detaillierte Kostenanalyse identifiziert:

- Kupferdraht abisolieren
- Verschweißen der Pinenden

4.3 Pin vorbereiten

Der Prozess „Pin vorbereiten“ gliedert sich in vier Prozessschritte, welche von einem rechteckigen Kupferlackdraht in Form von Endlosmaterial einen abgelängten Pin erzeugen, um im nächsten Schritt einen Hairpin oder I-Pin biegen zu können. Eine Übersicht über die Prozessschritte gibt Abb. 22. Diese Prozesskette wird meist in einem Anlagenverbund realisiert, aus diesem Grund wurden diese Schritte zu einem Prozess zusammengefasst. Bevor auf die einzelnen Prozessschritte eingegangen wird, wird das Ausgangsmaterial analysiert, da dies die gesamte Prozesskette beeinflusst und stark vom Drahtlieferanten abhängig ist.

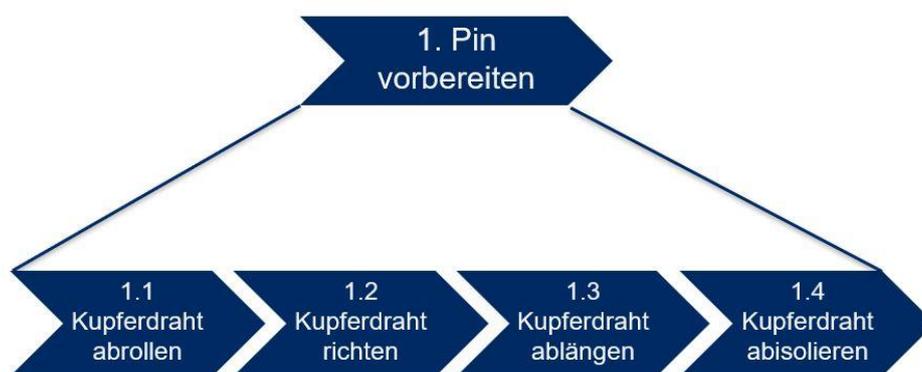


Abb. 22: Prozesskette „Pin vorbereiten“, Quelle: Eigene Darstellung.

4.3.1 Analyse des Ausgangsmaterials Kupferlackdraht

Das Ausgangsmaterial für die Formstabtechnologie wird aus einem Halbzeug, einem Vordraht aus Kupfer (DIN EN 1977), durch Ziehen, Walzen oder Strangpressen und einem anschließenden Aufbringen der Isolierung mittels Extrudierens oder in Form von Sprühdüsen

zu einem Flachdraht verarbeitet. Der Flachdraht liegt als Endlosmaterial vor und wird auf Rollen aufgewickelt. Als Isoliermaterial werden meist Beschichtungen auf Polyesterimid-, Polyimid- oder Polyamidimid-Basis eingesetzt.³⁴

In der MAS wird hauptsächlich Kupferflachdraht mit Polyamidimid (Abk. PAI) oder Polyetheretherketon (Abk. PEEK) als Isolationsschicht verwendet. Dabei ergeben sich einerseits Form- und Lagetoleranzen sowie Geometrietoleranzen des Querschnittes und andererseits Abweichungen von mechanischen Werkstoffkenngrößen wie Zugfestigkeit und Bruchdehnung. Die Geometrietoleranzen wirken sich im Prozess „Pin vorbereiten“ und die Abweichungen im Werkstoffverhalten im Prozess „Pin biegen“ sehr stark aus, wodurch eine Sicherstellung der Qualität des Drahtlieferanten für eine gute Prozessführung von Bedeutung ist. Bereits bekannte Qualitätsabweichungen beim Flachdraht sind in Abb. 23 ersichtlich.



Abb. 23: Qualitätsabweichungen im Querschnitt des Kupferflachdrahtes, Quelle: MAS Firmenunterlagen.

Die angegebenen Geometrietoleranzen sind meist sehr klein und liegen im Hundertstelbereich. Es hat sich allerdings gezeigt, dass die Toleranzen von den Drahtherstellern um ein Vielfaches überschritten werden, beziehungsweise über die Gesamtlänge einer Drahtrolle sehr stark variieren. Diese Tatsache zeigt, dass eine große Abhängigkeit vom Drahtlieferanten besteht, welcher durch Absicherungen wie statistische Qualitätskontrollen begegnet werden muss. Abb. 24 zeigt die Toleranzfelder der Querschnittsabmessungen 4,00x2,00mm aus der Norm DIN EN 60317-0-2 für technische Lieferbedingungen für bestimmte Typen von Wickeldrähten.

³⁴ Vgl. Wirth/Hofmann/Fleischer (2019), S. 2-5, Onlinequelle: [16.05.2021].

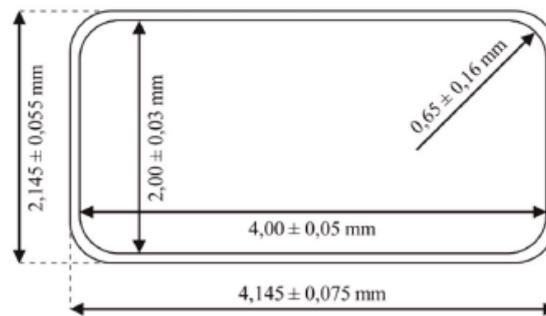


Abb. 24: Querschnittsabmessungen mit Toleranzen laut DIN EN 60317-0-2 für Kupferflachdraht 4,00x2,00mm, Quelle: Felix Wirth/Tarik Kirgor/Janna Hofmann/Jurgen Fleischer (2018), S. 2.

4.3.2 Kupferdraht abrollen

Das Abrollen des Kupferdrahtes im ersten Schritt ist in Abb. 25 als Prinzipskizze dargestellt. Durch eine Antriebseinheit (rote Pfeile) erfährt der Draht eine kontinuierliche Vorschubbewegung. Der sogenannte Drahttänzer (grün) gleicht die Stillstände des Drahtes aufgrund des nachgelagerten, getakteten Prozessschritts „Kupferdraht ablängen“ durch eine vertikale Bewegungsmöglichkeit aus. Die Gewichtseinstellung des Drahttänzers kann variiert werden, und ist für eine ruhige Drahtführung verantwortlich. Da dieser Prozessschritt als weniger kritisch eingestuft wurde und keine Konzeptalternativen notwendig sind wird an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen.

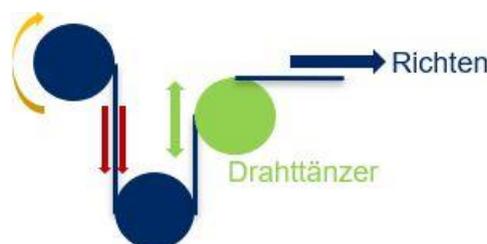


Abb. 25: Prinzipskizze Kupferdraht abrollen, Quelle: Eigene Darstellung.

4.3.3 Kupferdraht richten

Das Ziel des Richtens ist es, einen geraden Kupferflachdraht ohne Restkrümmungen oder Verwindungen, welche vom Aufspulen auf der Drahtrolle herrühren, für das Ablängen des Drahtes bereitzustellen. Für diesen Prozess kommen Richrollen in horizontaler und vertikaler Anordnung zum Einsatz, um jeweils die Höhe und Breite des Drahtes auszurichten. Da in der Literatur über diesen Prozess bei der Hairpinerzeugung noch sehr wenig verfügbar ist, muss dabei auf firmeninterne Erfahrungen zurückgegriffen werden.

Die Anzahl der Richtrollen, welche der Draht durchläuft, ist mit sieben bis maximal elf festgelegt. Abb. 26 zeigt schematisch den Aufbau des Richtapparates. Die wichtigste Aufgabe erfüllen die ersten beiden Richtrollen, da sie für die plastische Verformung des Drahtes aufkommen und so das Ergebnis wesentlich beeinflussen.

Diese Verformung muss im plastischen Bereich, also über der Streckgrenze des Kupfers stattfinden, damit die Biegerichtung nach Rückfederungseffekten erhalten bleibt. Generell gilt, je mehr Richtrollen je Seite zum Einsatz kommen, desto exakter und spannungsfreier wird das Richtergebnis. Die Verformung des Drahtes ist somit nach den ersten beiden Drahtrollen am höchsten und nimmt mit den nachfolgenden Richtrollen ab.³⁵

Die einzelnen Rollen können mit einem Verstellmechanismus in Drahtrichtung eingestellt werden, um das Richtergebnis zu beeinflussen. Für jede Drahtrolle muss die Einstellung der Richtrollen manuell durchgeführt werden, dies dauert aus Erfahrungswerten der MAS bis zu einer halben Stunde und muss bei der Taktzeit, beziehungsweise der Berechnung der Anlagenverfügbarkeit berücksichtigt werden. Im Hinblick auf die Digitalisierung der Produktion wird angestrebt, die Einstellung der Richtrollen gekoppelt mit einer Echtzeitmessung des Richtergebnisses automatisch vorzunehmen und somit Zeit und Effizienz zu gewinnen und auf Schwankungen in der Drahtqualität besser eingehen zu können.

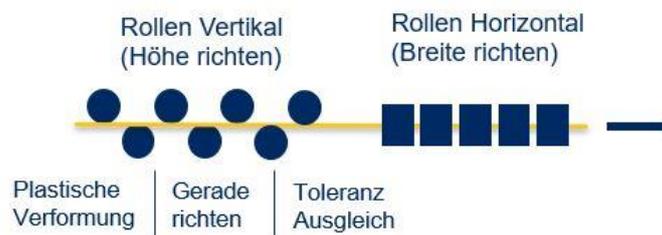


Abb. 26: Prinzipskizze Kupferdraht richten, Quelle: Eigene Darstellung.

4.3.4 Kupferdraht abblängen

Das Ziel dieses Prozessschrittes ist es, den Kupferdraht unter gleichbleibender Qualität der Schnittfläche, geringer Gratbildung und geringer Taktzeit mit einer zulässigen Längenabweichung von $\pm 0,05$ mm abzulängen. Diese Länge stellt die gestreckte Länge vor dem Biegeprozess dar.

³⁵ Vgl. Riedel/Masuch/Weigelt/Gläßel/Kühl/Reinstein/Franke (2018), S. 1-2.

Durch die Anwendung einer SIPOC-Analyse wurden die folgenden Prozessparameter identifiziert (siehe Abb. 27).



Abb. 27: SIPOC-Analyse Kupferdraht ablängen, Quelle: Eigene Darstellung.

Für das Trennen des Kupferdrahtes kommen verschiedene Technologien infrage, wie zum Beispiel Scherschneiden, Stanzschneiden, Feinschneiden, Laserschneiden oder Hochleistungssägen. Aus bisherigen Erfahrungen der MAS und der Literatur kann das Scherschneiden und das Stanzschneiden für diesen Prozessschritt als geeignet eingestuft werden. Mögliche Fehler, die auftreten können, sind Haarrisse im Schneidquerschnitt, Deformation der Drahtgeometrie und Gratbildung. Letzteres wirkt sich signifikant auf die Qualität des Schweißprozesses aus (siehe Kapitel 4.2.1) und ist unter allen Umständen zu Vermeiden, beziehungsweise auf ein Minimum zu reduzieren.³⁶

Darüber hinaus muss beim Ablängprozess eine Fase an den Schnittflächen gefertigt werden, um die nachgelagerten Prozesse „Hairpinlagen einsetzen“, „Drahtenden twisten“ und „Drahtenden kontaktieren“ zu erleichtern. Die Fase erleichtert das Vormontieren sowie das Einsetzen der Hairpinlagen in das Blechpaket und vor allem das Twisten, wenn die Hairpin-Enden in das Twistwerkzeug gelangen müssen. In Abb. 28 sind die Schnittgeometrie mit den charakteristischen Größen Grathöhe h_c , Risshöhe h_r und Risstiefe t_r sowie schematische Schneid- und Stanztechnologien ersichtlich.

³⁶ Vgl. Kampker/Treichel/Kreiskother/Krebs/Kleine Buning (2018), S. 5-6.

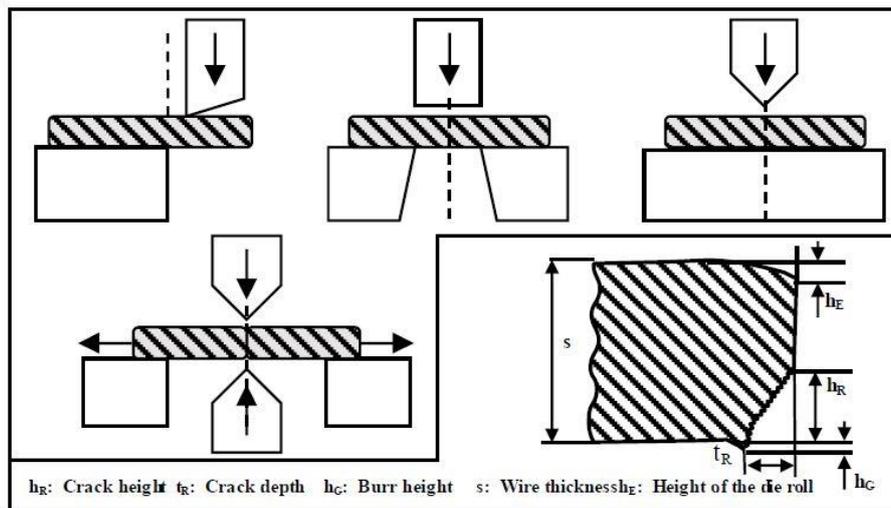


Abb. 28: Schneid- und Stanztechnologien mit Schnittgeometrie, Quelle:
Kampker/Treichel/Kreiskother/Krebs/Kleine Buning (2018), S. 5.

4.3.5 Kupferdraht abisolieren

Der Prozessschritt „Kupferdraht abisolieren“ ist notwendig für den Kontaktierungsprozess der einzelnen Hairpins. Da die Kontaktierung durch einen Schweißprozess realisiert wird, muss die Schweißzone frei von organischen Rückständen sein, um eine qualitativ hochwertige und langzeitstabile Schweißnaht erzeugen zu können. Durch verdampfende Isolationsrückstände während des Schweißprozesses wäre dies nicht gewährleistet.³⁷

Für die Aufgabe, die Isolationsschicht des Lackdrahtes zu entfernen, gibt es in der aktuellen Entwicklungsphase noch unterschiedliche Konzepte, die für diesen Prozessschritt in Frage kommen. Sie unterteilen sich in thermisches, mechanisches oder laserbasiertes Abtragen der Isolationsschicht.

Beim thermischen Verfahren wird der Draht in die Mitte einer induktiven Spule bewegt und durch hochfrequenten elektrischen Wechselstrom erwärmt. Durch die sprunghafte Erwärmung der Isolationsschicht verbrennt der Kunststoff und das Kupfer bleibt zurück. Das Verfahren würde durch das kontaktlose und schnelle Arbeitsprinzip Potential für einen Serienprozess zeigen. Durch unakzeptable Nachteile für die MAS wie Rückstände des verbrannten Materials, Beschädigung der restlichen Isolierung und starke Oxidation des Kupfers durch den hohen

³⁷ Vgl. Riedel/Masuch/Weigelt/Gläßel/Kühl/Reinstein/Franke (2018), S. 2.

Wärmeeintrag wird dieses Konzept nicht weiter betrachtet. Bei den laserbasierten Verfahren wird zwischen langwelliger Infrarotstrahlung, wo sehr hohe Abtragraten erzielt werden können (Abk. LWIR; CO₂-Laser, 10.200 nm Wellenlänge) und kurzwelliger Infrarotstrahlung (Abk. SWIR, Faser- oder Scheibenlaser, 1.000 nm Wellenlänge) unterschieden. Da aus physikalischen Gründen der Laser nur bis zur halben Wellenlänge des Laserlichtes abtragen kann, bleibt bei langwelligem Laserverfahren eine Restschicht von ca. 5 µm, welche ein zweistufiges Verfahren nötig macht. Im zweiten Schritt wird meist mit einem kurzwelligen Faserlaser die Restschicht entfernt. Bei kurzwelligen Laserverfahren ist eine verbleibende Restschicht von 0,5 µm zulässig und somit ein einstufiger Prozess realisierbar. Bei den mechanischen Verfahren zeigen das Abschälen und das Abtragen mit metallischen Bürsten Potential für die Serie. Durch die undefinierte Abisolierkante und einer geringen Reproduzierbarkeit durch den Bürstenverschleiß weisen metallische Bürsten jedoch einen erheblichen Nachteil auf. Gleiches gilt für das mechanische Abschälen, bei diesem Verfahren wird die Isolationsschicht mit Hilfe von scharfen, metallischen Klingen in Drahrichtung abgetragen.³⁸

Darüber hinaus kann die Isolierschicht mit den etablierten spanabhebenden Verfahren wie Fräsen oder Räumen mechanisch entfernt werden und kommt teilweise von Mitbewerbern in der Hairpin-Stator Produktion zur Anwendung. Die großen Nachteile finden sich im Verschleiß der Werkzeuge, dem notwendigen festen Spannen des Drahtes bei der Bearbeitung und der damit verbundenen Beschädigung der restlichen Isolierung, sowie in der Verschmutzung der Gesamtanlage durch Späne. Einen Überblick über die Systeme, welche für diesen Prozessschritt in Betracht gezogen werden können, gibt Tabelle 5.

Das Abisolieren ist ein kritischer Prozessschritt hinsichtlich Taktzeit und Sauberkeit in der Prozessführung. Das eingesetzte Verfahren sollte somit eine hohe Abtragate aufweisen und ein reproduzierbares und sauberes Abtragsergebnis liefern. Die Länge in Drahrichtung, welche abisoliert werden muss, lässt sich aus der Temperaturverteilung des Schweißprozesses ableiten. Diese richtet sich nach jener Temperatur, welche beim Isolationsmaterial keine Schädigung mehr hervorruft und liegt zwischen acht und zwölf Millimeter. Zusätzlich muss ein definierter Übergang zwischen dem isolierten und abisolierten Bereich gewährleistet werden, da am Ende der

³⁸ Vgl. Glaessel/Seefried/Kuehl/Franke (2020), S. 4-6.

Prozesskette die freien Leiter wieder isoliert werden müssen.³⁹

Tabelle 5: Übersicht über mögliche Abisolierverfahren, Quelle: 1) Glaessel/Seefried/Kuehl/Franke (2020), S. 5.; 2) Firmenunterlagen MAS.

Abtragverfahren	Thermisches Abtragen	Mechanisches Abtragen				Laserbasiertes Abtragen		
Verfahren	Induktives Abbrennen	Fräsen	Räumen	Abschälen	Metallische Bürsten	CO2 + Faserlaser	Faserlaser	Scheibenlaser
Anwendung	Literatur	Konkurrenz	Miba, Konkurrenz	Konkurrenz	Literatur	Miba, Konkurrenz	Miba, Konkurrenz	Miba, Konkurrenz
Prinzip-skizze	1)	2)	2)	1)	1)	1)		
Vorteile	Kontaktfrei, Kurze Prozesszeit	Wenig Restschmutz, geringe Kosten	Wenig Restschmutz, geringe Taktzeit	Wenig Restschmutz, einfache Anwendung	Einfache Anwendung, geringe Kosten	Sehr saubere Oberfläche, Kontaktfreie Methode	Sehr saubere Oberfläche, Kontaktfreie Methode, geringe Taktzeit	
Nachteile	Restschmutz, Beschädigung Isolation, hohe Oxidation	Ver-schleiß, Spannen des Werkstücks, Späne	Verschleiß, Spannen des Werkstücks, Späne	Verschleiß der Schneiden	Keine definierte Abisolierkante	Taktzeit (Zweistufig), aufwendige Anwendung	Aufwendige Anwendung, hohe Investitionskosten	

4.3.5.1 Konzeptauswahl „Kupferdraht abisolieren“

Im ersten Schritt wurde der Prozessschritt durch die SIPOC-Analyse klar abgegrenzt (siehe Abb. 29). Neben den Eingangsparametern, die durch den Kupferlackdraht charakterisiert werden, sind bei den Ausgangsparametern die organischen Rückstände, die Beschädigung der restlichen Isolierung, eine definierte Abisolierkante sowie die scharfen Kanten des abisolierten Kupferleiters hervorzuheben. Sämtliche Parameter des Prozessschrittes „Kupferdraht abisolieren“ sind in Abb. 29 zusammengefasst.

Bevor die Konzepte bewertet werden können, werden im zweiten Schritt die Bewertungskriterien mit unterschiedlichen Fachabteilungen festgelegt, welche vom eingesetzten System erfüllt werden müssen. Die wichtigsten Kriterien sind die Sauberkeit und eine hohe Abtragrate, da sie für einen stabilen Serienprozess unerlässlich sind. Aus der elektrotechnischen Auslegung des Stators ist bekannt, dass scharfe Kanten im Kupferleiter sich negativ auf den elektromagnetischen Fluss

³⁹ Vgl. Gläsel (2020), S. 55–56.

auswirken und als wichtiges Kriterium berücksichtigt werden muss. Der Abtrag von Kupfermaterial beim Abisolieren, also eine Verringerung des Leiterquerschnittes, ist zu berücksichtigen, da dies den Schweißspalt zwischen dem Pinpaar vergrößert, wird aber bei einer maximalen Verringerung von ca. 20 % aus elektrotechnischer Sicht als weniger bedeutend eingestuft. Weitere Kriterien aus Sicht der Prozessentwicklung wurden mit der Genauigkeit der abisolierten Länge und der Beschädigung der Isolierung im Abisolierbereich identifiziert. Das Bewertungskriterium Kosten bezieht sich im Gesamten auf die Investitionskosten des betrachteten Systems. Im Anhang (1) sind die Kriterien ersichtlich, welche mit Hilfe eines paarweisen Vergleiches für die spätere Nutzwertanalyse gewichtet wurden.



Abb. 29: SIPOC-Analyse “Kupferdraht abisolieren”, Quelle: Eigene Darstellung.

Ergebnisse Nutzwertanalyse

Bei der Nutzwertanalyse wurden alle mechanischen und laserbasierten Verfahren, also sieben Varianten durch sieben Teilnehmer bewertet. Das thermische Abtragen wurde aufgrund von unvereinbaren Nachteilen für die MAS (hoher organischer Restschmutzanteil, keine definierte Abisolierkante, Oxidation) nicht weiter betrachtet.

Nach der Auswertung der Gesamtnutzwerte hat sich klar gezeigt, dass die laserbasierten Verfahren deutlich besser bewertet wurden als die mechanischen. Die Konzepte „Abschälen“ und „metallische Bürsten“ sind durch den deutlich schlechten Gesamtnutzwert zu vernachlässigen. Hervorzuheben sind die hohen Teilnutzwerte der laserbasierten Konzepte hinsichtlich Sauberkeit beim Abisolieren und keine scharfen Kanten sowie kein Abtrag des Kupfermaterials beim Kupferleiter. Bei diesen Kriterien sind die Verfahren mittels Laser den mechanischen Verfahren deutlich überlegen.

Der größte Nachteil im Serienprozess bei mechanischen Abtragverfahren zeigt sich in der

Verschmutzung der zähelastischen Lackteilchen in den Werkzeugen und damit kurzen Wartungsintervallen. Außerdem wird für die direkte mechanische Bearbeitung ein stabiler Kupferquerschnitt für die Bearbeitungskräfte vorausgesetzt, um eine plastische Verformung des Drahtes zu verhindern.⁴⁰ Zusätzlich steht das Abtragwerkzeug in direktem Kontakt mit dem Draht, woraus eine direkte Abhängigkeit des Abisolierergebnisses zu den Drahttoleranzen und dem Richtergebnis besteht. Im Serienprozess führt diese Tatsache unweigerlich zu einer Verringerung der Prozessstabilität im Falle einer fehlenden Beherrschung der beiden erwähnten Abhängigkeiten. Die detaillierten Auswertungen sind dem Anhang (1) zu entnehmen, eine Zusammenfassung über die Gesamtnutzwerte der jeweiligen Systeme gibt Tabelle 6.

Tabelle 6: Ergebnisse Nutzwertanalyse “Kupferdraht abisolieren”, Quelle: Eigene Darstellung.

Rang	Konzept	Gesamtnutzwert
1	Faserlaser	388,52
2	CO2 + Faserlaser (Zweistufig)	380,61
3	Scheibenlaser	373,9
4	Fräsen	353,15
5	Räumen	327,47
6	Abschälen	309,61
7	Metallische Bürsten	257,99

Die Auswertung der Standardabweichung aus den normalverteilten Bewertungen zeigt, dass die Verfahren mittels Laser von der MAS sehr stark zum Einsatz kommen und dadurch sehr bekannt sind, da die Bewertungen großteils eindeutig ausfielen und somit eine ausreichende Qualität der Bewertungen vorliegt. Dem gegenüber liegen die mechanischen Verfahren, besonders das Konzept Abschälen, welches große Schwankungen der Bewertungen aufweist und daher weniger aussagekräftig ist. Eine Übersicht über die Mittelwerte und Standardabweichungen der Konzepte beim Abisolieren gibt Tabelle 7.

⁴⁰ Vgl. Spreng (2020), S. 19–20.

Tabelle 7: Mittelwert und Standardabweichung der Nutzwertanalyse “Kupferdraht abisolieren”,

Quelle: Eigene Darstellung.

	Konzept Laser						Konzept Räumen		Konzept Fräsen		Konzept Abschälen		Konzept metallische Bürsten	
	Scheibenlaser		CO2 + Faserlaser (Zweistufig)		Faserlaser									
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
Keine Rückstände/Sauberkeit	4,14	0,58	4,64	0,44	4,14	0,58	3,86	0,64	4,00	0,80	3,43	1,05	1,50	0,46
Genauigkeit Länge abisolieren	4,14	0,23	4,36	0,44	4,14	0,23	4,07	0,56	4,21	0,65	3,43	0,73	1,21	0,52
Keine scharfen Kanten	4,64	0,44	4,86	0,35	4,64	0,44	1,86	1,12	2,43	1,05	1,86	0,64	3,21	0,99
Hohe Abtragrate möglich	3,50	1,22	3,07	1,21	4,00	0,71	4,00	0,00	3,86	0,35	3,57	0,73	3,21	0,92
Kein Abtrag Kupfermaterial	4,43	0,73	4,57	0,73	4,57	0,73	1,21	0,52	1,79	1,19	1,79	1,19	2,50	1,16
Beschädigung der Isolierung Abisolierbereich	3,57	1,05	4,00	0,93	3,50	1,10	3,64	0,95	3,86	0,83	3,50	1,16	1,21	0,52
Kosten	2,00	0,76	1,50	0,46	2,29	0,70	3,36	0,79	3,93	0,56	3,50	0,60	4,57	0,49

4.3.5.2 Abisolieren mittels Laser

Wie schon eingangs im Kapitel erwähnt, werden langwellige (Abk. LWRS) und kurzwellige (Abk. SWRS) Lasersysteme unterschieden. Das Abtragprinzip basiert beim LWRS auf ein Verbrennen der Isolationsschicht, wobei noch Verbrennungsrückstände zurückbleiben und ein zweistufiger Prozess notwendig wird, beim SWRS basiert das Abtragsprinzip auf ein Absprengen der Schicht. Dabei wird der gepulste Laserstrahl vom Kupfer teilweise absorbiert, es dehnt sich schlagartig aus und induziert mechanische Stoßwellen in die Isolationsschicht, welche zum Absprengen führen.⁴¹

Der wichtigste Parameter für eine Serienproduktion ist die Abtragrate, welche entweder in Volumeneinheiten [mm^3/s] oder in Flächeneinheiten [mm^2/s] quantifiziert wird. Diese Abtragrate ist hochgradig vom Isolationsmaterial sowie den Einsatzbedingungen wie Laserleistung, Vorschub und spezifischen Laserparametern abhängig. Aus diesem Grund können keine gesicherten Angaben der Laserhersteller für den spezifischen Anwendungsfall angegeben werden. In der nachfolgenden Kostenanalyse werden für 500 W Faserlaser 150 mm^2/s angenommen und für 200 W Faserlaser 200 mm^2/s . Es kann annähernd aus firmeninternen Erfahrungen davon ausgegangen werden, dass sich die Abtragrate direkt proportional zur Laserleistung verhält. Wird die Laserleistung verdoppelt, verdoppelt sich ebenfalls die erreichbare Abtragrate. Bei der Entwicklung einer Serienanlage ist die Abtragrate im Aufgabengebiet „Absicherung durch Erprobung“ (siehe Abb. 17: Gesamtprozessmodell des Entwicklungsprozesses für den gesamten Elektromotor, Quelle: In Anlehnung an Kerber (2016), S. 160–164. Versuche beim Lieferanten

⁴¹ Vgl. Glaessel/Seefried/Franke (2017), S. 4.

des Lasersystems zu Validieren und somit die Taktzeit des Prozessschrittes abzusichern.

Im Kontext dieser Arbeit, welche sich mit der Produktionsplanung auseinandersetzt, sollen im nächsten Schritt die Eigenschaften der laserbasierten Verfahren im Sinne einer Kosten- und Fehleranalyse aufgezeigt werden.

4.3.5.2.1 Fehleranalyse laserbasiertes Abisolieren

Die große Abhängigkeit zum Schweißprozess bedingt eine genaue Kenntnis der Einflüsse auf den Abisolierprozess mittels Laser und die damit verbundenen Auswirkungen auf das Ergebnis, welche zu schlechter Qualität führen. Zur grafischen Strukturierung der Einflussgrößen wird ein Ursachen-Wirkungs-Diagramm (Ishikawa-Diagramm) eingesetzt, die Kategorien werden in Mensch, Maschine, Material, Milieu und Methode unterteilt. Von der MAS bereits berücksichtigte Einflussgrößen sind mit einer grünen Fahne gekennzeichnet.

In der Kategorie Maschine werden die Bedingungen des Lasersystems wie Betriebsart (continuous wave (cw) oder gepulst), Vorschub, Pulsfrequenz, etc. zusammengefasst. Diese Maschinenparameter gelten als wichtige Einflussgröße auf das Abisolierergebnis und müssen zu Beginn auf den Prozess abgestimmt werden. Den größten Einfluss auf die Qualität weist die Pulsfrequenz, gefolgt von der Vorschubgeschwindigkeit und der Laserleistung auf. Eine hohe Abisolierqualität wird durch ein Erhöhen von Laserleistung, Pulsdauer und Pulsfrequenz sowie verringern der Vorschubgeschwindigkeit erreicht.⁴² In der Kategorie Methode sind die Einflüsse wie Laserleistung, Abtrage, Wellenlänge und Scanmuster angeführt welche bereits Berücksichtigung finden. Hervorzuheben ist die Reihenfolge der Flächen, die abisoliert werden müssen. Diese ist insbesondere bei der Strategie, nicht alle Flächen gleichzeitig abzuisolieren wichtig, um keine bereits abisolierte Fläche wieder zu verschmutzen.

In der Kategorie Milieu sind die Umwelteinflüsse zusammengefasst welche durch Metaldampf, Rauch und der Umgebungstemperatur gegeben sind. Diese Einflüsse sind durch richtig ausgelegte und positionierte Absaugdüsen direkt zu entfernen. In der Literatur ist über die Absaugung beim laserbasierten Abisolieren wenig angeführt, aus der internen Prozessentwicklung ist jedoch bekannt, dass die Absaugung der Schmutzpartikel ein absolut

⁴² Vgl. Gläsel (2020), S. 64-65.

wichtiges Qualitätskriterium darstellt.

Beim Material sind die Einflussgrößen Geometrie, Schichtdicke und Werkstoff weitgehend berücksichtigt, da sich diese direkt auf die Abtrage auswirken. Bei Werkstoffen aus PAI sind höhere Abtrage durch das Abtragprinzip „absprenge“ möglich als bei PEEK („verbrennen“).⁴³ Darüber hinaus sind Fremdpartikel an der Oberfläche, welche nicht verbrennen und Rückstände hinterlassen und der Aufbau der Isolationsschicht zu berücksichtigen, die oftmals aus vielen einzelnen Schichten aufgebaut ist.

Der Mensch übt ebenfalls großen Einfluss auf die Qualität aus, es wurden die Einstellung der Fokussage, des Scanmusters sowie der Energieschwelle identifiziert. Zusätzlich ist die Ausrichtung des Pins zum Laser ebenfalls vom Bediener einzustellen und kann als Fehlerquelle fungieren.

Einen grafischen Überblick über alle Einflussfaktoren auf den Prozessschritt „Kupferdraht abisolieren“ gibt Abb. 30.

Die Auswirkungen schlechter Qualität beim Abisolieren können zu Isolationrückstände an der Kupferoberfläche zusammengefasst werden. Beim Schweißen äußern sich die Auswirkungen in fehlerhafte Schweißpunkte, welche zum Komplettausfall des gesamten Stators führen können. Somit sind diese unter allen Umständen zu vermeiden.

⁴³ Vgl. Neugebauer/Beranek/Bocksrocker (2021), S. 6, Onlinequelle: [14.07.2021].

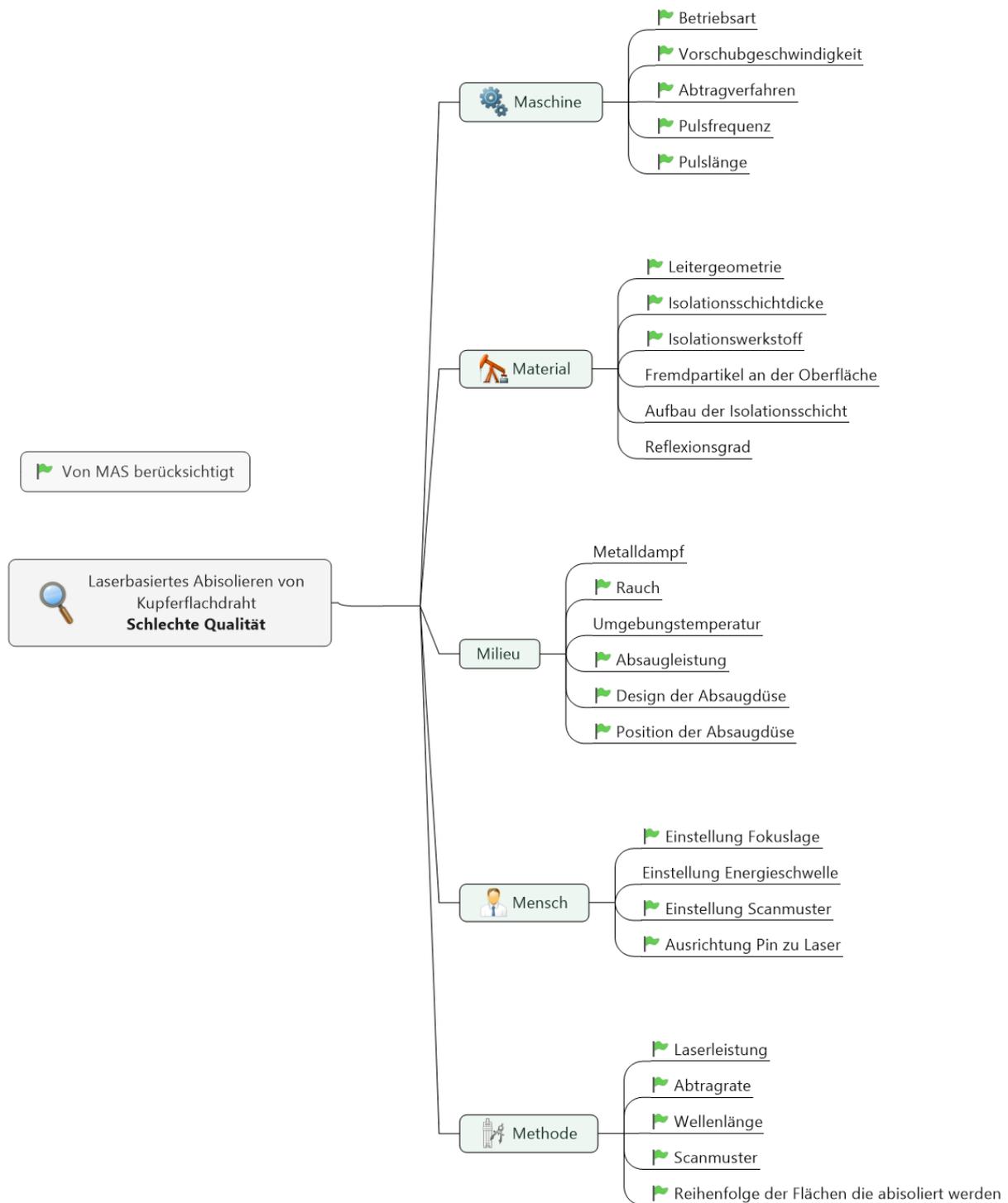


Abb. 30: Ursachen-Wirkungs-Diagramm beim laserbasierten Abisolieren, Quelle: Eigene Darstellung.

4.3.5.2.2 Kostenanalyse laserbasiertes Abisolieren

Um die wirtschaftlichen Einflüsse der Systeme bei unterschiedlichen Stückzahlenszenarien untersuchen zu können, wird eine statische Kostenanalyse nach Periodenkosten durchgeführt. Die Berechnung der Kapitalkosten je Periode wurde bereits in Kapitel 0 erläutert. Bei den Betriebskosten wird über die vorhandene Taktzeit je Pin t_{Pvorh} [s], welche aus der angenommenen Abtrage rate resultiert, über die Laufzeit des Lasers t_{Nenn} [s] (Formel 4.5) auf einen jährlichen Energieverbrauch des Systems E_{Ab} [kWh] (Formel 4.7) geschlossen. Um Laufzeiterhöhungen in Folge eines Betriebes mit höherer Taktzeit zu berücksichtigen, wird die Laufzeit mit einem Sicherheitsfaktor von 1,5 erhöht. Wird von der maximalen Produktionszeit t_{max} [s] die Laufzeit des Lasers abgezogen erlaubt die Stand-By-Zeit t_{St} [s] die Berechnung des Energieverbrauchs im Wartebetrieb (Formel 4.6). Die benötigte Anschlussleistung P_{Nenn} [W] im Nennbetrieb am Werkstück je Lasersystem wird aus den Datenblättern entnommen und beträgt bei einem Faserlaser im einstufigen System mit 500 W Laserleistung 2400 W, bei einem CO₂-Laser mit 200 W Laserleistung 4000 W und bei einem Faserlaser mit 100 W im zweistufigen System 500 W. Aus diesen Daten ist der schlechte energetische Wirkungsgrad des Lasers von ca. 20% bei Faserlasern abzuleiten. Zu den jeweiligen Leistungswerten kommen zusätzlich die elektrischen Leistungen der Absauganlage mit 1,1 kW sowie die Anschlussleistung des Kühlsystems des Lasers mit 7,5 kW hinzu, welche im Betrieb benötigt werden.

$$t_{Nenn} = (t_{Pvorh} \times \#p) \times 1,5 \quad (4.5)$$

$$t_{St} = t_{max} - t_{Nenn} \quad (4.6)$$

$$E_{Ab} = P_{Nenn} \times t_{Nenn} + P_{St} \times t_{St} \quad (4.7)$$

Ist die vorhandene Taktzeit t_{Pvorh} [s] größer als die erforderliche Taktzeit t_{Perf} [s] (vgl. Formel 4.8) wird die jeweilige Anlage so oft erweitert, bis t_{Perf} erreicht wird. Die erforderliche Taktzeit wird aus den angenommenen Produktionszeiten (siehe Kapitel 4.1.5) und den Produktdetails CPS, Nutanzahl N und Anzahl zu fertigenden Statoren pro Jahr X_S mit folgender Formel errechnet:

$$t_{Perf} = \frac{\frac{t_{max} \times OEE}{X_S}}{N \times \frac{CPS}{2}} \quad (4.8)$$

Für die Energiekosten je kWh kommt ein Durchschnittswert aus dem Jahr 2020 für Industriestrom in Österreich von 0,1 €/kWh zum Einsatz.⁴⁴ Die Ergebnisse zeigen ein deutliches Bild für die untersuchten Stückzahlenszenarien. Für eine Prototypanlage mit 6000 Statoren pro Jahr erscheint eine zweistufige Variante aus CO₂+Faserlaser mit je 200 W und 100 W Laserleistung am wirtschaftlichsten, da auch die Anforderungen Taktzeit und Sauberkeit beim Abisolieren erfüllt werden. Bei einer Kleinserienanlage im Bereich von 25 000 Statoren pro Jahr muss bei einem zweistufigen Verfahren die Laserleistung verdoppelt werden, um die Taktzeitanforderung zu erfüllen. Im Falle von Großserienanlagen ab 50 000 Statoren pro Jahr muss ein System aus vier Faserlasern, welche alle vier Flächen gleichzeitig abisolieren, mit mindestens 500 W Laserleistung eingesetzt werden, um die hohen Taktzeitanforderungen zu erfüllen.

Die Energiekosten bleiben trotz des schlechten Wirkungsgrades moderat, dies soll am Beispiel eines Faserlasersystems mit vier 500 W Laserköpfen und einer Jahresproduktion von 50 000 Statoren verdeutlicht werden. Bei 150 Pins pro Stator ergibt sich eine Laufzeit von 730 Stunden, welche in einem jährlichen Gesamtenergieverbrauch von 81 597 kWh resultiert und damit Energiekosten von 8159 € pro Jahr verursacht. Im Hinblick auf eine energiesparende Produktion ist dieses System aufgrund des höheren Energieverbrauches im Vergleich zu mechanischen Abisoliersystemen zu hinterfragen, insbesondere bei einer hochvolumigen Serienproduktion.

Abb. 31 gibt einen Überblick über die Kosten je produzierten Stator für unterschiedliche Laservarianten und Produktparameter über ansteigende Stückzahlen pro Jahr. In der Legende sind die unterschiedlichen Produktparameter mit Nutanzahl/CPS dargestellt. Das leistungsschwächere zweistufige Verfahren wird nicht dargestellt, da dieses wie beschrieben nur bei sehr geringen Stückzahlen sinnvoll erscheint. Daraus ist ersichtlich, dass ein Faserlasersystem erst bei höheren Stückzahlen ab 25 000 Stück pro Jahr wirtschaftlich betrieben werden kann.

Im Gegensatz dazu liegt bei dieser Jahresmenge beim zweistufigen Verfahren der Turnover. Es kann die erforderliche Taktzeit mit den betrachteten Laserleistungen nicht mehr erreicht werden, wodurch die Anlagen in diesem Fall vervielfacht werden und die Kosten pro Stator trotz steigender Stückzahlen stark ansteigen. Die detaillierte Berechnung der Periodenkosten sowie

⁴⁴ Statista (2020), Onlinequelle: [06.05.2021].

der erforderlichen Taktzeit je Pin für das laserbasierte Abisolieren ist dem Anhang (2) zu entnehmen.

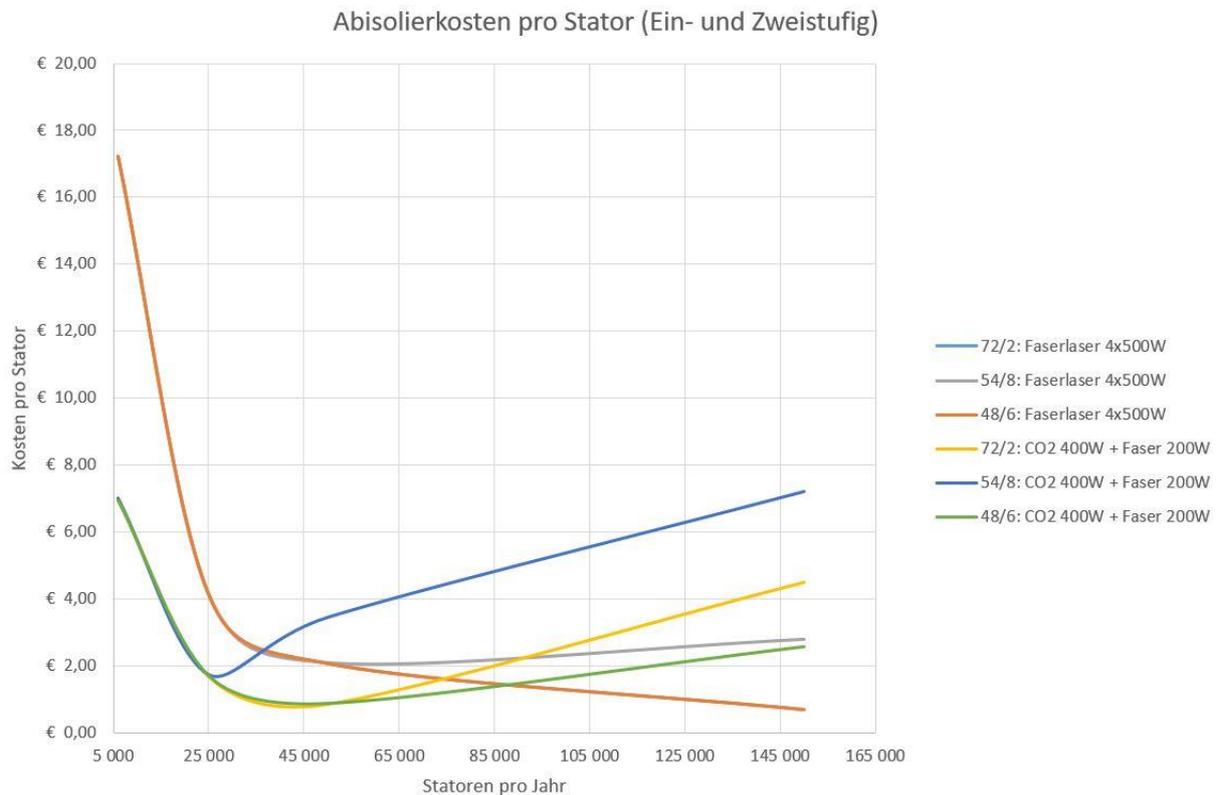


Abb. 31: Abisolierkosten pro Stator über verschiedene Stückzahlen, Quelle: Eigene Darstellung.

4.3.5.3 Grundlagenversuch Abisolieren mittels Fräsen

In den vorherigen Kapiteln wurde ausführlich auf die laserbasierten Abisoliervverfahren eingegangen, da diese Systeme basierend auf den Ergebnissen der Nutzwertanalyse die definierten Bewertungskriterien am besten erfüllen. Aktuelle Erfahrungen aus dem Vertrieb haben allerdings gezeigt, dass am Markt der Hairpin-Stator Produktion ebenso nach mechanischen Abtragverfahren verlangt wird, um eventuell die im Schnitt höheren Investitionskosten der Lasersysteme, beziehungsweise den schlechten energetischen Laserwirkungsgrad zu umgehen. Basierend aus den vertrieblichen Erkenntnissen wird in diesem Kapitel auf das mechanische Abisoliersystem Fräsen in Form eines Grundlagenversuches eingegangen.

4.3.5.3.1 Versuchsaufbau

Die Fräsversuche wurden am Institut für Fertigungstechnik an der TU Graz auf einer Fünf-Achs-Fräsmaschine der Marke Sauer durchgeführt. Ziel des Versuches war es, das In-Line Abisolieren vor dem Ablängen nachzubilden, wo der Draht noch in endloser Form vorliegt. Zu diesem Zwecke wurde eine Spannvorrichtung mit zwei schraubbaren Backen gefertigt, um den Draht auf zwei Seiten vor und nach der Bearbeitungsstelle spannen zu können. Abb. 32 gibt einen Überblick über den Versuchsaufbau an der Maschine.

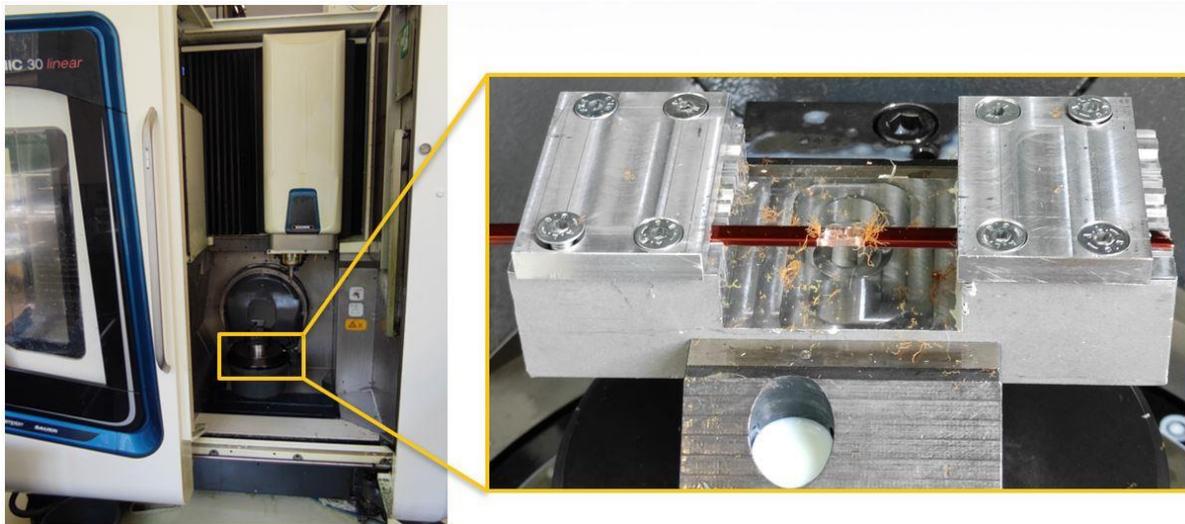
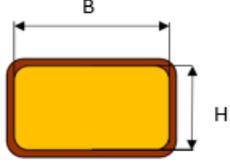


Abb. 32: Aufbau des Fräsversuches an der Maschine, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Auswahl der zu untersuchenden Drähte wurde so gestaltet, dass möglichst viele unterschiedliche Geometrien und Isoliermaterialien, welche bisher von der MAS verarbeitet wurden, im Versuch berücksichtigt sind. Die Bandbreite der Isoliermaterialien reicht von reinem PAI, einer Kombination aus PEEK+PAI sowie reinem PEEK. Außerdem variieren die Schichtstärken von 70 μm bis 150 μm sowie die Abmessungen des Kupfers, wodurch auch unterschiedliche Toleranzfelder des Drahtes berücksichtigt werden. Die Parameter der vier ausgewählten Drähte sind in Tabelle 8 zusammengefasst, die detaillierten Daten dürfen allerdings aus Geheimhaltungsgründen nicht angeführt werden.

Tabelle 8: Drahtparameter der Drähte für den Fräsversuch, Quelle: Eigene Darstellung.

Draht	Geometrie (BxHxR) [mm]	Isoliermaterial	Isolierdicke [μm]	
A	~2x5x0,6	PAI	<100	
B	~3,5x2,3x0,3	PEEK+PAI	>130	
C	~3,6x1,5x0,5	PEEK	>100	
D	~2,5x2x0,4	PAI	>130	

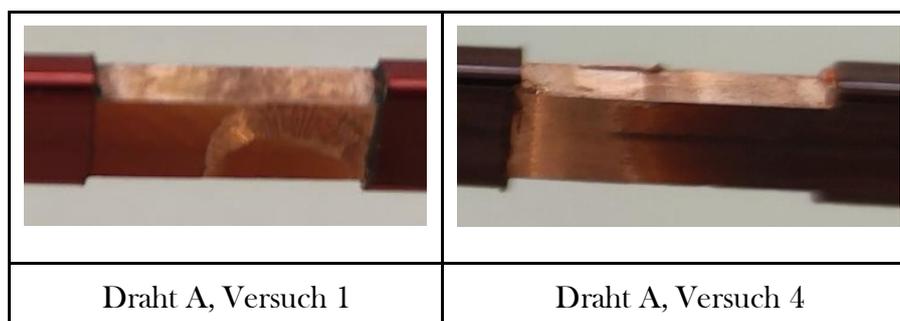
4.3.5.3.2 Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse des Fräsversuches sind in diesem Kapitel in folgende Kategorien gegliedert (eine Zusammenfassung aller Versuchsparameter und Ergebnisse ist dem Anhang (3) zu entnehmen):

Abhängigkeit zu den Drahttoleranzen

Im Gegensatz zu den laserbasierten Abisoliersystemen steht das Abisolieren mittels Fräsen in direktem Kontakt mit dem Werkstück und ist somit einerseits von den Geometrietoleranzen sowie den Qualitätsabweichungen des Drahtes (siehe Abb. 23) und andererseits vom Ergebnis des Prozessschritts „Kupferdraht richten“ abhängig. Diese beiden Fehlercluster wirken sich im Betrieb auf unterschiedliche Zustellmaße des Fräasers aus, wodurch im schlechtesten Fall noch Isoliermaterial am Kupfer zurückbleibt und somit kein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden kann. Dieses Phänomen wurde in den Versuchen mit der Nummer eins und vier bestätigt, bei ersterem ist noch eine minimale Restschicht erkennbar, bei zweiterem wurde auf einer Seite beinahe kein Isoliermaterial abgetragen (Tabelle 9). Die Gründe sind in diesem Fall in der Unebenheit des Drahtes und einer Verformung des Drahtes durch die vorherige Fräsbearbeitung zu suchen.

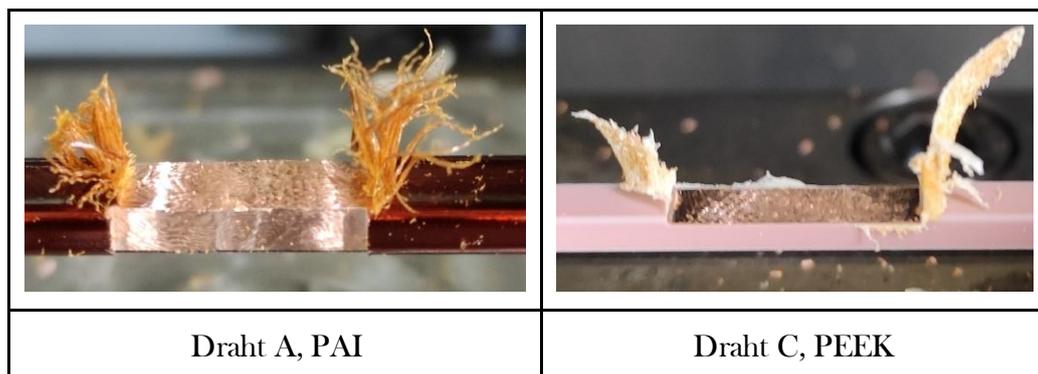
Tabelle 9: Isolationsrückstände durch Drahtunebenheit, Quelle: Eigene Darstellung.



Späne des Isoliermaterials

Nach jedem Fräsdurchgang sind Späne der Isolierung an der Kante zur restlichen Isolierung hängen geblieben. Beim Material PAI entstanden sehr feine, leicht zu entfernende Späne, beim Material PEEK wiesen die Späne eine sehr stabile und auch schwer zu entfernende Charakteristik auf (vgl. Tabelle 10 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Dies zeigt die geringe Serientauglichkeit bei diesem Punkt, da die Abisolieranlage einen sehr hohen Verschmutzungsgrad aufweisen wird und die Späne vor allem bei PEEK in einem separaten Prozessschritt von der restlichen Isolierung getrennt werden müssten.

Tabelle 10: Spanausbildung bei PAI und PEEK, Quelle: Eigene Darstellung.



Grat des Kupfermaterials

Beinahe bei jedem Versuch ist ein mittelmäßig ausgeprägter Grat des Kupfermaterials zu beobachten (vgl. Tabelle 11). Bei der Verwendung von HSS-Werkzeugen kann die Gratbildung zwar signifikant minimiert werden, da diese Werkzeuge schärfer geschliffen sind. In einem Serienprozess kann allerdings nach einer gewissen Anzahl von Fräszyklen durch ein stumpfes Werkzeug ein gratfreies Ergebnis nicht mehr sichergestellt werden. Die bereits beschriebenen negativen Auswirkungen von Kupfergrat auf den Schweißprozess führen in diesem Fall zu einem Ausschlusskriterium des FräSENS für den Abisolierprozess.

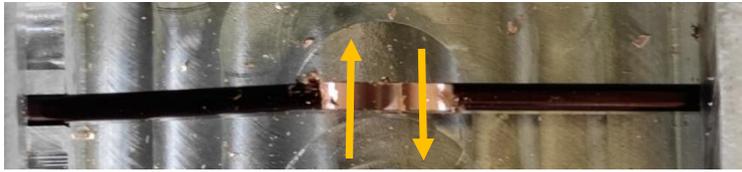
Tabelle 11: Gratbildung beim FräSEN bei Hartmetallwerkzeugen, Quelle: Eigene Darstellung.



Verformung des Drahtes durch Schnittkräfte

Ob der Pin durch den Schnittdruck des Fräswerkzeuges verformt wird, hängt von der Drahtgeometrie und dem Zustellmaß ab. Beim Draht C mit einer Höhe von $\sim 1,5\text{mm}$ konnte kein ordentlicher Fräszyklus aufgrund der plastischen Verformung durchgeführt werden. Darüber hinaus wurde im Laufe des Versuches ein weiterer Parameter, welcher zur Drahtverformung führt, identifiziert. Bei einem asymmetrischen Schnittdruck vor dem Fräswerkzeug verformt sich der Draht auch bei größeren Querschnitten beim Austritt des Werkzeuges. Dies ist bei einem zweistufigen Fräserweg (gelbe Pfeile) der Fall, da dies bei einem Durchmesser des Werkzeuges von 6 mm für eine Abisolierlänge von 10 mm vonnöten ist. In weiterer Folge wurde diesem Problem mit einem größeren Fräserdurchmesser von 16 mm begegnet.

Tabelle 12: Drahtverformungen aufgrund der Schnittkräfte, Quelle: Eigene Darstellung.

	<p>Draht A, Hartmetallfräser ø6mm, zwei Fräserwege</p>
	<p>Draht C, Hartmetallfräser ø16mm, ein Fräserweg</p>

Aufgrund der beschriebenen Versuchsergebnisse wird an dieser Stelle nicht empfohlen, das Konzept Fräsen im Kontext des Abisolierens von rechteckigen Kupferlackdrähten weiterzuverfolgen. Die wichtigen Eigenschaften des Systems für eine Serienproduktion wie Prozesssicherheit und Prozessstabilität können wenig bis gar nicht erfüllt werden, somit sind die laserbasierten Systeme dem Fräsen in dieser Hinsicht überlegen.

Die Einspannsituation des Versuches lässt allerdings noch Optimierungspotential zu, sowie die Verwendung eines speziellen Fräswerkzeuges, welches die entstandenen Späne aus Tabelle 10 im Bearbeitungsgang entfernt.

Die detaillierten Ergebnisse der Fräsversuche mit allen Drahtformen und Werkzeugen sowie den verwendeten Drehzahlen und Zustellmaßen je Versuchsreihe sind dem Anhang (3) zu entnehmen.

4.4 Pin biegen

Bei Statoren mit Kupfer-Runddraht wird der drahtförmige Lackdraht mit dem Wickelkörper durch eine fortlaufende Biegeumformung verbunden und nach DIN 8586 als Fügeverfahren definiert. Im Falle eines lackisolierten Kupferflachdrahtes muss die Herstellung der Spulenform im Stator durch eine Biegeumformung erfolgen. Hierbei ist der Einfluss der Umformung auf die Lackisolation beim verwendeten Biegekonzept zu berücksichtigen, welche aus der Norm für Umformverfahren (DIN 8586) nicht hervorgeht.⁴⁵

Der Biegeprozess kann in zwei Prozessschritte, dem 2D- und 3D-Biegen unterteilt werden. Beim zweidimensionalen Biegen wird der gerade Kupferflachdraht in die Hairpin-Form gebracht, im dreidimensionalen Biegeschritt wird ein S-Schlag für den Lagensprung des Hairpins sowie ein Radius für das Wickelschema im Stator gebogen. In Sonderfällen ist abschließend noch ein Kröpfen des Hairpins in radialer Richtung notwendig, um spezielle Wickeldesigns umsetzen zu können. Für diese Biegeoperationen existieren in der MAS historisch gewachsen vier unterschiedliche Konzepte, welche in ansteigender Reihenfolge kontinuierlich verbessert wurden. Das Konzept Miba 1 wird aus internen Erfahrungen als ungeeignet bewertet, da die Umformung durch mechanische Linearzylinder mit damit verbundenen Isolierbeschädigungen umgesetzt wird. Daher wird auf eine Aufnahme in die Konzeptbewertung verzichtet. Zusätzlich dazu werden von Mitbewerbern das Freiformbiegen, wo der Draht fliegend durch einen Roboter in die Hairpin-Form gebracht und anschließend in einem Gesenk 3D-gebogen wird und das Gesenkbiegen der 2D- und 3D-Kontur verfolgt. Eine Übersicht über die unterschiedlichen Biegekonzepte gibt Abb. 33.

⁴⁵ Vgl. Gläsel/Masuch/Weigelt/Kühl/Franke (2020), S. 20.

Prozessfolge		Prozessstart		
Nummer	S-Schlag	2D	3D	3D-Kröpfen
Miba 1	Linearzylinder	Schwenken + Rollen	Mechanisch	
Miba 2	Linearzylinder	Schwenken+ Rollen	Scara - Roboter	
Miba 3	Im 3D-Gesenk	Schwenken+ Rollen	Gesenk	Gesenk
Miba 4	Im 3D-Gesenk	2x Schwenken	Gesenk	Gesenk
Freiformbiegen	Im 3D-Gesenk	Roboter	Gesenk	Gesenk
Gliederkette	Ideenanstoß – wird nicht verfolgt			
Gesenkbiegen	Im 3D-Gesenk	Gesenk	Gesenk	

Gesenkbiegen Freiformbiegen Miba 3 – Schwenken + Rollen Miba 4 – Schwenkbiegen

Abb. 33: Übersicht über die unterschiedlichen Biegekonzepte, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Eingangsparameter des Biegeprozesses sind durch die Eigenschaften des Drahtes (Isolationsschichtdicke, B/H-Verhältnis, gestreckte Länge) gegeben. Durch den Biegeprozess ergeben sich Ausgangsparameter für die Geometrie und für Beschädigungen am Hairpin. Unter der Geometrie werden die Öffnungsweite des Hairpins, die Parallelität der Schenkel, die Gesamtlänge und die Wickelkopfhöhe zusammengefasst. Die Beschädigungen können in eine Abplattung beziehungsweise einen Materialaufschub im Biegeradius, Druckstellen an der Isolation und Veränderung der Isolationsschichtdicke kategorisiert werden. (Abb. 34)



Abb. 34: SIPOC-Analyse “Pin biegen”, Quelle: Eigene Darstellung.

4.4.1 Konzeptauswahl Pin biegen

Die Bewertungskriterien für die Konzeptauswahl wurden hauptsächlich auf die Erfüllung der Ausgangsparameter aus der SIPOC-Analyse ausgerichtet. Zusätzlich ist eine hohe Reproduzierbarkeit und geringe Taktzeit für das Biegekonzept erforderlich, da je nach Stator design bis zu 200 Pins pro Stator prozesssicher gebogen werden müssen.

Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse (siehe Tabelle 13) mit fünf Teilnehmer aus Entwicklung und Vertrieb zeigen, dass Gesenkbiegen sowie das Konzept Miba 4 die Kriterien am besten erfüllen. Die hohe Reproduzierbarkeit von Gesenken sowie bei richtiger Auslegung die geringe Neigung zu Beschädigungen am Pin sprechen klar für diese Konzepte. Beim Einsatz des Konzeptes Gesenkbiegen ist jedoch auf eine mögliche Patentverletzung eines Patents der Firma Odawara zu achten. Die Erstanmeldung erfolgte in Japan (JP6430599) und Folgeanmeldungen, welche auf dem japanischen Patent basieren, wurden in China (CN109618562A), Europa (EP3484029A4) und USA (US2019109524A1) registriert. Der Inhalt des Patents stellt ein vierteiliges Gesenk dar, wodurch der S-Schlag im Zuge des 3D-Kontur-biegens realisiert werden kann.

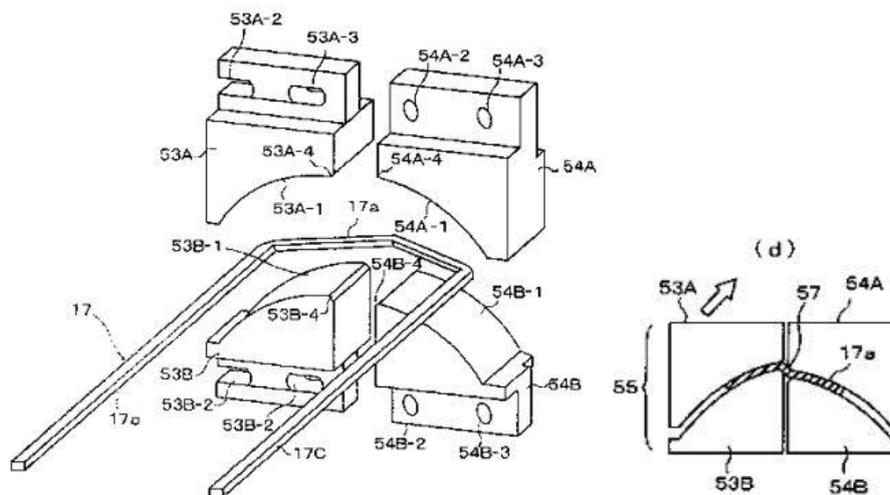


Abb. 35: Patent zum Gesenkbiegen von Odawara, Quelle: Odawara (2017), Onlinequelle: [11.06.2021].

Darüber hinaus hat die Auswertung der Standardabweichungen der normalverteilten Bewertungen ergeben, dass die Qualität der Analyse hinreichend gegeben war. Beim Konzept Miba 4 sind die höheren Standardabweichungen bei technischen Kriterien auf fehlendes Verständnis des neueren Konzeptes zurückzuführen. Die detaillierten Auswertungen der Nutzwertanalyse sind dem Anhang (4) zu entnehmen.

Tabelle 13: Ergebnisse Nutzwertanalyse "Pin biegen", Quelle: Eigene Darstellung.

Rang	Konzept	Gesamtnutzwert
1	Gesenkbiegen 2D+3D	353,57
2	Miba 4 - 2D-Schwenkbiegen, 3D-Gesenk	347,02
3	Miba 3 - 2D-Rollenbiegen, 3D-Gesenk	306,67
4	Miba 2 - 2D-Rollenbiegen, 3D-Roboter	260,83
5	2D-Freiformbiegen, 3D- Gesenk	255,36

4.4.2 Fehleranalyse des Biegeprozesses

Die Qualität des Drahtes, welche in Form von Maßtoleranzen und Werkstoffeigenschaften wie Streckgrenze oder Elastizitätsmodul ausgedrückt werden kann, beeinflusst den Biegeprozess maßgeblich. Experimentelle Untersuchungen von Wirth et al. unterschiedlicher Chargen von Drahtherstellern haben gezeigt, dass beim Elastizitätsmodul des Kupfermaterials Schwankungen von +/-10 % vorkommen. In weiterer Folge wurde durch eine Sensitivitätsanalyse der Einfluss der Material- und Geometrietoleranzen auf das Biegeergebnis untersucht. Es zeigte sich, dass die Querschnittsfläche des Drahtes den größten Einfluss ausübt und Abweichungen der Höhen- und Breitentoleranz nach oben und unten zu nicht tolerierbaren Ergebnissen beim Biegen führen. Ebenso führt die Abweichung der Radien als isolierter Parameter in beiden Toleranzrichtungen zu signifikant schlechteren Biegeergebnissen im Vergleich zum Referenzmaß.⁴⁶

Die Kategorisierung möglicher Einflussfaktoren beim Biegeprozess wird mit einem Ishikawa-Diagramm in Maschine, Material, Milieu, Mensch und Methode durchgeführt. In der Kategorie Material sind Toleranzen der Leitergeometrie und der Pinlänge sowie die Dicke und Art des Isoliermaterials, deren Auswirkung schon erwähnt wurde, zusammengefasst. Unter Milieu sind die Umfeldfaktoren Handling des Pins und das Puffersystem eingeordnet welche unter

⁴⁶ Vgl. Felix Wirth/Jürgen Fleischer (2019), S. 4-5.

Umständen die Isolierung des Pins beschädigen können. Die relevanten Faktoren des eingesetzten Biegekonzeptes sind unter Methode aufgelistet. Je nach Konzept sind die Abplattung sowie der Materialaufschub im Biegeradius sowie eine Beschädigung der Isolierschicht zu berücksichtigen. Manuelle Eingriffe sowie die Einstellung der Biegemaschine und damit die Geschwindigkeit des Biegens werden schlussendlich in der Kategorie Mensch zusammengefasst. Eine Übersicht über die kategorisierten Fehlerursachen gibt Abb. 34.

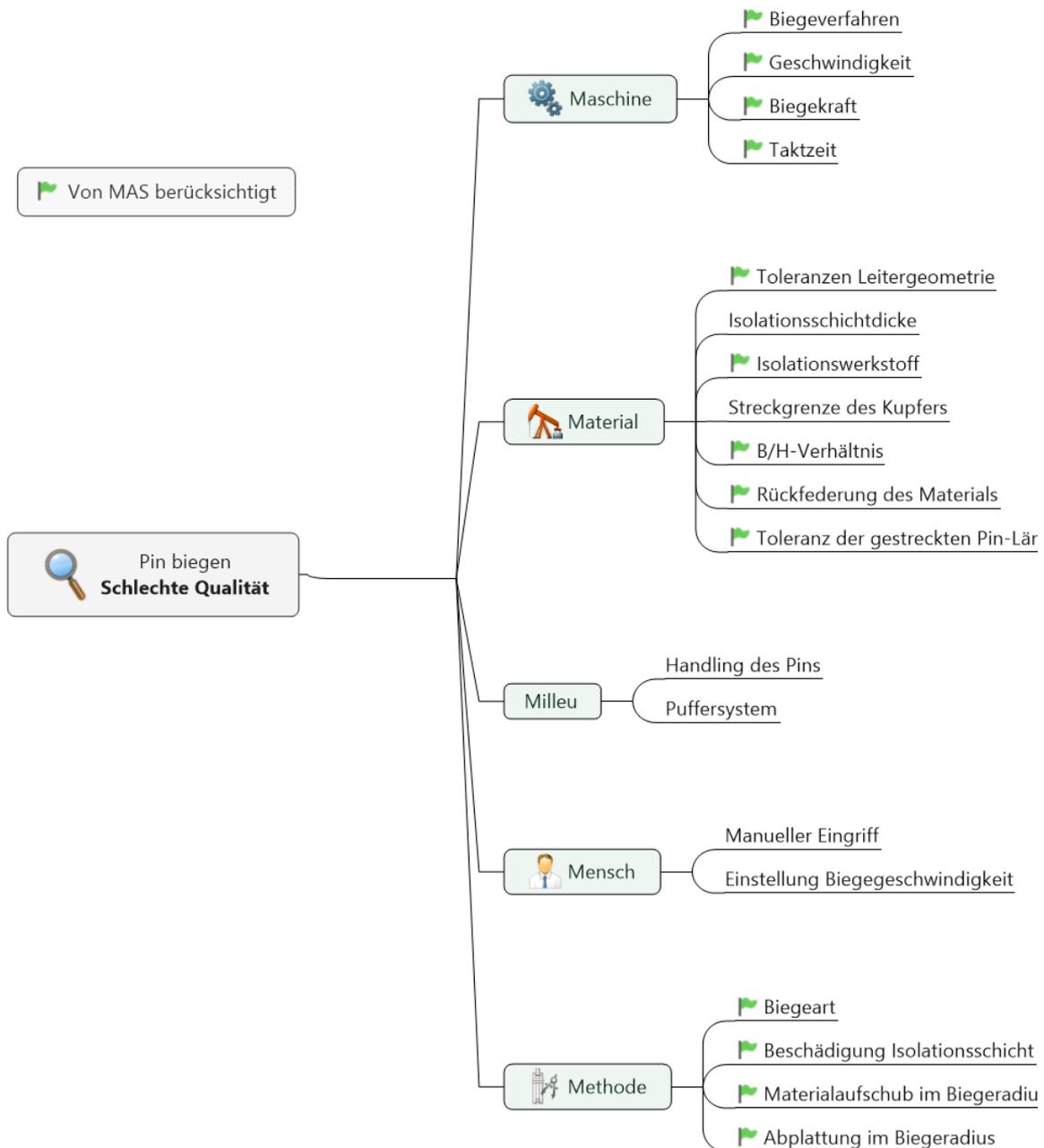


Abb. 36: Ursachen-Wirkungs-Diagramm beim Pin biegen, Quelle: Eigene Darstellung.

4.5 Statornuten isolieren

Das Isolieren der Statornut kann als entkoppelter Prozess aus der Prozesskette der Statorproduktion betrachtet werden, da keine Vorprozesse notwendig sind, um in das Blechpaket die Isolation einzubringen. Die Nutgrundisolation ist notwendig, um die Isolation der Kupferdrähte zu schützen und mögliche bestehende Lackschäden der Drähte zu kompensieren. Speziell bei Hochvolt-Traktionsantrieben ist diese zusätzliche Isolierung besonders von Bedeutung.⁴⁷ In der MAS wird hauptsächlich speziell beschichtetes Papier eingesetzt, welches in die Form der Nut gefaltet werden muss und anschließend axial in die Nut eingebracht wird. Das Papiermaterial ist abhängig vom Anwendungsfall, meist wird Polyimidfolie in Kombination mit Aramidpapier eingesetzt. Bestrebungen, die Isolation der Nut mit Beschichtungen zu realisieren, beziehungsweise gänzlich zu ersetzen, können nach derzeitigem Stand noch als Entwicklungen der Zukunft betrachtet werden.

Die Prozessschritte Papier abrollen, Prägen und Falten, Papier trennen, Papier fügen und Papierenden aufweiten (Coining), welche bis zum fertig isolierten Blechpaket notwendig sind, werden in Abb. 37 als Prozesskette dargestellt. Aufgrund fehlender Konzeptalternativen wird auf eine weitere Betrachtung dieses Prozessschrittes an dieser Stelle verzichtet.



Abb. 37: Prozesskette zum Isolieren der Statornuten, Quelle: Eigene Darstellung.

⁴⁷ Vgl. Mayer/Hausmann/Maul/Reinschmidt/Hofmann/Fleischer (2019), S. 1-2.

4.6 Hairpinlagen einsetzen

Dieser Prozessschritt sei im Rahmen dieser Arbeit nur der Vollständigkeit halber erwähnt, da aufgrund eines eigenen Entwicklungsprojektes innerhalb der MAS detailliert darauf eingegangen wird. Ziel dieses Entwicklungsprojektes ist es, diesen Prozessschritt vollständig zu automatisieren, da bei bisherigen Montageanlagen die Pins manuell in das Blechpaket eingebracht wurden.

Der Prozessschritt unterteilt sich in eine lagenweise Vormontage (oder auch Stecken genannt) der Pins und in ein anschließendes Fügen in das Blechpaket. Aktuell erscheint ein Konzept zielführend, wo alle Lagen mithilfe jeweils einer Schablone je Lage in einem einzelnen Container vormontiert und anschließend mit einem Greifer als Ganzes in das Blechpaket gefügt werden.

Das Vormontieren wird bei Lagen mit Sonderpins von einem Roboter, bei Lagen mit Standardpins von einem sogenannten „Tacker“, welcher die Hairpins durch eine translatorische Bewegung in die Schablone fügt, durchgeführt. Bei diesem Fügekonzept wird immer vom patentierten Wickelschema der Firma Miba, dem Miba Lap Winding (Patent-Nr.: WO2020047568A1), ausgegangen. Dabei kommen ausschließlich in der radial äußersten und innersten Lage Sonderpins und in den inneren Lagen nur Standardpins vor. Konkret bedeutet dies bei einem Stator mit beispielsweise sechs Lagen, dass vier Stationen für die Vormontage der Pins notwendig sind. Zwei Stationen für die äußerste und innerste Lage, welche von Robotern gesteckt werden, jeweils eine Station für die Lagen 2 und 3 sowie 4 und 5, da in einer Station mit Standardpins immer ein Korb (also zwei Lagen) gesteckt werden können. Daraus wird ersichtlich, dass sich die Anzahl der Lagen hochgradig auf diesen Prozessschritt auswirkt und somit bei der Produktauslegung berücksichtigt werden muss.

4.7 Drahtenden twisten

Das Verschränken der Drahtenden, im Folgenden Twisten genannt, bringt die gefügten Hairpins in die Form einer Spule, um eine elektrische Wicklung zu realisieren, wobei vor dem Prozessschritt „Drahtenden twisten“ die einzelnen Lagen und Körbe radial nach außen aufgeweitet werden müssen, um das Twistwerkzeug in die Pin-Enden einführen zu können. Diese beiden Prozessschritte werden in der Literatur sehr wenig behandelt, woraus in der MAS eine sehr hohe Entwicklungstätigkeit resultiert. Die Werkzeuge und Verfahren dazu wurden grundlegend neu entwickelt und in weiterer Folge auch patentiert. Im Rahmen dieser Arbeit wird

in diesem Kapitel weniger auf die technischen Details der Twistwerkzeuge eingegangen, vielmehr werden zur Konzeptauswahl die Grenzen der Twistkonzepte aufgezeigt, sowie die Auswirkungen vom Produktdesign auf die Produktion untersucht.

Der Prozessschritt wird produktseitig maßgeblich von den Parametern CPS, also der Anzahl der Lagen, sowie der Nutanzahl beeinflusst. Da dies der zweite Prozessschritt mit einer Biegeumformung ist, spielt auch der Drahtquerschnitt für die Umformkraft eine große Rolle. Damit das Twistwerkzeug in die Pin-Enden eingeführt werden kann, ist eine Fase sowie definierte Abstände zwischen den Lagen und Körben unerlässlich. Der Twistvorgang selbst wird durch eine Twistkurve (vgl. Formel 4.7) beschrieben, welche aus einer zusammengesetzten Bewegung von Rotation und Translation des Twistwerkzeuges resultiert um die Endlage des Pins (siehe Abb. 38) zu erreichen. Diese Twistkurve folgt einem Polynom dritten Grades.

$$y(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (4.7)$$

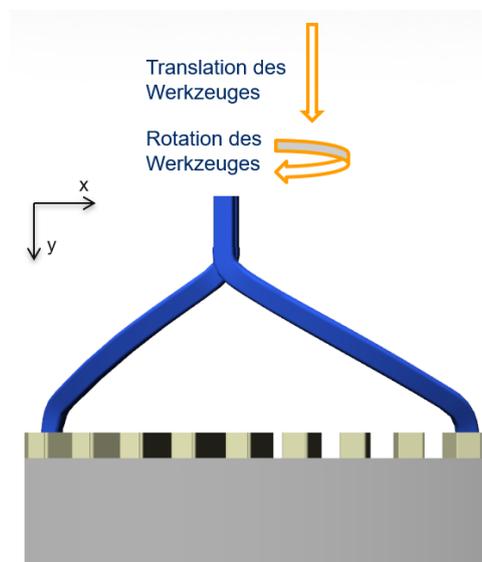


Abb. 38: Verschränktes Pinpaar nach dem twisten, Quelle: Eigene Darstellung.

Nach dem Twistprozess ergeben sich die Ausgangsparameter für das Schweißen durch die Lage und den Zustand der Pins nach dem twisten. Somit ist eine gerade beziehungsweise ebene Fläche der Pins im Bereich der Schweißzone sowie die definierte Endlage sehr wichtig, um die Pinpaare mit Hilfe der Schweißvorrichtung vor dem Schweißen positionieren zu können. Eine Torsionierung der Pins nach der Oberkante des Blechpaketes und eine Beschädigung der Pins durch das Werkzeug ist durch geeigneten Verfahrensablauf zu vermeiden. Alle Kriterien sind in Form einer SIPOC-Analyse in Abb. 39 zusammengefasst.



Abb. 39: SIPOC-Analyse "Drahtenden Twisten", Quelle: Eigene Darstellung.

Grundsätzlich wird in der MAS zwischen aktivem und passivem Twistwerkzeug unterschieden. Bei einem aktiven Werkzeug wird jeder Pin durch einen axial und radial beweglichen Greiffinger aufgenommen und getwistet. Aufgrund des hohen Platzbedarfs wird bei diesem Verfahren immer lagenweise getwistet. Eine Weiterentwicklung des aktiven Werkzeuges ist das adaptive Twistwerkzeug, welches die Pins im Greifer klemmt und somit eine definierte Prozessführung erreicht wird.

Beim passiven Twistwerkzeug, welches auch als Twistkrone bezeichnet wird, werden die Pins in die rechteckigen Taschen eingeführt, ohne aktiv in diesen fixiert zu werden. Es können immer zwei Lagen (also ein Korb) gemeinsam getwistet werden. Hat ein Stator beispielsweise vier Lagen, muss die Maschine entweder einmal auf die nächste Twistkrone umgerüstet werden, oder der Stator in eine nachgelagerte Twiststation weitergetaktet werden. Eine Übersicht zu den zwei Werkzeugvarianten gibt Abb. 40.

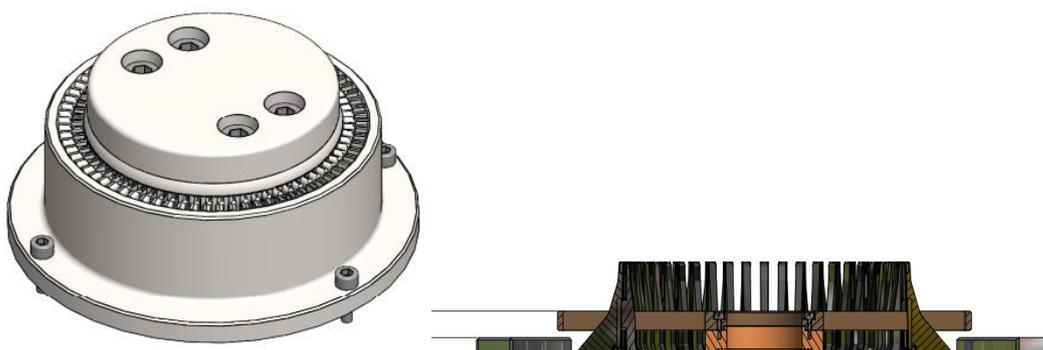


Abb. 40: Passives (links) und aktives (rechts) Twistwerkzeug, Quelle: MAS Firmenunterlagen.

4.7.1 Konzeptauswahl Drahtenden twisten

Zur Auswahl eines Konzeptes anhand definierter Bewertungskriterien ist in diesem Fall eine Nutzwertanalyse wenig geeignet, da die beiden Varianten geometrische sowie produkttechnische Grenzen aufweisen. Aus diesem Grund wurde ein Entscheidungsbaum entwickelt, um für den individuellen Fall eines kundenspezifischen Hairpin-Stators das geeignete Twistverfahren darzulegen.

Die erste Entscheidung betrifft die Flexibilität der Maschine. Wenn unterschiedliche Produkttypen auf der Anlage gefertigt werden sollen, geht die erste Entscheidung in Richtung „Aktives twisten“, da beim passiven der Rüstaufwand zu groß werden würde. Beim aktiven Twisten sind in weiterer Folge noch geometrische Grenzen zu berücksichtigen, welche die nächsten beiden Entscheidungspunkte repräsentieren. Zum einen darf der Höhenunterschied zwischen Standard- und Sonderpins nicht größer als 5mm betragen und zum anderen muss der kleinste Nutabstand mehr als 3mm aufweisen, um die geometrischen Bedingungen für die Twistfinger des aktiven Twistwerkzeuges zu erfüllen. Schlussendlich wird beim Aufweiten noch unterschieden, ob die Lage vereinzelt werden muss. Bei einer positiven Entscheidung kommt das aktive Twisten zur Anwendung, bei einer negativen wird das gesamte Pinpaket radial aufgeweitet und mit dem adaptiven Twistwerkzeug getwistet.

Wird mit dem passiven Twistwerkzeug getwistet, muss noch die Anzahl der Lagen (CPS) überprüft werden. Ist sie größer als vier, ist das passive Twisten aufgrund des hohen Rüst- bzw. Stationsaufwandes wenig zielführend und ein nochmaliges Überprüfen des aktiven Twistwerkzeuges wird nahegelegt. Eine Übersicht über den Entscheidungsbaum gibt Abb. 41.

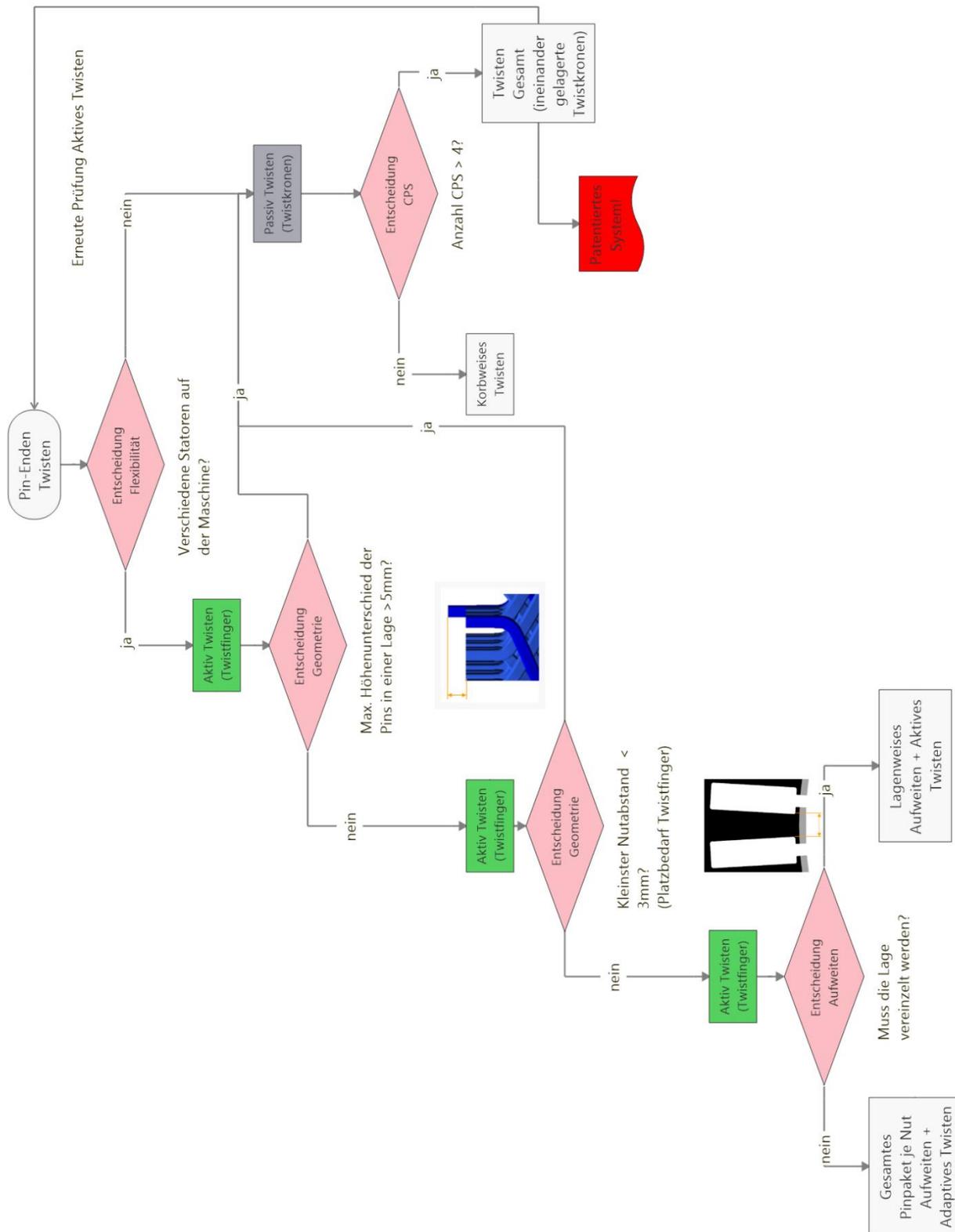


Abb. 41: Entscheidungsbaum Twistverfahren, Quelle: Eigene Darstellung.

4.8 Drahtenden reinigen

Das Reinigen der Pins an den Enden vor dem Verschweißen war bei bisherigen Anlagen in der MAS keinem separaten Prozessschritt unmittelbar vor dem Schweißprozess zugeordnet. Bisher wurde das Hauptaugenmerk auf die Reinigung durch Absaugdüsen direkt beim Abisolierprozess gelegt. Durch die nachgelagerten Prozessschritte kann es allerdings erneut zu Verschmutzungen kommen, welche an der freien Kupferoberfläche zurückbleiben und für Verunreinigungen der Schweißstelle sorgen. Dieser Problematik sollte mit einer Reinigungsstation direkt vor der Schweißzelle begegnet werden. Einerseits, um lose anhaftende Partikel beispielsweise abzusaugen oder abzubürsten und andererseits, um möglicherweise entstandenen Stanzgrat vom Prozess „Kupferdraht ablängen“ durch metallische Bürsten zu entfernen. Dieser Prozessschritt wird in den Simulationsmodellen mit einer eigenen Station vor dem Schweißen berücksichtigt und eine Taktzeit von 15 Sekunden angenommen.

4.9 Drahtenden kontaktieren

Das Kontaktieren der verschränkten Pins zu einer fertigen Wicklung kann neben dem Prozessschritt „Pin-Enden Twisten“ ohne Zweifel als Schlüsselprozess in der Prozesskette der Stator-Produktion bezeichnet werden. Die eingesetzte Technologie zum Kontaktieren der Hairpin-Enden zu einer Spule muss höchste Anforderungen hinsichtlich Prozesssicherheit und Taktzeit erfüllen, da schon eine fehlerhafte Schweißstelle zum Ausfall der Elektromaschine führt. Der gesamte Kontaktierungsprozess wird in die Subprozesse „Kalibrieren der Pin-Enden“, „Verschweißen der Pin-Enden“ und „Verschweißen der Busbar“ aufgeteilt (siehe Abb. 42).



Abb. 42: Prozesskette "Drahtenden kontaktieren", Quelle: Eigene Darstellung.

4.9.1 Kalibrieren der Pin-Enden

Unter dem Kalibrieren der Pin-Enden wird die exakte Positionierung mit Hilfe einer Schweißvorrichtung vor dem Schweißen verstanden, da die Pins nach dem Verschränken

(Twisten) durch materialbedingt unterschiedliche Rückfederungen nicht in der definierten Endlage bleiben. Die Schweißvorrichtung ist dabei individuell an das Stator-Design anzupassen und hat folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Axiale Positionierung der Pinpaare (Ausgleich des Höhenversatzes)
- Tangentiale Positionierung (Ausrichten der Pinpaare in Nutrichtung)
- Radiale Positionierung (Spannen der Pinpaare)

4.9.2 Verschweißen der Pin-Enden

Die zu Beginn des Kapitels erwähnte Prozesssicherheit wird durch hohe Anforderungen an das Schweißverfahren erreicht. Bedingt durch die hohen elektrischen Ströme, die in Wicklungen der Traktionsantriebe fließen, müssen die Verbindungen einen großen Anschlussquerschnitt aufweisen. Reduzierte Leiterquerschnitte würden zu zusätzlichen ohmschen Verlusten und damit zur zusätzlichen Erwärmung des Stators führen. Beim Schweißprozess selbst muss die Spritzerbildung zur Vermeidung von elektrischen Kurzschlüssen sowie hoher Wärmeeintrag zur Vermeidung von Isolationsschäden im Kontext einer sehr hohen Wärmeleitfähigkeit von Kupfer berücksichtigt werden. Außerdem wirken sich organische Verunreinigungen in Form von Poren im Schweißpunkt negativ auf die Qualität aus. Eine zusätzliche Herausforderung stellt der geringe Platzbedarf für das Schweißsystem im Wickelkopf dar.⁴⁸ Die Anforderungen sind in Form von Ein- und Ausgangsparametern der SIPOC-Analyse in Abb. 43 dargestellt.

Um unnötige Temperaturerhöhungen des Stators zu vermeiden, ist der Widerstand der kontaktierten Wicklung eine zentrale Größe, die das eingesetzte Schweißsystem erfüllen muss. Glaessel, Masuch et al. (2020) haben gezeigt, dass sich der elektrische Widerstand direkt proportional zur Einschweißtiefe verhält und mit zunehmender Einschweißtiefe linear abnimmt. Um die Mindestanforderungen des Widerstandes der Schweißstelle zu erfüllen, sollte mit der Einschweißtiefe eine um 120 % größere Anbindungsfläche im Vergleich zur Querschnittsfläche des unbeeinflussten Leiterpaares erreicht werden. Darüber hinaus konnte eine Beziehung zwischen elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindung hergestellt

⁴⁸ Vgl. Tobias Glaessel/Johannes Seefried/Michael Masuch/Andreas Riedel/Andreas Mayr/Alexander Kuehl/Joerg Franke (2019), S. 2.

werden. Messungen haben gezeigt, dass die maximale Zugkraft, die die Kontaktstelle aufnehmen kann, quadratisch mit zunehmendem Widerstand abnimmt.⁴⁹

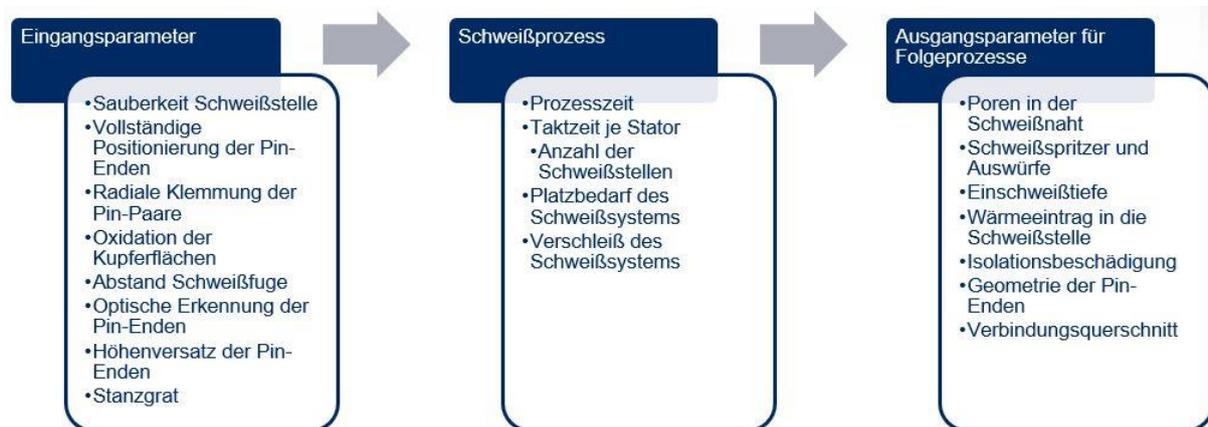


Abb. 43: SIPOC-Analyse “Verschweißen der Pin-Enden”, Quelle: Eigene Darstellung.

4.9.2.1 Konzeptauswahl “Verschweißen der Pin-Enden”

Basierend auf den Anforderungen werden sechs unterschiedliche Technologien zur Bewertung bei einer Nutzwertanalyse herangezogen. Beim Elektronenstrahlschweißen wird der gesamte Stator in einer Kammer vollständig evakuiert (Hochvakuum von 0,005 mbar) und anschließend werden die Pins mit einem Elektronenstrahl miteinander verschweißt. Die Vorteile liegen in einer poren- und spritzerfreien Schweißnaht sowie kurzen Schweißzeiten. Dem gegenüber stehen nachteilig die überdurchschnittlich hohen Anlagenkosten sowie eine höhere Taktzeit der Schweißanlage durch den Evakuierprozess.

Das Laserstrahlschweißen wurde bisher schon in realisierten Anlagenprojekten eingesetzt und zeichnet sich durch hohe Reproduzierbarkeit und geringe Prozesszeit aus. Zusätzlich wird das Laserschweißen im Vakuum von der Firma Lava-X eingesetzt, um die Spritzerbildung zu minimieren, wobei nur ein Vakuum von 1mbar nötig ist und somit geringere Taktzeiten realisierbar sind. Das WIG-Schweißen und Ultraschallschweißen sind mögliche Technologien zum Verschweißen von Kupferdrähten, welche bisher von der MAS noch nicht berücksichtigt wurden und somit zur Bewertung aufgenommen werden. Das WIG-Schweißen ist für Nichteisenmetalle wie Kupfer oder Aluminium gut geeignet und besticht durch porenfreie

⁴⁹ Vgl. Gläsel/Masuch/Weigelt/Kühl/Franke (2020), S. 36–39.

Schweißnähte hoher mechanischer Festigkeit. Im Kontext der Hairpin-Kontaktierung ist der große Platzbedarf des Schweißkopfes sowie der Zusatzwerkstoff, das nötige Prozessgas und die unkontrollierbare Schweißbadführung nachteilig.

Beim Ultraschallschweißen werden die Hairpins durch eine Sonotrode in hochfrequente Schwingungen (im Bereich von 20 kHz) versetzt und mit zusätzlicher Krafteinwirkung reibschlüssig verbunden. Die Werkstoffe werden nicht aufgeschmolzen, wodurch keine Schweißspritzer, Auswürfe oder Beschädigungen durch Wärmeeintrag entstehen. Die damit verbundene Einschnürung der Kupferleiter und der große Platzbedarf der Sonotrode inklusive Amboss (Gegenstück) wirken sich nachteilig auf das Konzept aus.⁵⁰

Schlussendlich wird das Plasma-Schweißen zur Bewertung aufgenommen, da schon Versuche in der MAS mit einem Lieferanten dazu durchgeführt wurden. Die Vorteile liegen in geringen Schweißspritzern und dem Schweißen ohne Zusatzwerkstoff. Dem gegenüber sind die höheren Prozesszeiten durch das Schweißkopfhänding und der Schweißzeit, sowie die unkontrollierbare Schweißbadführung große Nachteile des Systems.

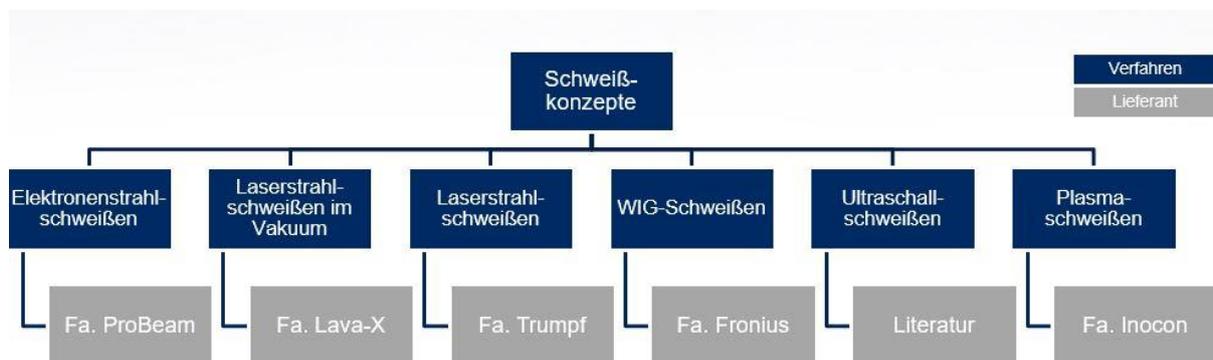


Abb. 44: Übersicht über mögliche Schweißtechnologien, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Nutzwertanalyse von sieben Teilnehmern spiegelt in ihren Ergebnissen die technische Leistungsfähigkeit des jeweiligen Systems wider. Das Elektronenstrahlschweißen erreicht den höchsten Gesamtnutzwert, da im Hochvakuum die qualitativ hochwertigsten Schweißpunkte entstehen können. Ebenso wurde das Laserstrahlschweißen (mit und ohne Vakuum) ähnlich gut bewertet, wodurch diese drei Verfahren für die Kostenanalyse verwendet werden. Die Gründe für die hohen Gesamtnutzwerte der drei Verfahren liegen in der guten Prozessführung durch die

⁵⁰ Vgl. Gläsel (2020), S. 25.

kontrollierbaren Parameter des Elektronen- bzw. Laserstrahles, den kurzen Prozesszeiten ohne einem zusätzlichen Handlingsystem für den Schweißkopf, sowie dem wartungsfreien Schweißsystem. Eine qualitativ hochwertige Schweißnaht bedingt eine möglichst saubere Oberfläche, welche durch geeignete Prozessführung in den Vorprozessen sichergestellt werden muss. Die detaillierten Auswertungen der Nutzwertanalyse sind dem Anhang (5) zu entnehmen, eine Übersicht zu den Ergebnissen des Gesamtnutzwertes der Systeme gibt Tabelle 14.

Tabelle 14: Ergebnisse Nutzwertanalyse Schweißen, Quelle: Eigene Darstellung.

Rang	Konzept	Gesamtnutzwert
1	Elektronenstrahlschweißen	316,37
2	Laserstrahlschweißen im Vakuum	312,91
3	Laserstrahlschweißen	272,32
4	Ultraschallschweißen	270,25
5	Plasmaschweißen	217,56
6	WIG-Schweißen	191,87

Eine Parameterstudie zu den wichtigsten Parametern wie Laserleistung P , Vorschubgeschwindigkeit f , Fokusbildung D_f , Fügspalt s , Anzahl der Schweißlinien k sowie deren Abstand a zueinander beim Laserstrahlschweißen von rechteckigen Kupferleitern offenbarte die jeweilige Auswirkung auf den Widerstand der Kontaktstelle. Dabei zeigte sich ein positiver Einfluss von geringen Vorschubgeschwindigkeiten sowie Fügspalte, dem gegenüber bewirkt eine höhere Laserleistung den größten Einfluss auf einen geringeren Kontaktwiderstand.⁵¹ (Siehe Abb. 45)

⁵¹ Vgl. Gläsel/Masuch/Weigelt/Kühl/Franke (2020), S. 37.

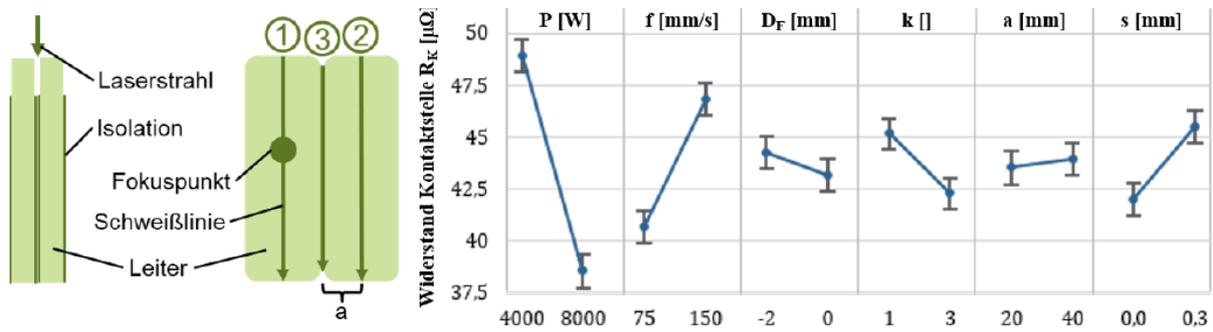


Abb. 45: Auswirkungen der Schweißparameter beim Laserschweißen auf den Widerstand der Kontaktstelle, Quelle: Gläsel/Masuch/Weigelt/Kühl/Franke (2020), S. 37.

4.9.2.2 Kostenanalyse “Verschweißen der Pin-Enden”

Wie schon beim Prozessschritt „Kupferdraht abisolieren“ wird bei diesem Prozessschritt eine detaillierte Kostenanalyse nach Periodenkosten durchgeführt, da dieser den zweiten Anlagenteil mit signifikant höheren Investitionskosten repräsentiert.

Die Berechnung der Kapitalkosten erfolgt analog wie in Kapitel 0 beschrieben, auf die Betriebskosten wird wieder über die Laufzeiten des Schweißsystems im Betriebszustand (t_S [s], Formel 4.10) und im Stand-By Zustand (t_{St} [s], Formel 4.11) über die zugehörigen Leistungsangaben auf einen Gesamtenergieverbrauch E_S [kWh] (Formel 4.12) des Schweißsystems geschlossen. Die elektrische Anschlussleistung des Laserstrahlschweißens kann aus einem Herstellerdatenblatt exakt mit 34,2 kW bei einer Leistung des Laserkopfes am Werkstück von 6 kW angegeben werden, im Stand-By Betrieb werden 16,5 kW elektrische Leistung benötigt. Die Laufzeit im Betriebszustand ergibt sich durch die vorhandene Taktzeit der Schweißtechnologie multipliziert mit der Anzahl der Schweißpunkte pro Jahr und einem Sicherheitsfaktor von 1,5. Der beschriebenen Berechnungsgrößen liegen folgende Formeln zu Grunde:

$$t_S = (t_{PVorh} \times \#_{PJ}) \times 1,5 \quad (4.10)$$

$$t_{St} = t_{max} - t_S \quad (4.11)$$

$$E_S = P_S \times t_S + P_{St} \times t_{St} \quad (4.12)$$

Ein Vervielfachen der Anlagen ist im Falle der betrachteten Schweißsysteme nicht erforderlich, da die angestrebten Stückzahlenszenarien mit den vorhandenen Taktzeiten der Systeme auch mit

unterschiedlichen Statorparametern (CPS, Nutanzahl) erreicht werden können. Bei Lasersystemen wird von 0,2 s je Schweißpunkt ausgegangen, Elektronenstrahlsysteme erreichen bis zu 0,1 s Schweißzeit, wobei bei allen Technologien eine Erkennungszeit für die Software von 0,35 s hinzukommt. Die Berechnung der erforderlichen Taktzeit t_{serf} [s] (Formel 4.13) für das Schweißsystem mit der zu produzierenden Menge an Statoren X_S , CPS, Nutanzahl N sowie der maximalen Produktionszeit t_{max} , welche durch die angenommene OEE verringert wird, folgt folgender Formel:

$$t_{serf} = \frac{(t_{max} \times OEE)}{X_S} \cdot \frac{1}{N \times \frac{CPS}{2}} \quad (4.13)$$

Aufgrund der hohen Anschaffungskosten ist das Elektronenstrahlschweißen für Stückzahlen unter 150 000 Statoren pro Jahr nicht geeignet. Erst ab großen Produktionsmengen mit einer entsprechenden Automatisierungslösung der Anlage für sehr geringe Taktzeiten fallen die Leistungskosten pro Stator auf ein Niveau mit vergleichbaren Technologien. Aufgrund der Neuheit am Markt der beiden Technologien „Elektronenstrahlschweißen“ und „Laserstrahlschweißen im Vakuum“ ist vor einer Investitionsentscheidung noch die Prozessstabilität- und qualität des Schweißprozesses in weiteren Versuchsreihen zu validieren, um den Mehrwert gegenüber einer herkömmlichen Laserstrahltechnik beim Schweißen sicherzustellen. Bei letzterer Technologie verhalten sich die Kosten über unterschiedliche Stückzahlen ähnlich zum Laserstrahlschweißen, es sind allerdings vom Lieferanten nach aktuellem Stand noch keine gesicherten Kosten in Form eines Angebotes verfügbar.

Der Kostenverlauf des Laserstrahlschweißens, das bereits vielfach im Kontext des Hairpin-Schweißens eingesetzt wird, gibt einen sehr guten Referenzwert, da in Form von bereits realisierten Projekten gesicherte Informationen zu den Kosten des gesamten Schweißsystems vorliegen. Eine Übersicht zu den Leistungskosten über verschiedene Stückzahlenszenarien gibt Abb. 46.

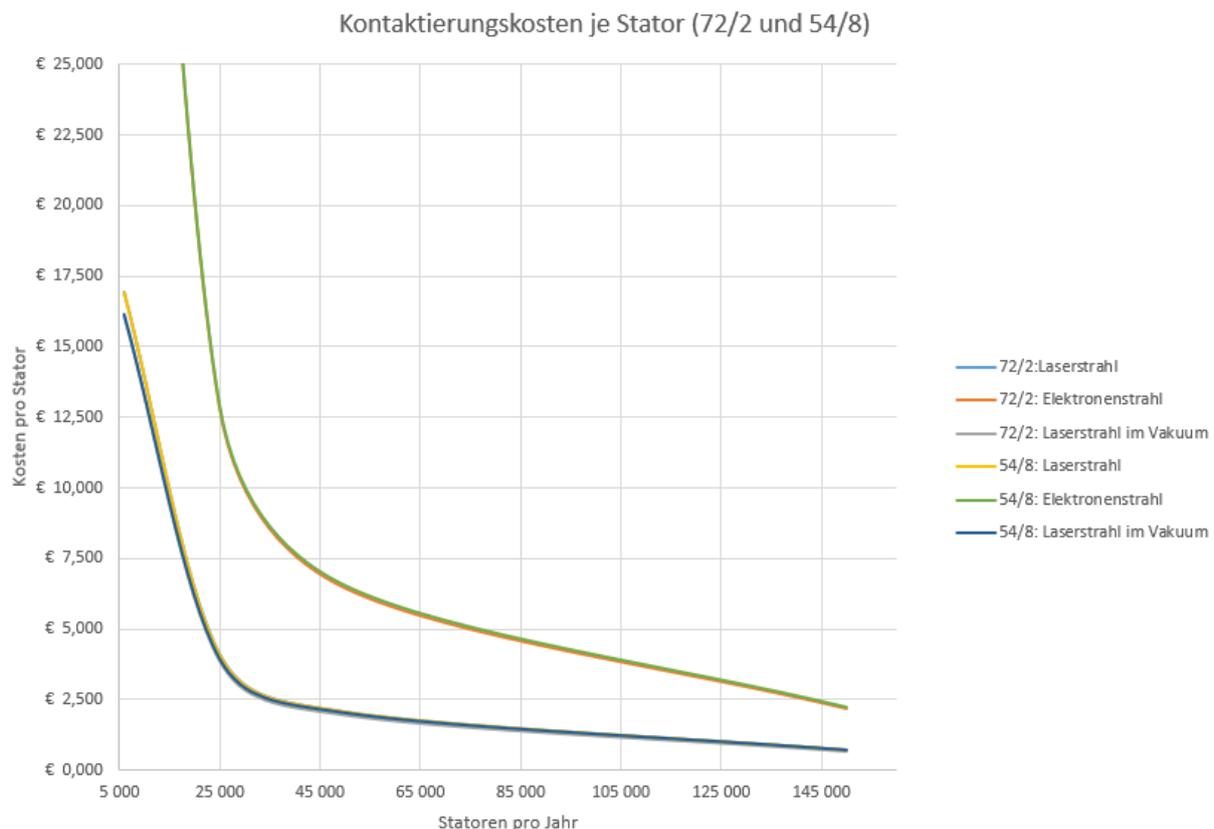


Abb. 46: Kontaktierungskosten je Stator für unterschiedliche Schweißtechnologien, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Energiekosten sind wie beim Abisolieren mittels Lasertechnik auch beim Schweißen mittels Laserstrahl zu berücksichtigen. Ein energetischer Wirkungsgrad im Bereich von 20 % kann hierbei ebenfalls angewendet werden, ein Laserzelle der Marke TruDisk 6002 der Firma Trumpf mit einer Laserleistung von 6 kW weist eine gesamte elektrische Anschlussleistung von 34,2 kW bei Nennbetrieb und 16,5 kW im Stand-By-Betrieb auf. Am Beispiel einer Jahresproduktion von 50 000 Statoren mit 144 Schweißpunkte je Stator (CPS=6, N=48) verursacht die Schweißzelle einen Energieverbrauch von 139 689 kWh und damit verbundene Energiekosten von 13 968 €. Bei der Verfolgung einer energieeffizienten Produktion ist damit bei diesem Prozessschritt ein großes Einsparungspotential gegeben.

Eine detaillierte Übersicht zur Berechnung der Periodenkosten der drei Schweißverfahren ist dem Anhang (6) zu entnehmen.

5 Simulation des Montageprozesses

In diesem Kapitel wird der gesamte in Kapitel 4 beschriebene Montageprozess in eine Simulation in der Software Siemens Plant Simulation 16 übergeführt. Zu Beginn wird eine Einführung in die Ablaufsimulation in der Automobilindustrie, den Grundlagen der ereignisdiskreten Simulation sowie der Vorgehensweise bei einem Simulationsprojekt gegeben. Darauf aufbauend stellen die folgenden Kapitel die durchgeführten Simulationsstudien einer bestehenden Montageanlage eines Kunden zur Verifikation der Simulation sowie einer Klein- und einer Großserienanlage zur zukünftigen Eigenproduktion von Hairpin-Statoren vor.

5.1 Einführung in die Ablaufsimulation in der Produktion

Seit mehr als 30 Jahren werden in der Automobilindustrie Simulationsmodelle von Produktions- und Logistikprozessen eingesetzt, um die entwickelten Systeme zu analysieren und anhand von Zielkriterien zu bewerten. Bei der Planung von Produktionssystemen ist dies insofern von Bedeutung, um die Planung von statischen Bewertungen (beispielsweise Tabellenkalkulationen) loszulösen und in eine dynamische Betrachtung in Form des Simulationsmodells überzuführen.⁵²

Dieses dynamische Modell erlaubt nun Betrachtungen von zufälligen Verhaltensmustern des Systems, welche auf beispielsweise unterschiedlichen prozentuellen Verfügbarkeiten von Stationen basieren.

Die Simulation im Bereich Produktion und Logistik ist auch in der Norm des Vereins Deutscher Ingenieure (Abk. VDI) in der VDI 3633 Blatt 1 definiert als „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“⁵³. Dies zeigt den Zweck des Nachbildens eines bestehenden Systems und darin Experimente mit den Systemparametern durchzuführen, um eine Entscheidungsgrundlage für die Realisierung zu schaffen.

Als Simulationswerkzeug dient in dieser Arbeit die Software Plant Simulation 16 von Siemens Product Lifecycle Management (Abk. PLM), welche in allen deutschen Automobilherstellern tief

⁵² Vgl. Mayer/Pöge/Spieckermann/Wenzel (2020), S. 2.

⁵³ VDI 3633 Blatt 1 (2014).

verwurzelt ist. Im Verband der Automobilindustrie (Abk. VDA) werden seit einigen Jahren eigene Bausteinbibliotheken für Plant Simulation entwickelt, um einheitliche Modelle kreieren zu können. Mittlerweile verlangen alle großen deutschen OEMs von ihren Lieferanten Simulationsmodelle mit den Bausteinen des VDA. Als Alternative zu Plant Simulation von Siemens PLM kommen noch die Werkzeuge Witness der Fa. Lanner Group und Automod der Fa. Applied Materials zum Einsatz. Diese beiden Softwaretools kommen allerdings vorwiegend in der britischen und nordamerikanischen Automobilindustrie zur Anwendung.⁵⁴

5.2 Grundlagen der Simulationsmethode

Beim Zeitverhalten von Simulationsmodellen wird grundsätzlich zwischen kontinuierlichen und diskreten Simulationen unterschieden. Bei einer kontinuierlichen Simulation sind Zustands- und Zeitmenge kontinuierlich abgebildet, wie beispielsweise bei einer Mehrkörpersimulation (Abk. MKS) oder Finite-Element-Methode (Abk. FEM). Bei diskreten Simulationen hingegen entstehen Zustandsänderungen auf Basis einer diskreten Zeitmenge. Das heißt, dass die Zustände der Modellelemente nur zu bestimmten Zeitpunkten bei Eintreten eines bestimmten Ereignisses verändert werden. Bei Modellen von Produktion und Logistik, welche meist eine diskrete Transporteinheit in Form von Stückgut betrachten, kommt eben diese diskrete Simulationsmethode zum Einsatz.⁵⁵

Bei einer diskreten Simulation wird noch zwischen zeit- und ereignisgesteuerten Methoden unterschieden. Bei ersterer schreitet die Simulationszeit in konstanten Zeitschritten Δt voran, wodurch Zustandsänderungen innerhalb des Zeitintervalls erst am Ende des Zeitschrittes Δt verarbeitet werden. Bei der ereignisgesteuerten Simulation werden die Zustandsänderungen über Ereignisse ausgelöst. Diese Ereignisse sind beispielsweise die Ein- oder Ausfahrt des Stückguts einer Förderstrecke oder das Ende einer Bearbeitung einer Bearbeitungsstation. Die jeweiligen Zustandsänderungen im Modell werden also genau zu dem Zeitpunkt vorgenommen, an dem das Ereignis eintritt⁵⁶ (vgl. Abb. 47). Die eingesetzte Software Plant Simulation 16 verwendet die

⁵⁴ Vgl. Mayer/Pöge/Spieckermann/Wenzel (2020), S. 4.

⁵⁵ Vgl. Gutenschwager/Rabe/Spieckermann/Wenzel (2017), S. 24–25.

⁵⁶ Vgl. Gutenschwager/Rabe/Spieckermann/Wenzel (2017), S. 52–55.

ereignisdiskrete Simulationsmethode, welche umgangssprachlich auch als Ablaufsimulation bezeichnet wird. Einen Überblick über die unterschiedlichen Simulationsmethoden gibt Abb. 48.

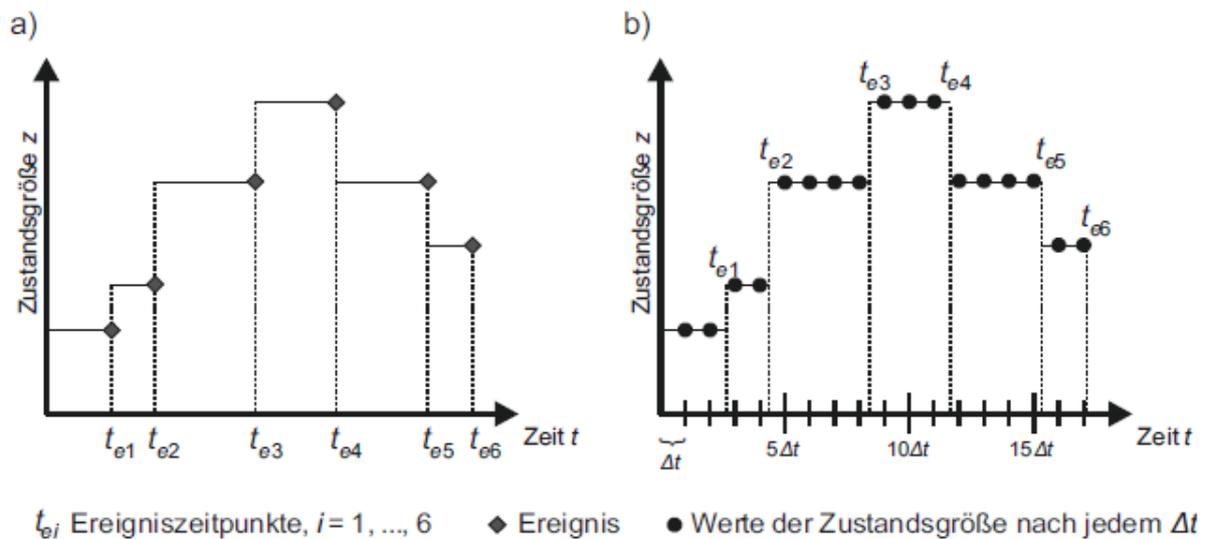


Abb. 47: Vergleich der Zustandsänderungen einer (a) ereignisgesteuerten Simulation und einer (b) zeitgesteuerten Simulation, Quelle: Gutenschwager/Rabe/Spieckermann/Wenzel (2017), S.

54.

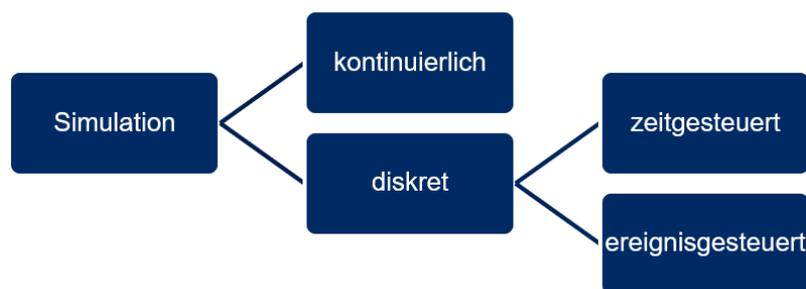


Abb. 48: Überblick über unterschiedliche Simulationsmethoden, Quelle: Gutenschwager/Rabe/Spieckermann/Wenzel (2017), S. 53.

5.3 Vorgehensweise einer Simulationsstudie

Bei Simulationsmodellen jeglicher Art und Weise ist die Vorgehensweise von zentraler Bedeutung. Eine richtige Vorgehensweise spannt den Bogen von der Datenhaltung mit einer Verwendung von aktuellen und konsistenten Eingangsdaten sowie einer geeigneten Sammlung der Ergebnisdaten bis hin zur Verifikation und Validierung (Abk. V&V), welcher eine besondere Bedeutung zukommen sollte.

Im Allgemeinen stellt sich bei der Verifikation eines Systems die Frage, ob das Ergebnis richtig

ist. Im Sinne der Ablaufsimulation würde dies bedeuten, dass das ausführbare Simulationsmodell oder das Simulationsergebnis auch korrekt ist und der Realität entspricht. Bei einer Validierung geht es allgemein darum, ob mit den richtigen Arbeitsergebnissen auch der ursprüngliche Zweck, wofür die Ergebnisse erstellt wurden, erreicht wird. Bei der vorliegenden Simulationsstudie würde dies bedeuten, die Simulationsergebnisse auf ihre Zweckentsprechung, also auf die zu erreichenden Ziele hinsichtlich Produktionsdaten wie Ausbringungsmenge oder Taktzeit, zu überprüfen.⁵⁷

Daraus lässt sich schließen, dass V&V integraler Bestandteil jeder Simulationsstudie sein sollten, indem sie während des gesamten Ablaufes berücksichtigt werden, um die Glaubwürdigkeit des Simulationsmodells sicherzustellen. Bei der Verifikation ist während der Modellerstellung die Frage „erstelle ich das Modell richtig?“ zu stellen, bei der Validierung hingegen ist die Fragestellung „erstelle ich das richtige Modell?“ zu beantworten.

Bei der Erstellung einer Ablaufsimulation der Hairpin-Stator Produktion in der vorliegenden Arbeit wird V&V integral berücksichtigt. In einem ersten Schritt wird eine Kunden-Serienanlage in die Simulation übergeführt. Dabei kommen im Modell das reale Anlagenlayout sowie reale Taktzeiten der Stationen zur Anwendung, um die geplante Taktzeit und die jährliche Ausbringungsmenge der Gesamtanlage abzubilden und zu überprüfen. In einem zweiten Schritt findet die Abbildung einer Kleinserienanlage, welche sich derzeit in der Planungs- und Entwicklungsphase befindet, in Plant Simulation statt, um mit diesem Modell die definierten Stückzahlenszenarien von 25 000 und 50 000 Statoren pro Jahr abzusichern. Schlussendlich wird das Modell der Kleinserienanlage erweitert, um durch das Duplizieren von einzelnen Maschinen die Taktzeit zu verringern und eine Anlage für das Stückzahlenszenario von 150 000 Statoren pro Jahr abzubilden. Die beschriebene Vorgehensweise der Simulationsstudien ist in Abb. 49 zusammengefasst dargestellt.

⁵⁷ Vgl. Mayer/Pöge/Spieckermann/Wenzel (2020), S. 6-8.

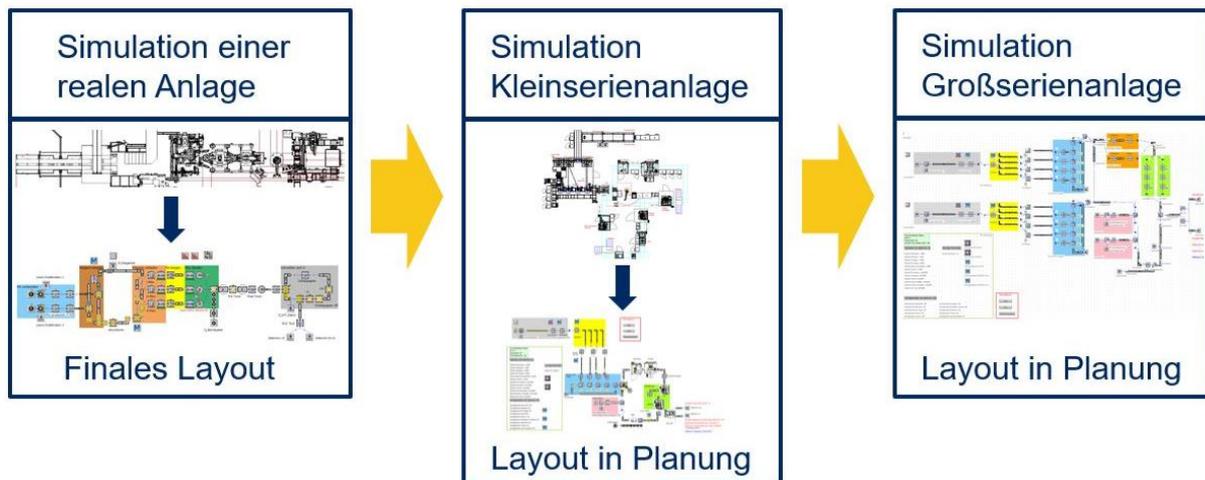


Abb. 49: Vorgehensweise bei der Ablaufsimulation der Hairpin-Stator Montage, Quelle: Eigene Darstellung.

5.4 Simulationsmodelle Hairpin-Stator Montage

In diesem Kapitel werden die drei in der Vorgehensweise beschriebenen Modelle beschrieben und deren Ergebnisse präsentiert. Beginnend mit der Verifikation und Validierung der Simulation mit den realen Taktzeiten der aktuellen Kundenanlage sowie der Erreichung der geplanten jährlichen Ausbringungsmenge in der Simulation richtet sich der Hauptfokus auf die Kleinserienanlage, welche sich derzeit in der Entwicklungsphase befindet. Zum Abschluss des Kapitels wird mit den bestehenden Maschinenkonzepten eine Großserienanlage konzipiert, um eine Grundlage für spätere Großserienprojekte zu schaffen.

5.4.1 Simulationsmodell reale Kundenanlage

Um die Simulation in Plant Simulation zu verifizieren, wird eine aktuelle Serienanlage verwendet, welche sich derzeit in der Anlaufphase befindet und somit das Anlagenlayout und die Taktzeiten der Stationen in das Modell übernommen werden kann. Das mit diesen Daten erstellte Modell kann im Anschluss anhand der Ausbringungsmenge validiert werden, da die Anlage für eine Jahresproduktion von 300 000 Statoren ausgelegt ist.

Der Hairpin-Stator, welcher auf dieser Anlage produziert wird, weist zwei Lagen und 72 Nuten auf, wobei das Wickelschema vom Kunden bereitgestellt wurde und drei verschiedene Pin-Typen enthält. Aufseiten der Prozesstechnologien kommt für das Abisolieren ein Faserlasersystem zum Einsatz, das Pin-biegen wurde speziell für den Anwendungsfall entwickelt, um sechs Pins gleichzeitig zu biegen. Der Twistprozess wird mittels Twistkronen realisiert und beim Prozessschritt Schweißen kommt das Laserschweißen zur Anwendung. Für die jeweiligen

Prozessschritte sind folgende Taktzeiten im Modell hinterlegt: (siehe Tabelle 15)

Tabelle 15: Taktzeiten zur Verifikation des Simulationsmodells zur Statorproduktion, Quelle:
Eigene Darstellung.

Pin ablängen	1 s	Pin-Enden schweißen (72 Schweißpunkte)	40 s
Pins abisolieren (12x)	8 s	Reinigung des Stators	22 s
Pre-twisten	3 s	Visual Inspection	38 s
Fügen mit Blechpaket	10 s	Pin biegen (6 Pins)	6 s
Final-twist	15 s	Magazin beladen (pro Pin)	1 s
Pin-Enden kalibrieren	6 s	Magazin entladen	3 s
Schutzpapier beladen	18 s		

Im ersten Anlagenabschnitt (Pin vorbereiten) werden die abgelängten Pins zu je zwölf Stück in ein Magazin bestückt und anschließend über ein Transportsystem in die Abisolierzelle und weiter zu den Biegemaschinen gefördert. Die drei unterschiedlichen Pin-Typen werden je nach Bedarf im vorderen Anlagenteil erzeugt, gekennzeichnet über unterschiedliche Pinlängen und über das Magazin, welches nur sortenrein bestückt wird, zu den jeweiligen Biegemaschinen transportiert. Im Simulationsmodell wird dies so vereinfacht, dass den Magazinen durch die Produktionsliste ein Pin-Typ aufgeprägt wird und je nach Typ eine festgelegte Anzahl an Magazinen erzeugt wird. Eine weitere Vereinfachung im Modell kommt im mittleren Anlagenteil zum Tragen. Das Blechpaket wird in der realen Anlage über den Roboter an einen Drehtisch übergeben, welcher um 180° geschwenkt wird, um die gesteckte Wicklung in das Blechpaket zu fügen. Im Simulationsmodell wird das Blechpaket direkt beim Stecken mit der Wicklung gefügt und anschließend weitergetaktet, die jeweiligen Zeiten bleiben jedoch unverändert.

Im letzten Anlagenteil legt ein Roboter den Stator auf einen Werkstückträger, welcher ihn über ein Fördersystem zu den letzten Stationen Schweißen, Reinigen, Visual Inspection und End-Of-Line-Test befördert. Dieser Teil bleibt in der Simulation unverändert. Eine Übersicht über das Modell in Plant Simulation, welches vom realen Anlagenlayout abgewandelt wurde, gibt Abb. 50.

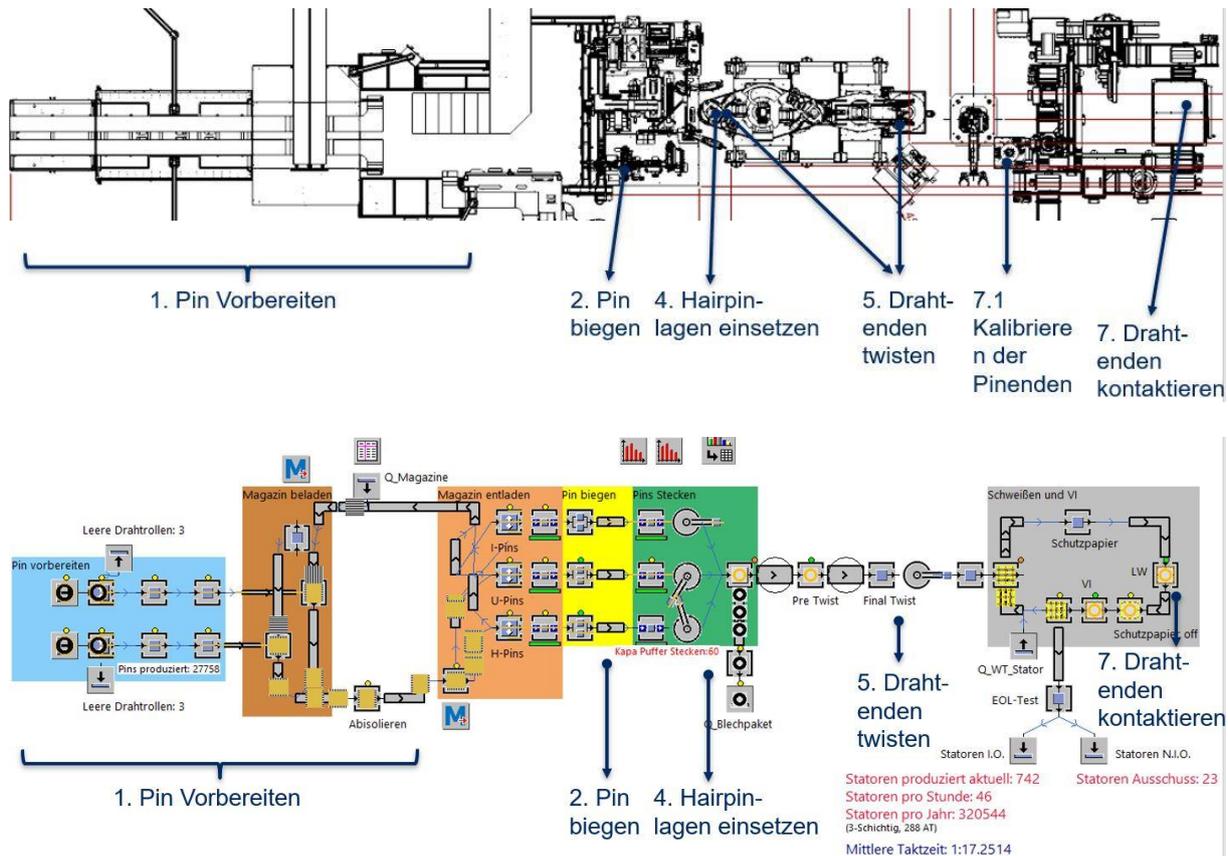


Abb. 50: Überführung des realen Anlagenlayouts (oben) in ein Simulationsmodell zur Ablaufsimulation (unten), Quelle: Eigene Darstellung.

Die Auswertung der Simulation über einen Zeitraum von zwei Schichten (16 h) führt zu einer mittleren Taktzeit der Gesamtanlage von 1:17 min und einer Ausbringungsmenge von 46 Statoren pro Stunde. Mit den angestrebten Produktionszeiten von 288 Arbeitstagen und drei Schichten ergibt sich eine hochgerechnete Produktionsmenge von 320 544 Statoren pro Jahr, womit das Modell den geplanten jährlichen Durchsatz erreicht.

Auf eine weitere Ausführung dieses Modells wird an dieser Stelle verzichtet, da im nächsten Kapitel die Kleinserienanlage detailliert in der Simulation betrachtet wird.

5.4.2 Simulationsmodell Kleinserienanlage

In einem ersten Schritt zur Eigenproduktion von Hairpin-Statoren für einen Schlüsselkunden mit festgelegten jährlichen Produktionsmengen wird eine Kleinserienanlage mit den intern entwickelten Maschinen je Prozessschritt für eine Jahresmenge von 50 000 Statoren konzipiert. Da weder der Kunde noch die Produktdetails des Stators für die zukünftige Anlage bekannt sind, sollen die jeweiligen Maschinenkonzepte so ausgelegt werden, dass möglichst viele Produktkonfigurationen gefertigt werden können. Um der Auslegung der Anlagen einen

Rahmen zu geben ist es das Ziel, einen Stator mit maximal 72 Nuten und acht Leitern pro Nut (CPS), in weiterer Folge mit 72/8 bezeichnet, vollautomatisiert fertigen zu können. Im Rahmen der Simulation wird auf vier unterschiedliche Produktkonfigurationen (36/4, 48/6, 54/8, 72/8) eingegangen, um die Auswirkungen auf die Produktion abschätzen zu können.

5.4.2.1 Beschreibung des Modellaufbaues

Das Anlagenlayout als Grundlage für das Simulationsmodell wurde an die aktuelle Ausarbeitung einer Kleinserienanlage des Vertriebs angelehnt, wobei erwähnt sei, dass dieses Layout noch nicht einem detaillierten und produktionstechnisch optimierten Anlagenkonzept entspricht. Produktseitig ist das Grundmodell für einen Stator mit 48 Nuten und 6 Lagen pro Nut ausgelegt.

Das Abisolieren der Pin-Enden wird hierbei In-Line nach dem Richten des Drahtes durchgeführt, darauffolgend werden die abgelängten Pins über eine Förderanlage in die Biegemaschinen geleitet. Für die gesamte Anlage „Pin vorbereiten“ wird eine Taktzeit von 1s angestrebt. In der Biegeanlage sind die Konzepte Miba Schwenkbiegen für den 2D-Bug sowie das Gesenkbiegen für den 3D-Bug mit einer gesamten Taktzeit von 4s geplant. Den ersten Abschnitt der Statorlinie schließt die Anlage zum automatisierten Vormontieren der Pins zu einer Wicklung und einem anschließenden Fügen in das Blechpaket ab (siehe Kapitel 4.6). Die gewählten Produktparameter CPS und Nutanzahl, welche in eine definierte Anzahl an Pins je Wickelschema resultieren, wirken sich signifikant auf diese Anlage aus. Die Taktzeit pro Pin für die Roboter, welche die erste und letzte Lage vormontieren wird auf 2 s, die des Tackers, welcher alle inneren Lagen montiert mit 1 s festgelegt.

Nach dem Fügen der Wicklung in das Blechpaket befindet sich der Stator auf einem Werkstückträger, welcher den Stator in einem geschlossenen Fördersystem zu den Anlagen Aufweiten, Twisten, Schweißen und EOL-Test befördert. Das Aufweiten wird vonseiten der Produktauslegung durch die Nutanzahl beeinflusst, da das Pinpaket nutweise aufgeweitet wird. Das Twisten durch die Anzahl der Lagen aufgrund des lagenweisen Arbeitsprinzips und das Schweißen durch beide Parameter, da eine Erhöhung von CPS und Nutanzahl zwangsweise zu einer Erhöhung der Schweißpunkte führt. Beim EOL-Test wird in den Modellen eine Ausschussrate von 3 % angenommen, da in der Realität dieser Wert (lt. MAS) den Grenzwert der Ausschussrate für eine Serienproduktion darstellt. Das Anlagenlayout mit den beschriebenen Prozessschritten zur automatisierten Stator-Montage ist in Abb. 51 ersichtlich.

Anlage durch eine Produktionsliste gesteuert, in derer die ersten beiden Spalten „Typ“ und die jeweilige „Anzahl“ je Typ festzulegen sind. In diesem Fall liegen vier unterschiedliche Typen vor, da angenommen wird, dass jeder Steckplatz einen eigenen Pintyp verlangt. In weiterer Folge wird die Station „Ablängen“ von einer Methodensteuerung gelenkt, welche den festgelegten Pin-Typ in den erzeugten Pins als Attribut hinterlegt, um sie anschließend der jeweiligen Steckstation zuweisen zu können. Somit ist je nach Wickelschema beziehungsweise Anzahl an unterschiedlichen Pin-Typen die Produktionsliste anzupassen. Darüber hinaus kann zu Beginn die Anzahl der Pins, die je Drahtrolle erzeugt wird, festgelegt werden, sowie die Rüstzeit für den Drahtrollenwechsel, welche insbesondere für die Taktzeit der Gesamtanlage von hoher Bedeutung ist. Eine visuelle Darstellung des Netzwerkes „Pin vorbereiten“ ist Abb. 52 zu entnehmen.

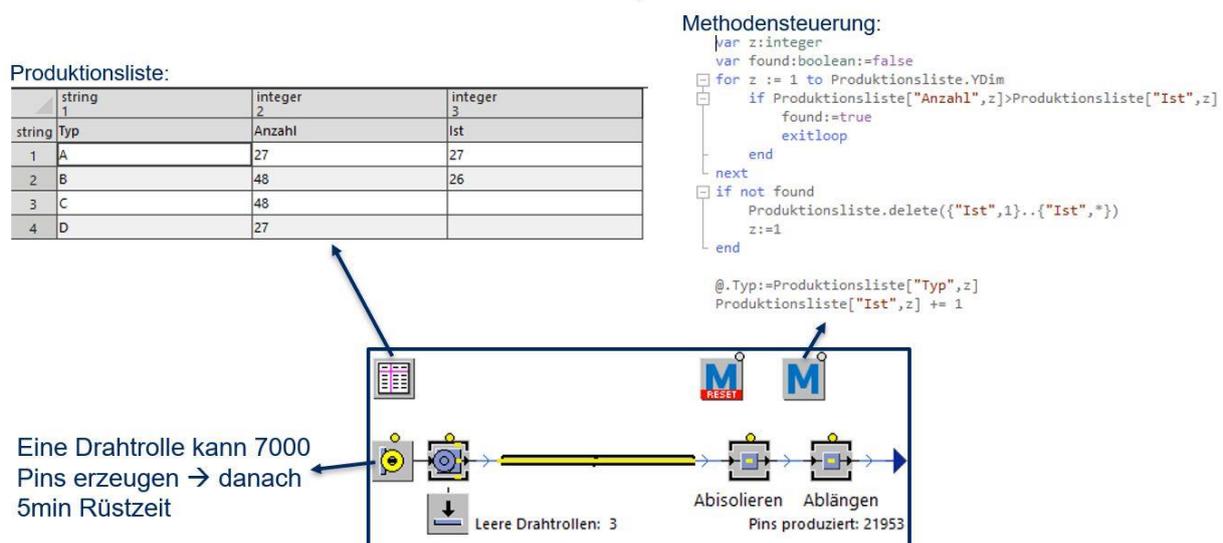


Abb. 52: Darstellung des Netzwerkes „Pin vorbereiten“ in Plant Simulation, Quelle: Eigene Darstellung.

Umlagern

Das Netzwerk Umlagern hat die Aufgabe, die unterschiedlichen Pin-Typen den richtigen Förderanlagen zuzuweisen, welche in weiterer Folge in die Biegemaschine und auf den entsprechenden Steckplatz münden. Die Station basiert erneut auf einer Methodensteuerung, welche eine Fallunterscheidung anhand des zugewiesenen Attributs „Typ“ durchführt und die einzelnen Pins den entsprechenden Plätzen zuweist. Abb. 53 gibt eine Übersicht über die Steuerung und den Aufbau des beschriebenen Netzwerkes in der Software.

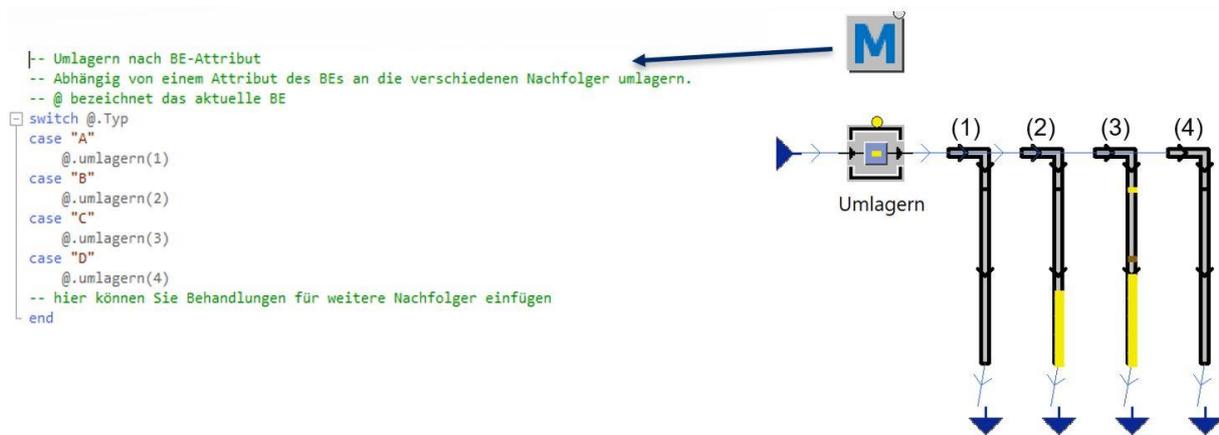


Abb. 53: Darstellung des Netzwerks "Umlagern" in Plant Simulation, Quelle: Eigene Darstellung.

Stecken und Fügen

Nachdem die Pins die einzelnen Stationen der Biegemaschinen passiert haben, laufen die gebogenen Pins in den jeweiligen Fördersträngen in die Steckstationen ein. In diesem Netzwerk ist bei jeder Station die jeweilige Anzahl an Pins, welche pro Station zu stecken ist, zu definieren. Ebenso ist die Anzahl an Container, welche im Kreis gefördert werden und als Träger für die zu steckende Wicklung fungieren, in der Quelle zu definieren. Bei insgesamt vier Steckstationen werden mindestens fünf Container benötigt.

In der letzten Station wird die gesamte Wicklung mit Hilfe eines speziellen Greifers aus dem Container gehoben und in der darauffolgenden Montageeinheit mit dem Blechpaket axial gefügt. Eine Übersicht über das Netzwerk „Stecken und Fügen“ in Plant Simulation gibt Abb. 54.

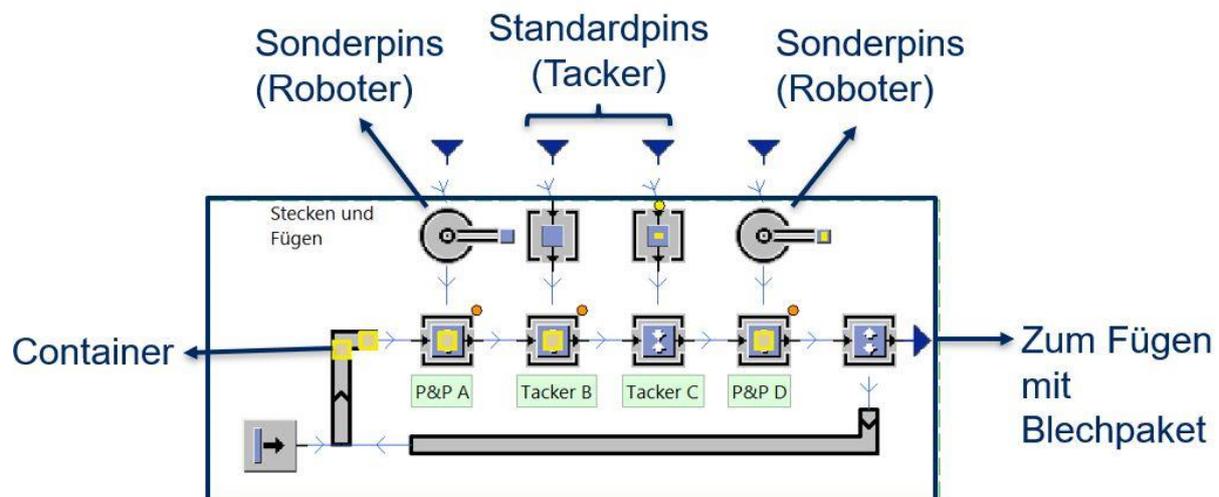


Abb. 54: Darstellung des Netzwerkes "Stecken und Fügen" in Plant Simulation, Quelle: Eigene Darstellung.

Nutisolation

Zum Abschluss der Netzwerkbeschreibungen wird die Realisierung der Nutisolation im Modell beschrieben, welche vom Ablauf ähnlich zur ersten Maschine „Pin vorbereiten“ ist. Eine Papierrolle muss in der Maschine gerüstet werden, wobei eine gewisse Anzahl an Papierstücken erzeugt und in die Nuten des Blechpakets axial eingebracht wird. Die Anzahl an Papierstücken je Blechpaket (entspricht der Nutanzahl N) ist in der Montagestation zu definieren. Eine Übersicht dazu gibt Abb. 55.

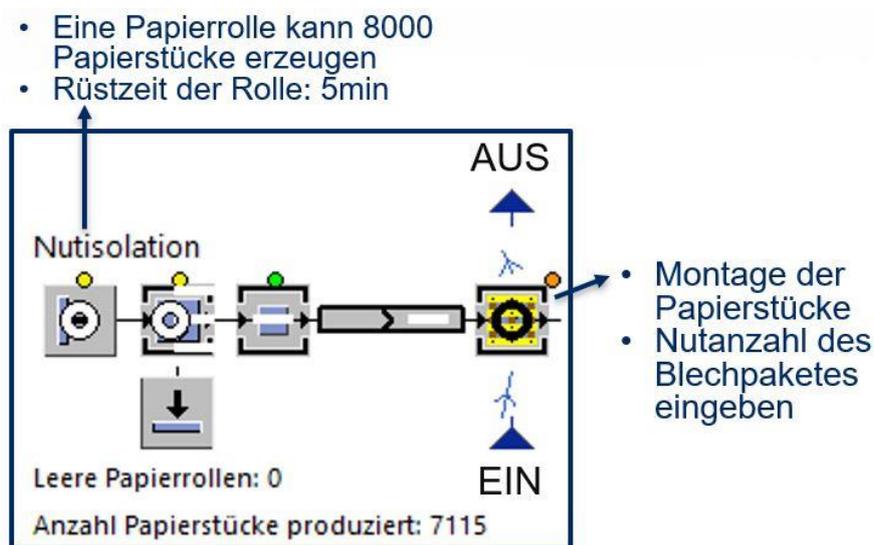


Abb. 55: Darstellung des Netzwerkes „Nutisolation“ in Plant Simulation, Quelle: Eigene Darstellung.

Das Gesamtmodell in Plant Simulation welches alle Netzwerke verbindet sowie die Daten der Ausbringungsmenge, Taktzeiten und Verfügbarkeiten visualisiert, ist in Abb. 56 ersichtlich.

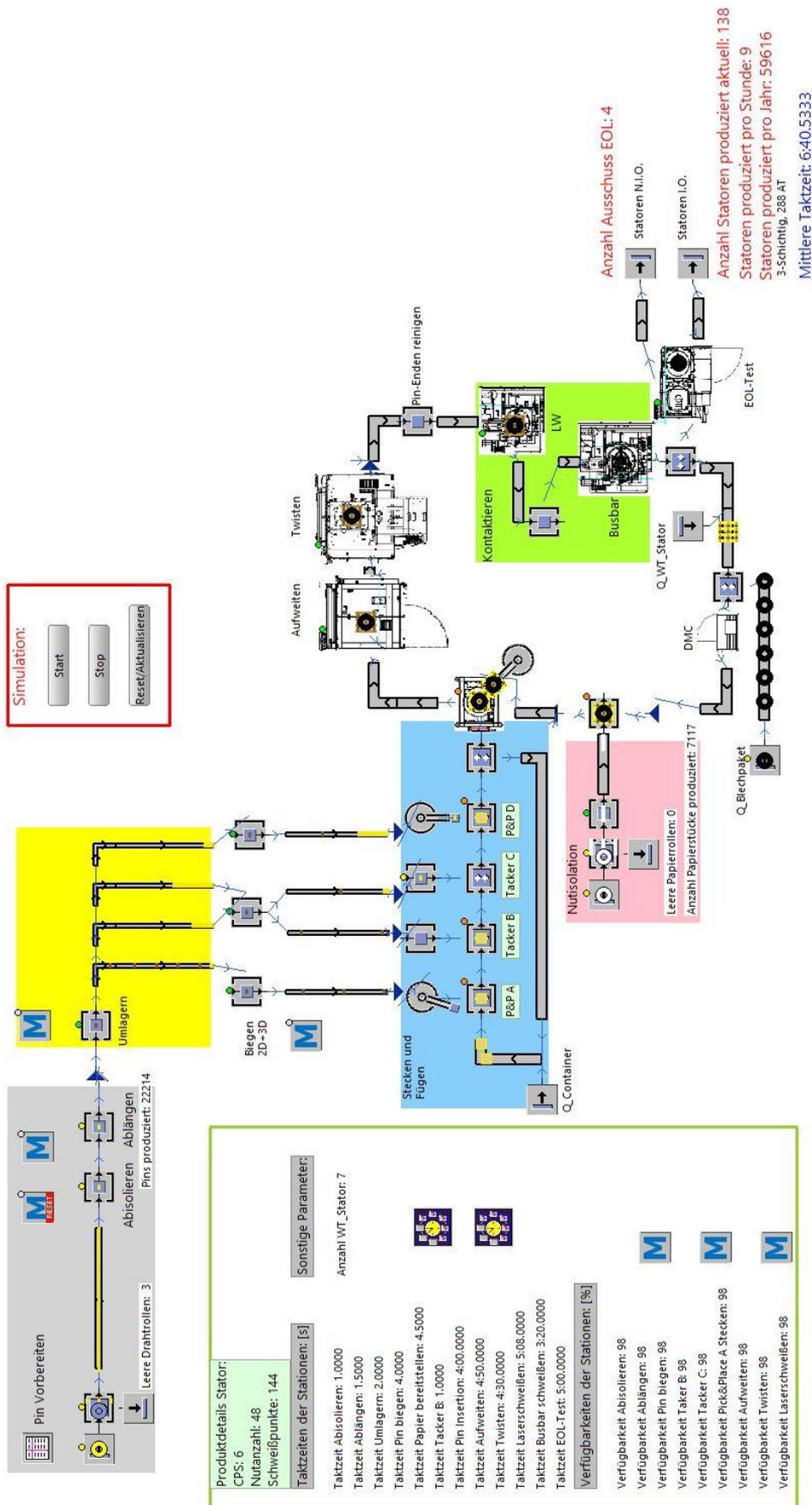


Abb. 56: Gesamtmodell Kleinserienanlage in Plant Simulation, Quelle: Eigene Darstellung

5.4.2.2 Ergebnisse und Optimierungen

Die in diesem Kapitel beschriebenen Ergebnisse basieren wie bereits erwähnt auf dem Produktdesign des Hairpin-Stators mit 48 Nuten und 6 Leitern Pro Nut. Dies ergibt überschlägig eine Anzahl von 144 Pins sowie 144 Schweißpunkten je Stator, die genauen Parameter sind vom realisierten Wickelschema abhängig. Am Ende des Kapitels werden die Auswirkungen eines abweichenden Produktdesigns auf die Taktzeit und Ausbringungsmenge des bestehenden Anlagenkonzeptes dargelegt und darauf aufbauend Verbesserungen abgeleitet.

5.4.2.2.1 Anlagenhochlauf

Das Hochfahren der Montageanlage ist zeitlich von den einzelnen Taktzeiten sowie Transportzeiten der Anlagen abhängig, da sich diese Zeiten aufsummieren, bis der erste Stator produziert wurde (eine Tabelle mit den einzelnen Taktzeiten je Prozessschritt ist dem Anhang (7) zu entnehmen). Im betrachteten Grundmodell beläuft sich diese Hochlaufzeit auf ungefähr 39 Minuten. Nach diesem Zeitraum ist die Anlage fähig, in Taktzeit zu produzieren wobei die relative Ausgabegröße „Durchsatz pro Stunde“ kontinuierlich einem Grenzwert der Anlage entgegenstrebt. Dieser Grenzwert beträgt in diesem Fall neun Statoren pro Stunde, wie in Abb. 57 ersichtlich, wird dieser Wert erst nach einer achtstündigen Produktionsschicht erreicht, da die Zeit zu Beginn ohne fertig produzierte Statoren miteinbezogen ist. Darüber hinaus sind in dieser Hochlaufkurve die zyklischen Rüstzeiten während des Drahtrollenwechsels ersichtlich (rot markiert), da während dieses Zeitraums die gesamte Pinproduktion lahmgelegt ist und somit die Kurve alle vier Stunden einen kleinen Einbruch aufweist. Die Intensität des Einbruchs der Hochlaufkurve nimmt allerdings im eingeschwungenen Zustand der Anlage aufgrund von aufgebauten Puffern ab.

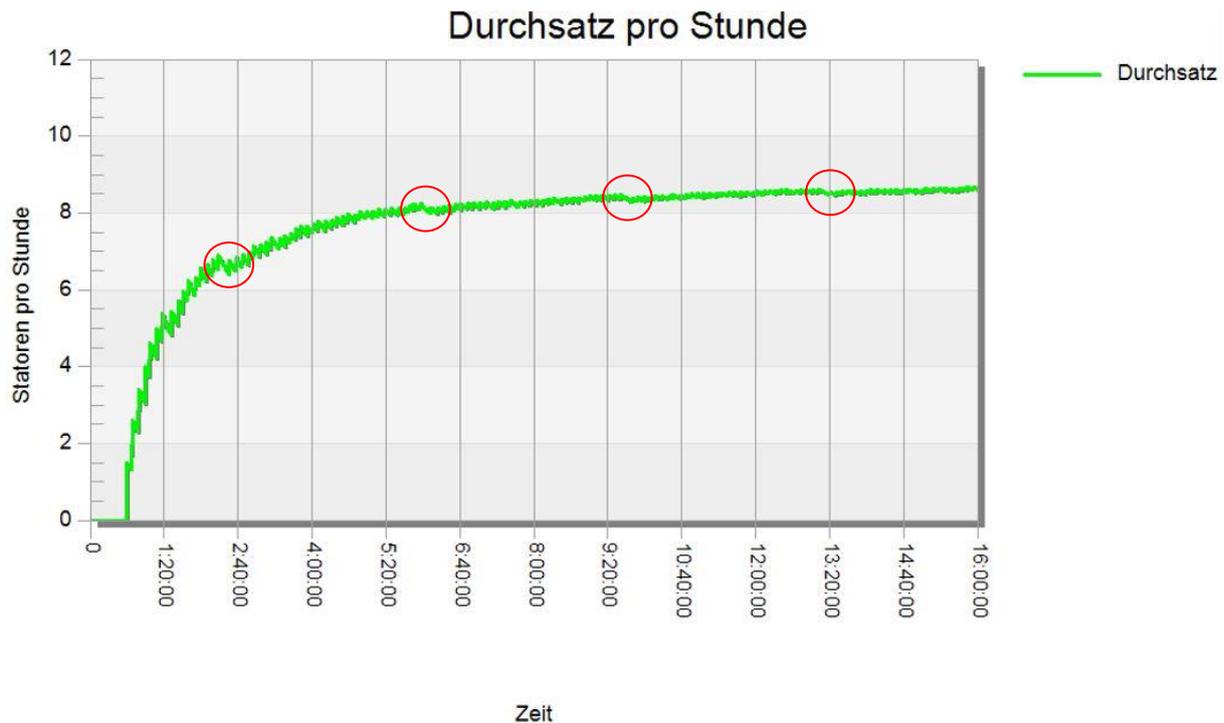


Abb. 57: Diagramm Ausbringungsmenge an Statoren pro Stunde, Quelle: Eigene Darstellung.

5.4.2.2 Einflüsse auf die Ausbringungsmenge

Verfügbarkeit der Stationen

Die angestrebte prozentuelle Verfügbarkeit der einzelnen Stationen hat einen signifikanten Einfluss auf die Ausbringungsmenge an Statoren der Gesamtanlage. Dies lässt sich auch an der wichtigen Kennzahl der Produktionstechnik, der OEE [%], festhalten, da die Anlagenverfügbarkeit V [%] einen von drei Bausteinen zur Berechnung der Kennzahl darstellt und somit mit sinkender Verfügbarkeiten der Anlage auch die Gesamtanlageneffektivität sinkt. Mithilfe des Leistungsgrades L [%] (repräsentiert kurze Stillstände und Produktion mit verminderter Geschwindigkeit) und des Qualitätsgrades Q [%] (repräsentiert den Ausschuss der Anlage) wird die OEE wie folgt berechnet:

$$OEE = V \times L \times Q \quad (5.1)$$

Wird die Ausbringung der Anlage von 212 Statoren bei zwei Schichten (16h) bei 100% Verfügbarkeit als Referenz verwendet, so ist mit einem Verlust der Ausbringungsmenge von 12% zu rechnen, falls die Verfügbarkeiten der einzelnen Maschinen nicht mehr als 94% betragen. Sind die Verfügbarkeiten über einen längeren Zeitraum konstant niedriger, wirkt sich das immer stärker auf die Ausbringungsmenge aus, wie auch im Diagramm mit dem Vergleich unterschiedlicher Verfügbarkeiten über die Produktionszeit ersichtlich ist (siehe Abb. 58).

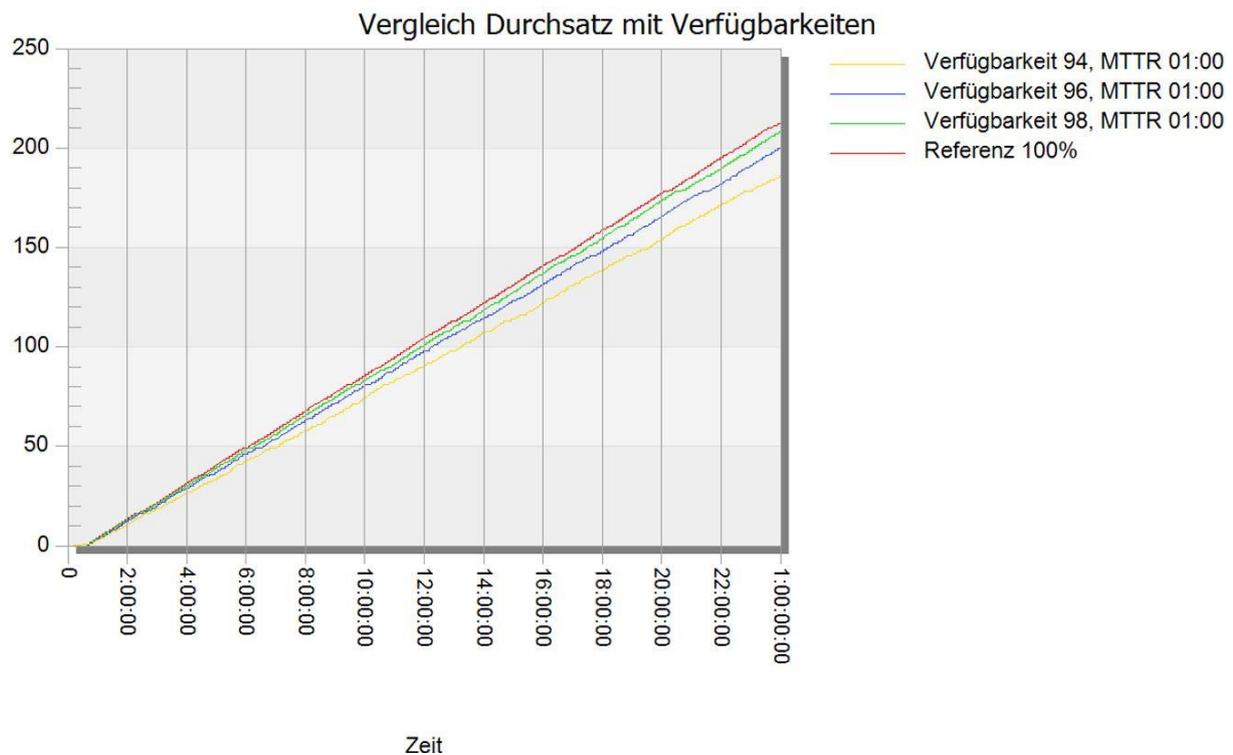


Abb. 58: Vergleich unterschiedlicher Verfügbarkeiten auf die Ausbringungsmenge, Quelle: Eigene Darstellung.

Zusätzlich sei an dieser Stelle die Kenngröße „Mean Time To Repair“ (Abk. MTTR), also die Zeit bis die eingetretene Störung einer Station repariert wird beziehungsweise die Station wieder störungsfrei arbeitet, erwähnt. Im vorliegenden Simulationsmodell wurde 01:00 min angenommen, wobei dieser Zeitraum unter allen Umständen in der Realität auf ein Minimum zu reduzieren ist, um den direkten Einfluss der MTTR auf die OEE und die Taktzeit der Gesamtanlage so gering wie möglich zu halten.

Anzahl der Werkstückträger des Stators

In einem mehrstufigen Experimentdesign kann mit Hilfe des Experimentmanagers in Plant Simulation unter der Definition von Ein- und Ausgangsgrößen der optimale Wert der Eingangsgröße für die Maximierung der Ausgangsgröße ermittelt werden. Als Eingangsgröße dient die Anzahl zu erzeugender Werkstückträger für den Stator, um die Ausgangsgröße Durchsatz pro Stunde zu maximieren. Das Ergebnis dieses Experimentdesigns zeigt eine Stagnierung der Ausbringungsmenge ab sechs Werkstückträger (siehe Abb. 59). Somit wird eine Anzahl von sieben Werkstückträger für den Hairpin-Stator in der Anlage gewählt. Dadurch ist es möglich, Kosten für Betriebsmittel einzusparen, welche keinen Mehrwert für die Produktionsmenge der Anlage schaffen.

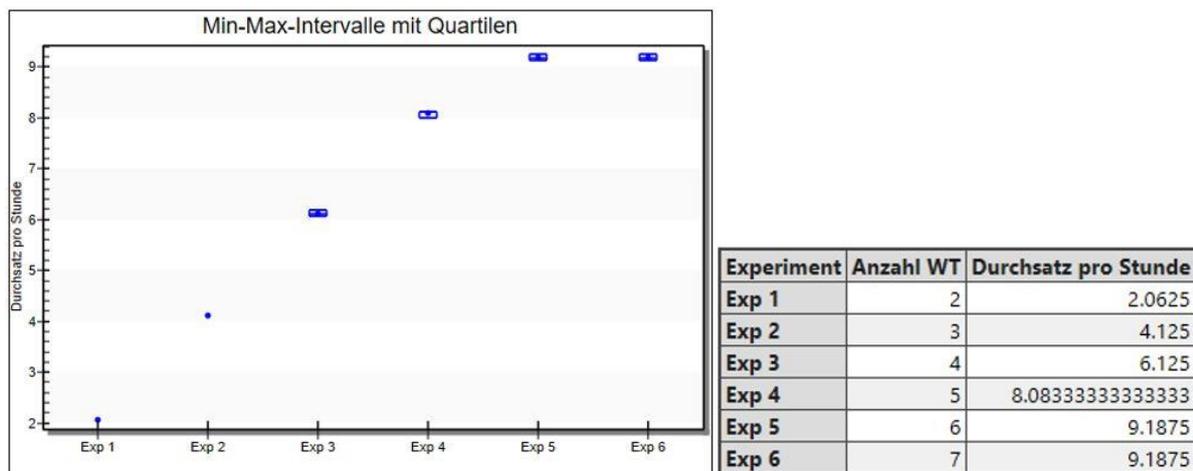


Abb. 59: Mehrstufiges Experimentdesign zur Anzahl der Werkstückträger des Stators, Quelle: Eigene Darstellung.

5.4.2.2.3 Auswirkung des Produktdesigns CPS und Nutanzahl

Die beiden Produktparameter Nutanzahl und CPS sind direkt mit der Anzahl der Pins, welche für die Wicklung des Hairpin-Stators benötigt werden, verknüpft und diese ist abhängig vom Wickelschema jeweils unterschiedlich. Die genaue Pinanzahl je Stator hängt zusätzlich von der Anzahl an benötigten Sonderpins $\#_{S0}$ [-] ab, da diese meist als I-Pins ausgeführt sind. Sie belegen nur eine Nut im Gegensatz zu Hairpins, welche bedingt durch ihre Haarnadelform zwei Nuten des Blechpaketes belegen. Näherungsweise wird in diesem Kapitel die Pinanzahl je Stator $\#_{PS}$ [-] (Formel 5.2) mit folgender Formel berechnet und eine Anzahl an Sonderpins von 12 angenommen:

$$\#_{PS} = \frac{CPS \times N - \#_{S0}}{2} + \#_{S0} \quad (5.2)$$

Zur Abschätzung der Auswirkungen der beiden Produktparameter auf die Produktionstechnik kommt die Design of Experiments Methode (Abk. DoE) zum Einsatz. Ausgehend vom beschriebenen Grundmodell wird die Nutanzahl auf 36 und CPS auf 4 verringert sowie auf CPS 8 und Nutanzahl 54 erhöht, da dies aus Sicht der elektromagnetischen Auslegung die gängigsten Parametervarianten darstellen. Als Zielgröße dient die jeweilige jährliche Ausbringungsmenge der Gesamtanlage, um das übergeordnete Ziel der Kleinserienanlage mit dem Stückzahlenszenario von 50 000 Statoren pro Jahr zu erreichen.

Durch die Variation der Parameter ergeben sich enorme Auswirkungen, sowohl auf den vorderen als auch auf den hinteren Anlagenteil. Einerseits muss im vorderen Anlagenbereich die

Anlage „Pin vorbereiten“ mehr oder weniger Pins in der gleichen Taktzeit produzieren. In weiterer Folge ändert sich in der Anlage „Stecken und Fügen“ mit der Anzahl der Lagen die Anzahl der Steckstationen und somit die Dauer, bis eine Wicklung finalisiert werden kann. Andererseits ändern die Produktparameter die Taktzeiten der Stationen im hinteren Anlagenbereich zum Aufweiten, Twisten und Schweißen der Hairpinlagen.

Die Auswertung der drei Simulationsmodelle zeigt naturgemäß eine Erhöhung der Anlagentaktzeit bei einer Zunahme der Eingangsparameter. Darüber hinaus nimmt die Steigung der Anlaufkurve bei einer Steigerung der Produktparameter ab, wobei die Begründung in den höheren Taktzeiten und der hohen Pinanzahl je Stator liegt, womit die Zeit bis zum ersten produzierten Stator bei Produktionsbeginn verlängert wird.

Außerdem wird ersichtlich, dass die obere Grenze des Experimentdesigns das Ziel der jährlichen Ausbringungsmenge nicht mehr erreicht und Maßnahmen für eine Reduktion der Taktzeit ergriffen werden müssen. Da als obere Spezifikationsgrenze der Kleinserienanlage 72 Nuten und 8 Leiter pro Nut in der MAS festgelegt sind, wird anhand dieser Konfiguration eine Anpassung des Anlagendesigns durchgeführt, um die geforderte Ausbringungsmenge zu erreichen. Dazu wird die Anlage „Pin vorbereiten“ dupliziert, um der hohen Pinanzahl je Stator Rechnung zu tragen, sowie die Anzahl der Biegemaschinen auf fünf erhöht, welche der Anzahl an erforderlichen Steckstationen bei acht Lagen entspricht. Zusätzlich wurde die Taktzeit der Biegeanlagen auf 03:00 min verringert. Das angepasste Modell liefert schlussendlich eine Taktzeit von 07:52 min, resultierend in eine jährliche Produktionsmenge von 51 264 Statoren und somit eine Erreichung des Stückzahlenszenarios der Kleinserienanlage. Eine Zusammenfassung der Anlagentaktzeiten je Produktvariante sowie alle Ergebnisse der Modelle ist im Anhang (7) ersichtlich, eine Übersicht der DoE-Struktur mit den variablen Eingangsfaktoren CPS und N sowie den resultierenden Zielgrößen gibt Abb. 60.

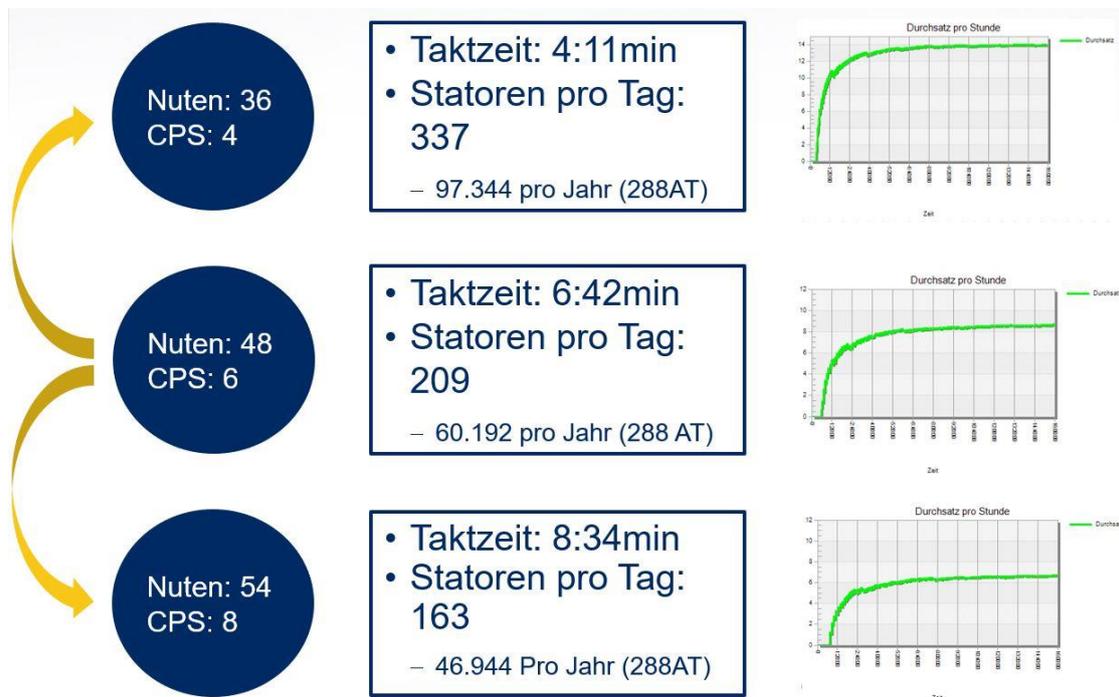


Abb. 60: DoE-Modell der Produktparameter des Hairpin-Stators, Quelle: Eigene Darstellung.

5.4.3 Simulationsmodell Großserienanlage

Eine Serienanlage zur Produktion im Maßstab einer Großserie wurde bisher nur für einen Stator mit zwei Leitern pro Nut und 72 Nuten konzipiert, welche im Kapitel 5.4.1 in die Simulation übergeführt wurde. Die verwendeten Konzepte der einzelnen Prozessschritte der realisierten Kundenanlage weichen allerdings stark von den beschriebenen Konzepten zur Eigenproduktion ab, da die Prozessschritte der Kleinserienanlage für bis zu acht Leiter pro Nut ausgelegt sind. Um einen Ausblick für eine mögliche Eigenproduktion im Bereich von 150 000 Statoren pro Jahr mit der bestehenden Prozesstechnologie der Kleinserienanlage zu geben, werden in diesem Modell die Anlagen der einzelnen Prozessschritte dupliziert, beziehungsweise die Anlage „Pin vorbereiten“ verdreifacht, um die Taktzeit zu verkürzen und eine höhere Ausbringungsmenge zu erreichen. Ein konstruktives Layout der Gesamtanlage ist im derzeitigen Entwicklungsstadium noch nicht vorhanden. Somit ist diese Simulationsstudie als eine erste Absicherung der Planung dieser Anlage zu verstehen, ob mit den angestrebten Prozesstechnologien und damit verbundenen Taktzeiten überhaupt die gewünschte Produktionsmenge zu erreichen ist.

Das Ergebnis der Ablaufsimulation eines dreischichtigen Produktionstages zeigt eine Taktzeit von 02:44 min je produzierten Stator und somit eine jährliche Ausbringungsmenge von 147 456 Statoren, womit sich das angestrebte Stückzahl Szenario erreichen lässt. Parameter wie eine Ausschussrate von 3 %, Verfügbarkeit der Stationen von 98 % sowie Draht- und

Papierrollengröße wurden unverändert von der Kleinserienanlage übernommen, der betrachtete Stator weist eine Nutanzahl von 48 und sechs Leitern pro Nut auf.

Im Fall der Großserienanlage ist für den nächsten Schritt in der Simulation ein aussagekräftiges Anlagenlayout mit detaillierten konstruktiven Ausführungen der Fördertechnik, sowie der Anlagenverkettungen für eine vollautomatisierte Produktion essentiell. Erst nach diesem Schritt kann das Modell realitätsnah gestaltet und eine genauere Absicherung der Produktion sichergestellt werden.

Das aufgebaute Modell inklusive Ausgabedaten wie Produktionsmenge und Taktzeit am Ende des Modells der vorliegenden Simulation zur Großserienanlage ist in Abb. 61 dargestellt.

6 Conclusio

Durch die rasante Elektrifizierung des Antriebsstranges von Fahrzeugen erfährt die gesamte Fahrzeug- und Antriebsarchitektur eine markante Disruption. Einerseits durch völlig neue Bauraumverhältnisse im Fahrzeug und andererseits durch die neue Technologie der Antriebsenergie in Form von elektrischer Energie und deren Umwandlung in kinetische Energie. Die elektrische Antriebsachse rückt neben der Batterietechnologie besonders in den Fokus, wobei die Entwicklungen der Elektromaschine durch die Anforderungen der Automobilindustrie getrieben werden. Wie schon bei der Verbrennungskraftmaschine, ist auch im Elektroantrieb neben den Forderungen nach hohen Wirkungsgraden und Leistungsdichten eine effiziente und prozessichere Großserienproduktion die Prämisse. Für die vollautomatisierte Produktion von Statorwicklungen mit bisher eingesetzten biegeschlaffen Runddrähten lassen sich für diese Anforderungen einige Schwächen ableiten, welche durch den Einsatz von rechteckigen, formstabilen Lackdrähten eliminiert werden könnten. Produktseitig wird beispielsweise durch einen höheren Kupferfüllfaktor in der Nut die Leistungsdichte und der Wirkungsgrad erhöht, im Produktionsprozess wird durch neue Fertigungsschritte wie Biege-, Umform- und Fügeprozesse eine höhere Prozessstabilität erreicht.

6.1 Zusammenfassung

Aufgrund des revolutionären Herstellungsprozesses des Stators und insbesondere seiner Wicklung sind zum einen die Wechselwirkungen der einzelnen Prozessschritte in der Herstellung, sowie die Auswirkungen des Produktdesigns auf den Herstellprozess des Stators noch nicht vollumfänglich bekannt. Zum anderen sind die jeweiligen Konzeptvarianten je Prozessschritt in der Herstellung noch nicht festgelegt. Diese Wissenslücken versucht die vorliegende Masterarbeit zu schließen.

Bei der Untersuchung des Entwicklungsprozesses des Hairpin-Stators wird in einem ersten Schritt die Verzahnung von Produkt- und Produktionsanlagenentwicklung herausgearbeitet. Es wird in Form eines Prozessmodells, welches an die Automobilindustrie angelehnt ist, aufgezeigt, dass diese beiden Entwicklungsfelder mit gemeinsamen Meilensteinen zu verknüpfen sind, um ein effizientes Simultaneous-Engineering Team sicherstellen zu können. Speziell in der zweiten Phase des Prozessmodells „Absicherung der Produktauslegung und des Anlagenkonzeptes“ wird dies in der Parallelität der Simulation und Absicherung durch Erprobung in Form von Versuchen verdeutlicht.

In der darauffolgenden Analyse des Montageprozesses kommen zu Beginn in einer Einflussmatrix die Prozessabhängigkeiten zum Vorschein, woraus die kritischen Prozessschritte Kupferdraht abisolieren, Pin biegen, Drahtenden twisten und Drahtenden kontaktieren abgeleitet werden. Dies bedeutet, dass sich diese Prozessschritte hochgradig auf Folgeprozesse oder auf die Funktionsfähigkeit des Stators direkt auswirken. Beim Prozessschritt Kupferdraht abisolieren erscheint unter den betrachteten Konzeptvarianten das Abtragen der Isolierung mittels Laser hinsichtlich der festgelegten Bewertungskriterien am zielführendsten. Im Bereich der Serienproduktion ab 50 000 Stück pro Jahr sind allerdings nur noch Systeme mit hoher Laserleistung (>500 W) einsetzbar, um die geringen Taktzeiten zu erreichen. Nicht zu vernachlässigen ist bei diesen Systemen zusätzlich der energetische Wirkungsgrad von 20 %, wodurch bei hohen Stückzahlen ein sehr hoher Energieverbrauch zustandekommt. Da als Alternative zu den Lasersystemen, welche aufgrund hoher Investitionskosten erst ab hohen Stückzahlen wirtschaftlich betrieben werden können, mechanische Abtragverfahren zur Auswahl stehen, wird in einem Grundlagenversuch die Isolierungsentfernung mittels Fräsen untersucht. Hierbei werden Nachteile wie Flitterbildung des Kunststoffes, Gratbildung des Kupfers sowie Abhängigkeiten der Leitergeometrie und Materialtoleranzen auf die Prozesssicherheit beim Fräsprozess aufgezeigt.

Das Biegen der Hairpins stellt im Hinblick auf eine hohe Reproduzierbarkeit eine Herausforderung für das Biegekonzept dar. Diese Prozessstabilität wird mit dem Gesenkbiegen am besten erreicht, wie aus der Nutzwertanalyse hervorgeht. Es sei aber erwähnt, dass die Patentsituation bei diesem Prozessschritt genau zu beachten ist, da insbesondere das Gesenkbiegen von mehreren Patentträgern bereits patentrechtlich abgesichert ist. In diesem Abschnitt wird plakativ das Patent eines vierteiligen Gesenkes zur Realisierung der 3D-Form des Hairpins der Firma Odawara erwähnt.

Für den Prozessschritt „Drahtenden twisten“ wurde ein Entscheidungsbaum mit den jeweiligen Grenzen des aktiven und passiven Twistwerkzeuges konzipiert. Nach der Festlegung des Produktdesigns ist das Twistverfahren hiermit zu überprüfen, da keine pauschale Aussage über die Verwendbarkeit eines Systems gegeben werden kann. Mit dem verwendeten Twistverfahren ist auch das Konzept für das Aufweiten zum Vereinzeln der Lagen gekoppelt und im Entscheidungsbaum berücksichtigt.

Beim letzten kritischen Prozessschritt, dem Kontaktieren der Drahtenden, wird wieder eine Nutzwertanalyse der betrachteten Konzeptvarianten durchgeführt und die Systeme Laserstrahlschweißen sowie Elektronenstrahlschweißen im Vakuum als die am besten geeignetste

Varianten erachtet. Die Laserstrahltechnologie wird in der Hairpin-Schweißtechnik bereits vielfach eingesetzt und besticht durch Wartungsfreundlichkeit sowie kontrollierter Prozessführung. Die Kostenanalyse des Systems zeigt eine Wirtschaftlichkeit ab 50 000 Statoren pro Jahr des Stückzahlenszenarios der Kleinserienanlage. Wie auch beim Prozess Kupferdraht abisolieren, wird beim Schweißprozess ebenfalls der Energieverbrauch aufgezeigt, welcher durch den niedrigen energetischen Wirkungsgrad des Lasers vor allem bei einer Großserienanlage an Bedeutung gewinnt. In diesem Fall kann ein Laserkopf von 6 kW Laserleistung auf einen jährlichen Energieverbrauch von >200 000 kWh kommen und dadurch enorme Betriebskosten verursachen sowie eine energieschonende Produktion unmöglich machen. Die weiteren Systeme „Elektronenstrahlschweißen im Vakuum“ und „Laserstrahlschweißen im Vakuum“ sind noch in keinster Weise erprobt und nur in Konzeptform von Lieferanten vorhanden.

Im nächsten Schritt dieser Arbeit wird die gesamte Prozesskette zur Statorproduktion in eine Ablaufsimulation der Software Siemens Plant Simulation 16 übergeführt. In den Modellen werden die jeweiligen Taktzeiten je Montageschritt in der vollautomatisierten Produktion aus Taktzeitdiagrammen der Planung entnommen und dienen somit als Richtwert, um die geplanten Ausbringungsmengen der Produktionsanlagen zu erreichen. Ziel dieser Simulationen ist es, bereits in der frühen Entwicklungsphase die Anlagenkonzepte zur Eigenproduktion für die definierten Stückzahlenszenarien hinsichtlich den Zielen Taktzeit und Ausbringungsmenge abzusichern. Hierbei zeigte sich eine signifikante Abhängigkeit der Produktparameter CPS und Nutanzahl auf die Produktionsprozesse. Im Falle der oberen Spezifikationsgrenze des Hairpin-Stators für eine Kleinserienanlage von 8 Leitern pro Nut und 72 Nuten müssen Anlagenteile wie die Anlage „Pin vorbereiten“ dupliziert werden, um der höheren Pinanzahl je Stator Rechnung zu tragen und ähnliche Taktzeiten zu erreichen. Darüber hinaus schaffen die Simulationsmodelle eine Grundlage zur Einschätzung, wie stark sich verringerte Verfügbarkeiten von einzelnen Maschinen auf die Gesamtanlage auswirken.

Zusätzlich erlaubt der parametrische und hierarchisch aufgebaute Modellaufbau in Plant Simulation die rasche Bewertung von Konzepten hinsichtlich produktionstechnischer Fragestellungen von unterschiedlichen Statortypen mit beliebig vielen Pintypen.

6.2 Ausblick

Die aufgebauten Modelle befinden sich aktuell im ersten Entwicklungszyklus der Gesamtanlage zur Serienproduktion von Hairpin-Statoren. Bei einer weiteren Detaillierung der einzelnen Maschinen der jeweiligen Prozessschritte ist das Simulationsmodell ebenfalls zu erweitern, um

mit genaueren Daten wie beispielsweise Energieverbräuche oder einer maßstäblichen Fördertechnik die Genauigkeit der Simulationsergebnisse zu verbessern. Das Ziel sollte sein, dass die Ablaufsimulation den gesamten Entwicklungszyklus des Hairpin-Stators bis zum SOP begleitet. Anhand eines Beispiels aus der Automobilindustrie soll dies an dieser Stelle verdeutlicht werden.

Plant Simulation wird hierbei über den gesamten Produktlebenszyklus eines Fahrzeugmodelles eingesetzt: während des Anlaufs in Form von Engpassanalysen, nach dem SOP bei der Optimierung des Fertigungsflusses, oder zur Absicherung von Stückzahlerhöhungen oder Strukturumbaumaßnahmen.⁵⁸

Aufgrund des hohen Einflusses des Produktdesigns auf die eingesetzten Fertigungstechnologien ist aufbauend auf diese Arbeit im weiteren Entwicklungsprozess einer Serienanlage zur Eigenproduktion von Hairpin-Statoren der Fokus auf die Parallelität von Produkt- und Produktionsanlagenentwicklung zu legen. Des Weiteren geben die beschriebenen Technologien je Prozessschritt in dieser Masterarbeit eine Übersicht über die bisher angedachten Konzepte, sowohl aus Eigenentwicklungen als auch von Mitbewerbern. Nichts desto Trotz soll weiterhin durch aktive Entwicklungstätigkeit nach der optimalen Prozesskette im gesamten Fertigungsprozess geforscht werden, um die prozessichere Großserienproduktion in naher Zukunft sicherstellen zu können.

⁵⁸ Vgl. Mayer/Pöge/Spieckermann/Wenzel (2020), S. 11.

7 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Abstraktion des Elektromotors aus dem Gesamtfahrzeug am Beispiel eines VW ID.3, Quelle: 1) Volkswagen AG (2019a), Onlinequelle: [26.08.2021].; 2) Volkswagen AG (2019b), Onlinequelle: [26.08.2021].	4
Abb. 2: Übersicht der verschiedenen Elektromotor-Typen, Quelle: Hagedorn/Sell-Le Blanc/Fleischer (2016), S. 73.	5
Abb. 3: Leistung über den Wirkungsgrad verschiedener Elektromotoren, Quelle: Hagedorn/Sell-Le Blanc/Fleischer (2016), S. 72.	6
Abb. 4: Hauptschritte zur Herstellung eines Hairpin-Stators, Quelle: Arzillo/Braglia/Nuzzo/Barater/Franceschini/Gerada/Gerada (2020), S. 5.	8
Abb. 5: Vergleich von rechteckigen und runden Leiterquerschnitten in der Statornut, Quelle: Glaessel/Seefried/Kuehl/Franke (2020), S. 1.	9
Abb. 6: Gegenüberstellung von Rund- zu Flachdrahtwicklungen, Quelle: in Anlehnung an Remy International Inc. (2009), Onlinequelle: [25.05.2021].	11
Abb. 7: Allgemeine Begriffe des Hairpin-Stators, Quelle: in Anlehnung an Firmenunterlagen MAS.	12
Abb. 8: Begriffe der Formstabtechnologie anhand einer Statornut, Quelle: Eigene Darstellung.	13
Abb. 9: Zeitschiene bei der Hairpin-Stator Entwicklung in der MAS, Quelle: Eigene Darstellung.	15
Abb. 10: Zuliefererpyramide in der Automobilindustrie, Quelle: Eigene Darstellung	16
Abb. 11: Parallelarbeit zwischen Produkt- und Produktionsanlagenentwicklung eines deutschen OEM, Quelle: Kerber (2016), S. 3.	19
Abb. 12: Modellansätze des Produktentstehungsprozesses in der Automobilindustrie, Quelle: Kerber (2016), S. 22.	20
Abb. 13: Referenzprozessmodell für eine Produktentwicklung aus der Automobilindustrie, Quelle: Kerber (2016), S. 21-25. (leicht modifiziert).	22
Abb. 14: Erste Phase des Prozessmodells zur Hairpin-Stator Entwicklung, Quelle: Eigene Darstellung.	23

Abb. 15: Phase zwei des Prozessmodells zur Hairpin-Stator Entwicklung, Quelle: Eigene Darstellung.....	25
Abb. 16: Phasen drei und vier des Prozessmodells zur Hairpin-Stator Entwicklung, Quelle: Eigene Darstellung.....	27
Abb. 17: Gesamtprozessmodell des Entwicklungsprozesses für den gesamten Elektromotor, Quelle: In Anlehnung an Kerber (2016), S. 160-164.	28
Abb. 18: Grundstruktur einer SIPOC-Analyse, Quelle: Halimah/Smeaton/Shih/Velastin/Terutoshi/Nazlena/Ahmad (2019), S. 193.	31
Abb. 19: Kostenarten der Periodenkosten, Quelle: in Anlehnung an Bauer (2019), S. 2-5.	33
Abb. 20: Flussdiagramm der Hairpin-Stator Montage, Quelle: Eigene Darstellung.....	39
Abb. 21: Einflussmatrix der einzelnen Prozessschritte, Quelle: In Anlehnung an Kampker/Treichel/Kreiskother/Krebs/Kleine Buning (2018), S. 6.	41
Abb. 22: Prozesskette "Pin vorbereiten", Quelle: Eigene Darstellung.....	42
Abb. 23: Qualitätsabweichungen im Querschnitt des Kupferflachdrahtes, Quelle: MAS Firmenunterlagen.....	43
Abb. 24: Querschnittsabmessungen mit Toleranzen laut DIN EN 60317-0-2 für Kupferflachdraht 4,00x2,00mm, Quelle: Felix Wirth/Tarik Kirgor/Janna Hofmann/Jurgen Fleischer (2018), S. 2.....	44
Abb. 25: Prinzipskizze Kupferdraht abrollen, Quelle: Eigene Darstellung.....	44
Abb. 26: Prinzipskizze Kupferdraht richten, Quelle: Eigene Darstellung.....	45
Abb. 27: SIPOC-Analyse Kupferdraht ablängen, Quelle: Eigene Darstellung.....	46
Abb. 28: Schneid- und Stanztechnologien mit Schnittgeometrie, Quelle: Kampker/Treichel/Kreiskother/Krebs/Kleine Buning (2018), S. 5.	47
Abb. 29: SIPOC-Analyse "Kupferdraht abisolieren", Quelle: Eigene Darstellung.....	50
Abb. 30: Ursachen-Wirkungs-Diagramm beim laserbasierten Abisolieren, Quelle: Eigene Darstellung.....	55
Abb. 31: Abisolierkosten pro Stator über verschiedene Stückzahlen, Quelle: Eigene Darstellung.....	58
Abb. 32: Aufbau des Fräsversuches an der Maschine, Quelle: Eigene Darstellung.....	59

Abb. 33: Übersicht über die unterschiedlichen Biegekonzepte, Quelle: Eigene Darstellung....	64
Abb. 34: SIPOC-Analyse “Pin biegen”, Quelle: Eigene Darstellung.	64
Abb. 35: Patent zum Gesenkbiegen von Odawara, Quelle: Odawara (2017), Onlinequelle: [11.06.2021].	65
Abb. 36: Ursachen-Wirkungs-Diagramm beim Pin biegen, Quelle: Eigene Darstellung.....	67
Abb. 37: Prozesskette zum Isolieren der Statornuten, Quelle: Eigene Darstellung.....	68
Abb. 38: Verschränktes Pinpaar nach dem twisten, Quelle: Eigene Darstellung.....	70
Abb. 39: SIPOC-Analyse “Drahtenden Twisten”, Quelle: Eigene Darstellung.	71
Abb. 40: Passives (links) und aktives (rechts) Twistwerkzeug, Quelle: MAS Firmenunterlagen.	71
Abb. 41: Entscheidungsbaum Twistverfahren, Quelle: Eigene Darstellung.....	73
Abb. 42: Prozesskette “Drahtenden kontaktieren”, Quelle: Eigene Darstellung.....	74
Abb. 43: SIPOC-Analyse “Verschweißen der Pin-Enden”, Quelle: Eigene Darstellung.....	76
Abb. 44: Übersicht über mögliche Schweißtechnologien, Quelle: Eigene Darstellung.....	77
Abb. 45: Auswirkungen der Schweißparameter beim Laserschweißen auf den Widerstand der Kontaktstelle, Quelle: Gläsel/Masuch/Weigelt/Kühl/Franke (2020), S. 37.....	79
Abb. 46: Kontaktierungskosten je Stator für unterschiedliche Schweißtechnologien, Quelle: Eigene Darstellung.	81
Abb. 47: Vergleich der Zustandsänderungen einer (a) ereignisgesteuerten Simulation und einer (b) zeitgesteuerten Simulation, Quelle: Gutenschwager/Rabe/Spieckermann/Wenzel (2017), S. 54.	84
Abb. 48: Überblick über unterschiedliche Simulationsmethoden, Quelle: Gutenschwager/Rabe/Spieckermann/Wenzel (2017), S. 53.....	84
Abb. 49: Vorgehensweise bei der Ablaufsimulation der Hairpin-Stator Montage, Quelle: Eigene Darstellung.	86
Abb. 50: Überführung des realen Anlagenlayouts (oben) in ein Simulationsmodell zur Ablaufsimulation (unten), Quelle: Eigene Darstellung.	88
Abb. 51: Anlagenlayout zur automatisierten Stator-Produktion in Kleinserie, Quelle: In	

Anlehnung an Firmenunterlagen der MAS.....	90
Abb. 52: Darstellung des Netzwerkes “Pin vorbereiten“ in Plant Simulation, Quelle: Eigene Darstellung.....	91
Abb. 53: Darstellung des Netzwerkes “Umlagern” in Plant Simulation, Quelle: Eigene Darstellung.....	92
Abb. 54: Darstellung des Netzwerkes “Stecken und Fügen“ in Plant Simulation, Quelle: Eigene Darstellung.....	92
Abb. 55: Darstellung des Netzwerkes “Nutisolation” in Plant Simulation, Quelle: Eigene Darstellung.....	93
Abb. 56: Gesamtmodell Kleinserienanlage in Plant Simulation, Quelle: Eigene Darstellung ...	94
Abb. 57: Diagramm Ausbringungsmenge an Statorn pro Stunde, Quelle: Eigene Darstellung.....	96
Abb. 58: Vergleich unterschiedlicher Verfügbarkeiten auf die Ausbringungsmenge, Quelle: Eigene Darstellung.....	97
Abb. 59: Mehrstufiges Experimentdesign zur Anzahl der Werkstückträger des Stators, Quelle: Eigene Darstellung.....	98
Abb. 60: DoE-Modell der Produktparameter des Hairpin-Stators, Quelle: Eigene Darstellung.....	100
Abb. 61: Simulationsmodell Großserienanlage, Quelle: Eigene Darstellung.....	102

9 Literatur

- Arzillo, A.; Braglia, P.; Nuzzo, S.; Barater, D.; Franceschini, G.; Gerada, D.; Gerada, C. (2020): *Challenges and Future opportunities of Hairpin Technologies*, IEEE, 29th International Symposium, DOI: 10.1109/ISIE45063.2020.9152417.
- Bader, Michael (2020): *Produktentwicklung VU 310.251*, Technische Universität Graz, Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik.
- Bauer, Ulrich (2019): *Betriebswirtschaftslehre UE - Investitionsrechnung*, Technische Universität Graz, Institut für Betriebswirtschaftslehre und Betriebssoziologie.
- Cornet, A.; Hensley, R.; Hirschberg, C.; Schaufuss, P.; Tschiesner, A.; Venus, A.; Werra, J. (2019): *Reboost: A comprehensive view on the changing powertrain component market and how suppliers can succeed*, McKinsey Center for Future Mobility®, <https://www.mckinsey.com/~ /media/McKinsey/Industries/Automotive%20and%20Assembly/Our%20Insights/Reboost%20A%20comprehensive%20view%20on%20the%20changing%20powertrain%20component%20market%20and%20how%20suppliers%20can%20succeed/Reboost-a-comprehensive-view.pdf>, Onlinequelle: [08.06.2021].
- Felix Wirth; Jurgen Fleischer (2019): *Influence of Wire Tolerances on Hairpin Shaping Processes*, IEEE, ISBN: 978-1-7281-4319-4.
- Felix Wirth; Tarik Kirgor; Janna Hofmann; Jurgen Fleischer (2018): *FE-Based Simulation of Hairpin Shaping Processes for Traction Drives*, 2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC).
- Fleischer, J.; Hausmann, L.; Halwas, M.; Hofmann, J.; Wirth, F.; Wößner, W. (2020): *Wissen kompakt: Produktion elektrischer Traktionsmotoren*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), https://www.wbk.kit.edu/downloads/Wissen_kompakt_Elektromotoren_Produktion.pdf, Onlinequelle: [02.07.2021].
- Glaessel, T.; Seefried, J.; Franke, J. (2017): *Challenges in the Manufacturing of Hairpin Windings and Application Opportunities of Infrared Lasers for the Contacting Process*, 2017 7th International Electric Drives Production Conference (IEDPC), Piscataway, NJ.
- Glaessel, Tobias; Seefried, Johannes; Kuehl, Alexander; Franke, Joerg (2020): *Skinning of Insulated Copper Wires within the Production Chain of Hairpin Windings for Electric*

- Traction Drives*, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research Vol. 9, No. 2, February 2020, DOI: 10.18178/ijmerr.9.2.163-169.
- Gläsel, Tobias (2020): *Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobile Traktionsantriebe*, FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 354, FAU University Press, Erlangen, DOI: 10.25593/978-3-96147-357-1.
- Gläsel, Tobias; Masuch, Michael; Weigelt, Michael; Kühl, Alexander; Franke, Jörg (2020): *Schlussbericht zu dem Teilvorhaben "Automatisierte Fertigungstechnologien zum Biegen, Montieren und Schalten von innovativen Formspulenwicklungen" im Verbundprojekt "PRO-E-Traktion"*, Zenodo, DOI: 10.5281/ZENODO.3691996.
- Götze, Uwe (2014): *Investitionsrechnung*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, DOI: 10.1007/978-3-642-54622-8.
- Gutenschwager, Kai; Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2017): *Simulation in Produktion und Logistik*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, DOI: 10.1007/978-3-662-55745-7.
- Hagedorn, Jürgen; Sell-Le Blanc, Florian; Fleischer, Jürgen (2016): *Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, DOI: 10.1007/978-3-662-49210-9.
- Halimah, B. Z.; Smeaton, A. F.; Shih, T. K.; Velastin, S.; Terutoshi, T.; Nazlena, M. A.; Ahmad, M. N. (2019): *Advances in Visual Informatics*, Springer International Publishing, Cham, DOI: 10.1007/978-3-030-34032-2.
- Juergens, J.; Fricasse, A.; Marengo, L.; Gragger, J.; Gennaro, M. de; Ponick, B. (2016): *Innovative design of an air cooled ferrite permanent magnet assisted synchronous reluctance machine for automotive traction application*, IEEE, XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), DOI: 10.1109/ICELMACH.2016.7732618.
- Kampker, A.; Treichel, P.; Kreiskother, K. D.; Krebs, M.; Kleine Buning, M. (2018): *Ex-Ante Process-FMEA for Hairpin Stator Production by Early Prototypical Production Concepts*, Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen.
- Kerber, Sebastian (2016): *Prozessgestaltung zum Einsatz digitaler Fabrikgesamtmodelle*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, DOI: 10.1007/978-3-658-14110-3.

- Kohn, Wolfgang (2005): *Statistik und ihre Anwendungen*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, DOI: 10.1007/b138042.
- Lindemann, Udo (2009): *Methodische Entwicklung technischer Produkte*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, DOI: 10.1007/978-3-642-01423-9.
- Loepke, Stefan (2020): *GPA Vermerk-Vorlage*, https://gpanrw.de/sites/default/files/media/1595238854_kalkulatorischer_zinssatz_2021.pdf, Onlinequelle: [29.07.2021].
- Mattmann, Ilyas (2017): *Modellintegrierte Produkt- und Prozessentwicklung*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, DOI: 10.1007/978-3-658-19409-3.
- Mayer, Dominik; Hausmann, Ludwig; Maul, Nathalie; Reinschmidt, Lino; Hofmann, Janna; Fleischer, Juergen (2019): *Systematic Investigation of the Grooving Process and its Influence on Slot Insulation of Stators with Hairpin Technology*, IEEE, 2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC), DOI: 10.1109/EDPC48408.2019.9011935.
- Mayer, Gottfried; Pöge, Carsten; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2020): *Ablaufsimulation in der Automobilindustrie*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, DOI: 10.1007/978-3-662-59388-2.
- Neugebauer, Christoph; Beranek, Matthias; Bocksrocker, Oliver (2021): *White paper: Manufacturing electric motors - Stripping and welding hairpins using a laser*, TRUMPF GmbH & Co. KG, <https://www.apricon.fi/wp-content/uploads/trumpf-whitepaper-hairpin-welding-e-motors-en.pdf>, Onlinequelle: [14.07.2021].
- Odawara (2017): *Coil segment forming apparatus, coil segment forming method, and rotating electrical machine manufacturing apparatus*, <https://patents.google.com/patent/JP6430599B1/en?q=jp6430599>, Onlinequelle: [11.06.2021].
- Rahman, Khwaja M.; Jurkovic, Sinisa; Stancu, Constantin; Morgante, John; Savagian, Peter J. (2015): *Design and Performance of Electrical Propulsion System of Extended Range Electric Vehicle (EREV) Chevrolet Volt*, IEEE, Transactions on Industry Applications, DOI: 10.1109/TIA.2014.2363015.
- Remy International Inc. (2009): *Inside the HVH™ Hybrid Motor. Technical Insights on Remy's "Off-the-Shelf" Hybrid Motor Solutions*,

- <http://www.vaxosystems.com/store/images/file/pdf/inside-hvh-hybrid-motor.pdf>,
Onlinequelle: [25.05.2021].
- Riedel, A.; Masuch, M.; Weigelt, M.; Gläsel, T.; Kühl, A.; Reinstein, S.; Franke, J. (2018): *Challenges of the hairpin technology for production techniques*, 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS).
- Rudert, S.; Trumpfheller, J. (2015): *Der Produktentstehungsprozess - Grundlage für den Erfolg eines Produktes*, Porsche Engineering Magazin, <https://www.porscheengineering.com%2Ffilestore%2Fdownload%2Fpeg%2Fde%2Fpemagazin-01-2015-artikel-01%2Fdefault%2F8664198c-bdd1-11e5-8bd4-001999cd470%2FDer-Produktentstehungsprozess-Grundlage-f%25C3%25BCr-den-Erfolg-eines-Produktes-Porsche-Engineering-Magazin-01-2015.pdf&usg=AOvVaw398Xb6spQvqIKUwvq7NCpr>, Onlinequelle: [02.05.2021].
- Schömann, Sebastian O. (2012): *Produktentwicklung in der Automobilindustrie* 1. Aufl., Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, DOI: 10.1007/978-3-8349-6673-5.
- Schuh, Günther; Stich, Volker (2012): *Produktionsplanung und -steuerung 1*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, DOI: 10.1007/978-3-642-25423-9.
- Spreng, Simon (2020): *Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißcrimpprozesses*, FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 354, FAU University Press, Erlangen, DOI: 10.25593/978-3-96147-294-9.
- Statista (2020): *Strompreise für Industriekunden in ausgewählten europäischen Ländern nach Verbrauchsmenge im Jahr 2020*, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/151260/umfrage/strompreise-fuer-industriekunden-in-europa/#professional>, Onlinequelle: [06.05.2021].
- Syska, Andreas (2006): *Produktionsmanagement*, Gabler Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, DOI: 10.1007/978-3-8349-9091-4.
- Tobias Glaessel; Johannes Seefried; Michael Masuch; Andreas Riedel; Andreas Mayr; Alexander Kuehl; Joerg Franke (2019): *Process Reliable Laser Welding of Hairpin Windings for Automotive Traction Drives*, IEEE, 2019 International Conference on Engineering Science, and Industrial Applications (ICESI), DOI: 10.1109/ICESI.2019.8863004.
- VDI 3633 Blatt 1 (2014) *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen -*

Grundlagen, Beuth, Berlin.

Volkswagen AG (2019a): *Modularer E-Antriebs Baukasten (MEB)*, <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/modularer-e-antriebs-baukasten-3677>, Onlinequelle: [26.08.2021].

Volkswagen AG (2019b): *The electric drive in the Volkswagen ID.3*, <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/in-brief-more-than-200-horses-in-a-sports-bag-the-electric-drive-in-the-volkswagen-id3-5541>, Onlinequelle: [26.08.2021].

Wirth, F.; Hofmann, J.; Fleischer, J. (2019): *Einfluss geometrischer Materialtoleranzen auf die werkzeuggebundene Formgebung und Eigenschaften von Hairpin-Steckspulen*, Meisenbach GmbH, <https://umformtechnik.net/Whitepaper/Einfluss-geometrischer-Materialtoleranzen-auf-die-werkzeuggebundene-Formgebung-und-Eigenschaften-von-Hairpin-Steckspulen>, Onlinequelle: [16.05.2021].

10 Anhang

(1) Ergebnisse Nutzwertanalyse „Kupferdraht abisolieren“

Paarweiser Vergleich		Kriterium B	Kriterium A							Summe	Gewicht
			1	2	3	4	5	6	7		
Nr.	Kriterium A		1	2	3	4	5	6	7		
1	Keine Rückstände/Sauberkeit		4	4	2	3	3	3		19	22,6%
2	Genauigkeit Länge abisolieren	0		1	1	1	2	1		6	7,1%
3	Keine scharfen Kanten	0	3		2	3	2	3		13	15,5%
4	Hohe Abtragrate möglich	2	3	2		4	3	3		17	20,2%
5	Kein Abtrag Kupfermaterial	1	3	1	0		1	1		7	8,3%
6	Beschädigung der Isolierung Abisolierbereich	1	2	2	1	3		1		10	11,9%
7	Kosten	1	3	1	1	3	3			12	14,3%
										84	100,0%

Gewichte (oben einzufüllen)

4	:0	Kriterium A wesentlich wichtiger als Kriterium B
3	:1	Kriterium A wichtiger als Kriterium B
2	:2	Kriterium A gleich wichtig wie Kriterium B
1	:3	Kriterium A weniger wichtig als Kriterium B
0	:4	Kriterium A wesentlich weniger wichtig als Kriterium B

Bewertungskriterien Draht abisolieren	Gewichtung in % (Summe 100%)	Konzept Laser								
		Scheibenlaser			CO2 + Faserlaser (Zweistufig)			Faserlaser		
		Bewertung (Mittelwert)	Standardabweichung	Teilnutzwert	Bewertung	Standardabweichung	Teilnutzwert	Bewertung	Standardabweichung	Teilnutzwert
Keine Rückstände/Sauberkeit	22,6%	4,14	0,58	93,71	4,64	0,44	105,02	4,14	0,58	93,71
Genauigkeit Länge abisolieren	7,1%	4,14	0,23	29,59	4,36	0,44	31,12	4,14	0,23	29,59
Keine scharfen Kanten	15,5%	4,64	0,44	71,85	4,86	0,35	75,17	4,64	0,44	71,85
Hohe Abtragrate möglich	20,2%	3,50	1,22	70,83	3,07	1,21	62,16	4,00	0,71	80,95
Kein Abtrag Kupfermaterial	8,3%	4,43	0,73	36,90	4,57	0,73	38,10	4,57	0,73	38,10
Beschädigung der Isolierung Abisolierbereich	11,9%	3,57	1,05	42,52	4,00	0,93	47,62	3,50	1,10	41,67
Kosten	14,3%	2,00	0,76	28,57	1,50	0,46	21,43	2,29	0,70	32,65
Gesamtnutzwert				373,98			380,61			388,52

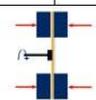
Systemvarianten											
Konzept Räumen			Konzept Fräsen			Konzept Abschälen			Konzept metallische Bürsten		
Bewertung	Standardabweichung	Teilnutzwert	Bewertung	Standardabweichung	Teilnutzwert	Bewertung	Standardabweichung	Teilnutzwert	Bewertung	Standardabweichung	Teilnutzwert
3,86	0,64	87,24	4,00	0,80	90,48	3,43	1,05	77,55	1,50	0,46	33,93
4,07	0,56	29,08	4,21	0,65	30,10	3,43	0,73	24,49	1,21	0,52	8,67
1,86	1,12	28,74	2,43	1,05	37,59	1,86	0,64	28,74	3,21	0,99	49,74
4,00	0,00	80,95	3,86	0,35	78,06	3,57	0,73	72,28	3,21	0,92	65,05
1,21	0,52	10,12	1,79	1,19	14,88	1,79	1,19	14,88	2,50	1,16	20,83
3,64	0,95	43,37	3,86	0,83	45,92	3,50	1,16	41,67	1,21	0,52	14,46
3,36	0,79	47,96	3,93	0,56	56,12	3,50	0,60	50,00	4,57	0,49	65,31
327,47			353,15			309,61			257,99		

(2) Berechnung der Periodenkosten der laserbasierten Absolierkonzepte

Periodenkosten: 48V-Stator 72/2		Formelzeichen	Einheit	Formel	Faserlaser 2x500W	Faserlaser 4x500W	CO2 200W + Faserlaser 100W	CO2 400W + Faserlaser 200W
Kapitalkosten	Anfangsinvestition	I_A	€		€ 308 400,00	€ 495 300,00	€ 141 647,00	€ 175 500,00
	Kosten Laser Kosten Laserequipment Kosten Absaugung		€		€ 153 400,00	€ 301 200,00	€ 131 647,00	€ 165 500,00
	Folgeinvestition (Reparatur, etc)	I_F	€		€ 150 000,00	€ 189 100,00	€ 10 000,00	€ 10 000,00
	Nutzungsdauer	ND	Jahre		6	6	6	6
	kalk. Zinssatz	i_{kalk}	%	$i_{kalk} = \frac{I_A + I_F}{ND}$	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%
Kalkulatorische Abschreibung	Kalkulatorische Abschreibung	I_{Ab}	€		€ 51 400,00	€ 82 550,00	€ 23 607,83	€ 29 250,00
	Kalkulatorische Zinsen	I_Z	€	$Z_{kalk} = \left(\frac{I_A + I_F}{2}\right) \times i_{kalk}$	€ 7 710,00	€ 12 382,50	€ 3 541,18	€ 4 387,50
Summe Kapitalkosten				K_{Kap}	€ 59 110,00	€ 94 932,50	€ 27 149,01	€ 33 637,50
Betriebskosten	Energieverbrauch	E_{Ab}	kWh	$E_{Ab} = P_{Nenn} \times t_{Nenn} + P_{St} \times t_{St}$	62 935,07	79 514,30	67 565,15	80 957,15
	Energiekosten	k_E	€/kWh		€ 0,10	€ 0,10	€ 0,10	€ 0,10
	Laserleistung gesamt bei Nennleistung	P_{Nenn}	kW		11,93	16,73	11,63	16,13
	Laserleistung gesamt bei Stand-By	P_{St}	kW		9,13	11,63	9,13	11,13
	Laufzeit des Lasers bei Nennleistung	t_{Nenn}	h/Jahr	$t_{Nenn} = (t_{pVorth} \times \#_p) \times 1,5$	643,07	321,53	2 572,27	1 286,13
	Laufzeit des Lasers bei Stand-By	t_{St}	h/Jahr	$t_{St} = t_{max} - t_{Nenn}$	6 052,93	6 374,47	4 123,73	5 409,87
	Statoren pro Jahr	$\#_S$	Statoren/Jahr		25 000	25 000	25 000	25 000
	Anzahl Pins pro Stator	$\#_{Ps}$	Pins/Stator		128	128	128	128
	Anzahl Pins pro Jahr	$\#_P$	Pins/Jahr	$\#_P = \#_{Ps} \times \#_S$	1 950 000	1 950 000	1 950 000	1 950 000
	Erforderliche Taktzeit je Pin	t_{Perf}	[s]	$t_{Perf} = \frac{t_{max} \times OEE}{N \times \frac{CPS}{2}}$	9,27	9,27	9,27	9,27
Absolierfläche	Absolierfläche	A_{Ab}	[mm ²]		237,44	237,44	237,44	237,44
	Abtragrate Faser	x_{AbF}	[mm ² /s]		150	150	120	240
	Abtragrate CO ₂	x_{AbCO2}	[mm ² /s]		150	150	200,00	400,00
	Vorhandene Taktzeit pro Pin	t_{pVorth}	[s]	$t_{pVorth} = \frac{A_{Ab}}{x_{AbCO2}} + \frac{A_{Ab}}{x_{AbF}}$	0,79	0,40	3,17	1,58
Anzahl Maschinen	Anzahl Maschinen	Z_M		1	1	1	1	
	Kosten Betriebsstoffe	I_B	€	$I_B = E_P \times k_E$	€ 6 293,51	€ 7 951,43	€ 6 756,51	€ 8 095,71
Instandhaltungskosten	Instandhaltungskosten	I_{In}	€		€ 500,00	€ 500,00	€ 500,00	€ 500,00
	Summe Betriebskosten	K_B	€		€ 6 793,51	€ 8 451,43	€ 7 256,51	€ 8 595,71
Summe Periodenkosten	K_P	€	$K_P = K_{Kap} + K_B$	€ 65 903,51	€ 103 383,93	€ 34 405,52	€ 42 233,21	
Anteil Betriebskosten an Periodenkosten				10,31%	8,17%	21,09%	20,35%	
Leistungskosten	Kosten pro Pin	K_{Pin}	€/Pin	$K_{Pin} = K_P / \#_P$	€ 0,054	€ 0,053	€ 0,018	€ 0,022
	Kosten pro Stator	K_{Stator}	€/Stator	$K_{Stator} = K_P / \#_S$	€ 2,656	€ 4,135	€ 1,376	€ 1,689

(3) Ergebnisse des Fräsversuches zum Abisolieren von lackisoliertem Kupferdraht

Grundlagenversuch: Entfernung der Isolierung eines rechteckigen Kupferlackdrahtes														
		Datum: 08.07.2021 Ort: IFT, TU Graz Teilnehmer: Aigner, Szakaly Abisolierlänge 10/6/16mm												
Allgemeine Erkenntnisse: Fräsen vom Kunststoff sind bei jedem Versuchsdruck vorhanden, Bearbeitungsfläche ist bei HSS besser (da schärfer geschliffen, aber auch weniger verschleißfest als HM (HM nicht so scharf, da er sonst leichter bricht), Grat (Kupfer) bei jedem Pin vorhanden, ein Fräsdurchgang mit der gewünschten Breite (=Fräserdurchmesser) am sinnvollsten >> gleichmäßiger Schnittdruck am Werkstück, Highspeed-Fräsen bringt kaum Verbesserungen im Hinblick auf die Spanbildung des Kunststoffes														
Einspannung	Versuch-Nr.:	Draht	Geometrie BxHxR [mm]	Isoliermaterial	Isolierdicke [µm]	Drehzahl [1/min]	Schnittgeschwindigkeit [m/min]	Vorschub [mm/U]	Werkzeug	Abmaße vor dem Fräsen	Abmaße nach dem Fräsen	Fräsvariante	Zustellmaß [mm]	Anmerkungen
	1	A	2x5x0,6	PAI	<100	16000	300	1600	HM ø6mm	2,18x5,14	2,04x3,65	Schmale Fläche abfräsen	0,75	Radius wurde mit abgefräst
	2	A	2x5x0,6	PAI	<100	16000	300	1600	HM ø6mm	2,18x5,14	1,93x3,9	Breite Fläche abfräsen	0,08	Isolation nicht vollständig abgefräst--> Drahttoleranzen! Nochmaliger Fräsdurchgang +0,07mm Zustellung, kein positives Ergebnis
	3	A	2x5x0,6	PAI	<100	24000	300	2400	HM ø6mm	2,18x5,14	1,95x3,88	Schmale Fläche abfräsen	0,75	Radius wurde mit abgefräst
	4	A	2x5x0,6	PAI	<100	3000	60	300	HSS ø6mm	2,18x5,14	1,84x3,63	Breite Fläche abfräsen	0,15	Ergebnis ok, Drahtschwingungen auf der Bearbeitungsfläche erkennbar
	5	A	2x5x0,6	PAI	<100	4500	60	450	HSS ø6mm	2,18x5,14	1,9x3,6	Schmale Fläche abfräsen	0,75	Keine Verbesserung durch Drehzahlerhöhung, gleiches Ergebnis wie Versuch 2
	6	B	3,5x2,3x0,3	PEEK+PAI	>130	16000	300	1600	HM ø6mm	3,88x2,67	3,57x1,79	Breite Fläche abfräsen	0,16	Beim Austritt des Fräasers aus dem Pin: Span hat sich gefangen, ganzer Pin wurde gedrückt (Foto), eventuell wegen fehlendem Schnittdruck beim zweiten Durchgang Draht war verbogen --> dadurch keine Maßhaltigkeit mehr beim zweiten Fräsgang --> Isolierung blieb zurück
													0,5	Nur ein Fräsgang mit 6mm Breite, Schöne Bearbeitungsfläche durch HSS-Werkzeug
													0,16	Nur ein Fräsgang, kein Verziehen des Drahtes! (gleichmäßiger Schnittdruck)
														Beschädigung der restlichen Isolierung (aufblähen)



Grundlagenversuch: Entfernung der Isolierung eines rechteckigen Kupferlackdrahtes														
		Allgemeine Erkenntnisse: Fräsen vom Kunststoff sind bei jedem Versuchsdurchgang vorhanden, Bearbeitungsfäche ist bei HSS besser (da scharfer geschliffen, aber auch weniger verschleißfest als HM (HM nicht so scharf, da er sonst leichter bricht), Grat (Kupfer) bei jedem Pin vorhanden, ein Fräsdurchgang mit der gewünschten Breite (=Fräserdurchmesser) am sinnvollsten >> gleichmäßiger Schmittdruck am Werkstück, Highspeed-Fräsen bringt kaum Verbesserungen im Hinblick auf die Spanbildung des Kunststoffes												
Datum: 08.07.2021 Ort: IFT, TU Graz Teilnehmer: Aigner, Szakaly Absolutlänge 10/6/16mm														
Einspannung	Versuch-Nr.:	Geometrie BxHxR [mm]	Isoliermaterial	Isolierdicke [µm]	Drehzahl [1/min]	Schnittgeschwindigkeit [m/min]	Vorschub [mm/U]	Werkzeug	Abmaße vor dem Fräsen	Abmaße nach dem Fräsen	Fräsvariante	Zustellmaß [mm]	Anmerkungen	
	7	3,5x2,3x0,3	PEEK+PAI	>130	6000	300	600	HM ø16mm	3,86x2,67	3,49x1,78	Breite Fläche abfräsen	0,16	Beschädigung der restlichen Isolierung (aufblähen), Schwingen des Drahtes, Kunststoffspäne bleiben hängen an der Fräskante	
	8	3,6x1,5x0,5	PEEK	>100	6000	300	600	HM ø16mm	3,92x1,83	-	Breite Fläche abfräsen Schmale Fläche abfräsen	0,14	Starke Riefen durch Drahtschwingung!	
	9	3,6x1,5x0,5	PEEK	>100	6000	300	600	HM ø16mm	3,92x1,83	-	Breite Fläche abfräsen Schmale Fläche abfräsen	0,7	Abbruch Draht wurde durch Schmittdruck verbogen!	
	10	2,5x2x0,4	PEEK	>130	6000	300	600	HM ø16mm	2,77x2,09	2,17x1,76	Breite Fläche abfräsen Schmale Fläche abfräsen	0,57	Abbruch Trotz verminderter Zustellung im Vergleich zu Versuch 8 -> Draht wurde durch Schmittdruck verbogen!	
	11	2x5x0,6	PAI	<100	30000	565	3000	HM ø6mm	2,18x5,14	2,02x4,00	Breite Fläche abfräsen Schmale Fläche abfräsen	0,16	Draht war vom Fräsgang der ersten Seite ein wenig verformt, nicht gleichmäßiges Abtragen (Eigentlich 0,16	
	12	2x5x0,6	PAI	<100	30000	565	3000	HM ø6mm	2,77x2,09	1,96x4,02	Breite Fläche abfräsen Schmale Fläche abfräsen	0,4	Kein Verbiegen des Drahtes, aber Kunststoffspäne bleiben fest anhaftend an restlicher Isolierung	
	13	2x5x0,6	PAI	<100	16000	300	1600	HM ø6mm	2,77x2,09	1,96x4,02	Breite Fläche abfräsen Schmale Fläche abfräsen	0,08	Zustellung (0,09 insgesamt), bei zweiter Seite +0,03 (0,11 insgesamt)	
													0,6	Highspeed-Fräsen: Ein Fräsweg (Breite 6mm)
													0,15	Highspeed-Fräsen: Zwei Fräswege (10mm), bessere Schnittfläche
													0,6	Zwei Fräswege, Draht ok, aber schlechte unebene Schnittfläche (Schwingungen!) und Kunststoff-Fräsen
													0,6	Zwei Fräswege, Draht wurde durch Schmittdruck verbogen!

(4) Ergebnisse Nutzwertanalyse „Pin biegen“

Paarweiser Vergleich		Kriterium B							Summe	Gewicht
		Abplattung/Materialaufschub im Biegeradius	Isolationsschichtdicke nicht beschädigt	Formtoleranzen der Schenkel (Öffnungsweite, Parallelität)	Gesamtlänge nach dem Biegen	Flexibilität vür verschiedene Geometrien	Eignung für hohe Stückzahlen/Robustheit	Investitionskosten		
Nr.	Kriterium A	1	2	3	4	5	6	7		
1	Abplattung/Materialaufschub im Biegeradius		2	1	1	4	3	3	14	16,7%
2	Isolationsschichtdicke nicht beschädigt	2		2	2	4	2	3	15	17,9%
3	Formtoleranzen der Schenkel (Öffnungsweite, Parallelität)	3	2		2	4	3	4	18	21,4%
4	Gesamtlänge nach dem Biegen	3	2	2		3	3	2	15	17,9%
5	Flexibilität vür verschiedene Geometrien	0	0	0	1		1	1	3	3,6%
6	Eignung für hohe Stückzahlen/Robustheit	1	2	1	1	3		2	10	11,9%
7	Investitionskosten	1	1	0	2	3	2		9	10,7%
									84	100,0%

Gewichte (oben einzufüllen)

4	:0	Kriterium A wesentlich wichtiger als Kriterium B
3	:1	Kriterium A wichtiger als Kriterium B
2	:2	Kriterium A gleich wichtig wie Kriterium B
1	:3	Kriterium A weniger wichtig als Kriterium B
0	:4	Kriterium A wesentlich weniger wichtig als Kriterium B

Nutzwertanalyse:

Bewertungskriterien Draht biegen	Gewichtung in % (Summe 100%)	Miba 2 - Rollenbiegen, Roboter			Miba 3 - Rollenbiegen, Gesenk		
		Bewertung	Standardabw.	Teilnutzwert	Bewertung	Standardabw.	Teilnutzwert
		Abplattung/Materialaufschub im Biegeradius	16,7%	2,6	1,02	43,33	2,8
Isolationsschichtdicke nicht beschädigt	17,9%	2,7	0,75	48,21	3	0,63	53,57
Formtoleranzen der Schenkel (Öffnungsweite, Parallelität)	21,4%	2,8	0,40	60,00	3,3	0,40	70,71
Gesamtlänge nach dem Biegen	17,9%	2,8	0,40	50,00	2,8	0,40	50,00
Flexibilität vür verschiedene Geometrien	3,6%	3,2	0,98	11,43	2,4	0,49	8,57
Eignung für hohe Stückzahlen/Robustheit	11,9%	2,4	1,02	28,57	3,6	0,49	42,86
Investitionskosten	10,7%	1,8	0,75	19,29	3,2	0,40	34,29
Gesamtnutzwert				260,83			306,67

Systemvarianten								
Miba 4 - Schwenkbiegen, Gesenk			Konzept Freiformbiegen			Konzept Gesenke 2D+3D		
Bewertung	Standardabw.	Teilnutzwert	Bewertung	Standardabw.	Teilnutzwert	Bewertung	Standardabw.	Teilnutzwert
3,4	1,50	56,67	3,2	0,75	53,33	3,6	0,49	60,00
3,7	1,08	66,07	3,2	0,98	57,14	3,6	0,49	64,29
3,6	0,49	77,14	1,8	0,40	38,57	3,7	0,60	79,29
3,2	0,40	57,14	2,3	0,40	41,07	3,4	0,49	60,71
2,3	0,75	8,21	4,6	0,49	16,43	1,7	0,60	6,07
3,9	0,49	46,43	2,3	0,98	27,38	4,2	0,75	50,00
3,3	0,75	35,36	2	1,55	21,43	3,1	0,92	33,21
		347,02			255,36			353,57

Standardabweichung und Mittelwerte der Bewertungen:

	Systemvarianten									
	Miba 2 - Rollenbiegen, Roboter		Miba 3 - Rollenbiegen, Gesenk		Miba 4 - Schwenkbiegen, Gesenk		Konzept Freiformbiegen		Konzept Gesenke 2D+3D	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
Abplattung/Materialaufschub im Biegeradius	2,60	1,02	2,80	0,98	3,40	1,50	3,20	0,75	3,60	0,49
Isolationsschichtdicke nicht beschädigt	2,70	0,75	3,00	0,63	3,70	1,08	3,20	0,98	3,60	0,49
Formtoleranzen der Schenkel (Öffnungsweite, Parallelität)	2,80	0,40	3,30	0,40	3,60	0,49	1,80	0,40	3,70	0,60
Gesamtlänge nach dem Biegen	2,80	0,40	2,80	0,40	3,20	0,40	2,30	0,40	3,40	0,49
Flexibilität für verschiedene Geometrien	3,20	0,98	2,40	0,49	2,30	0,75	4,60	0,49	1,70	0,60
Eignung für hohe Stückzahlen/Robustheit	2,40	1,02	3,60	0,49	3,90	0,49	2,30	0,98	4,20	0,75
Investitionskosten	1,80	0,75	3,20	0,40	3,30	0,75	2,00	1,55	3,10	0,92
Durchschnittliche Konzeptbewertung	2,61		3,01		3,34		2,77		3,33	

(5) Ergebnisse Nutzwertanalyse „Verschweißen der Pin-Enden“

Paarweiser Vergleich		Kriterium B	Kriterium A									Summe	Gewicht	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9			
Nr.			1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	Poren in der Schweißnaht			2	2	3	3	4	3	3	2	22	15,3%	
2	Schweißspritzer				2	3	3	4	3	3	2	22	15,3%	
3	Tiefschweißen möglich			2		1	3	4	1	2	1	16	11,1%	
4	Wärmeeintrag in die Schweißstelle			1	1	3		3	3	2	3	18	12,5%	
5	Platzbedarf des Schweißkopfes			1	1	1	1		3	1	1	10	6,9%	
6	Verschleiß/Wartung u. Instandhaltung			0	0	0	1	1		1	2	6	4,2%	
7	Prozesszeit Schweißen			1	1	3	2	3	3		3	18	12,5%	
8	Beschädigung der Isolierung Abisolierbereich			1	1	2	2	3	3	2		3	17	11,8%
9	Investitionskosten			2	2	3	1	3	2	1	1	15	10,4%	
												144	100,0%	

Gewichte (oben einzufüllen)

4	:0	Kriterium A wesentlich wichtiger als Kriterium B
3	:1	Kriterium A wichtiger als Kriterium B
2	:2	Kriterium A gleich wichtig wie Kriterium B
1	:3	Kriterium A weniger wichtig als Kriterium B
0	:4	Kriterium A wesentlich weniger wichtig als Kriterium B

Nutzwertanalyse:

Bewertungskriterien Pinenden Schweißen	Gewichtung in % (Summe 100%)	Elektronenstrahlschweißen (Fa. ProBeam)			Laserstrahlschweißen im Vakuum (Fa. Lava-X)		
		Bewertung (Mittelwert)	Standardabweichung	Teilnutzwert	Bewertung (Mittelwert)	Standardabweichung	Teilnutzwert
		Poren in der Schweißnaht	15,3%	4,79	0,36	73,12	4,33
Schweißspritzer	15,3%	4,64	0,69	70,93	4,33	0,37	66,20
Tiefschweißen möglich	11,1%	4,07	1,15	45,24	4,21	0,84	46,83
Wärmeeintrag in die Schweißstelle	12,5%	4,00	0,53	50,00	3,75	0,38	46,88
Platzbedarf des Schweißkopfes	6,9%	2,79	0,52	19,35	3,75	0,38	26,04
Verschleiß/Wartung u. Instandhaltung	4,2%	2,50	0,46	10,42	3,08	0,73	12,85
Prozesszeit Schweißen	12,5%	3,79	1,06	47,32	3,83	0,47	47,92
Beschädigung der Isolierung Abisolierbereich	11,8%	4,36	0,79	51,44	3,92	0,84	46,24
Investitionskosten	10,4%	1,29	0,65	13,39	2,92	0,84	30,38
Gesamtnutzwert				316,37			312,91

Systemvarianten											
Laserschweißen (Fa. Trumpf)			WIG-Schweißen (Fa. Fronius)			Ultraschallschweißen			Plasmaschweißen (Fa. Inocon)		
Bewertung (Mittelwert)	Standardabweichung	Teilnutzwert	Bewertung (Mittelwert)	Standardabweichung	Teilnutzwert	Bewertung (Mittelwert)	Standardabweichung	Teilnutzwert	Bewertung (Mittelwert)	Standardabweichung	Teilnutzwert
3,29	0,45	50,20	2,79	0,99	42,56	4,42	0,73	67,48	2,71	0,88	41,47
2,93	0,42	44,74	3,71	1,16	56,75	4,67	0,47	71,30	3,79	0,92	57,84
4,00	0,58	44,44	2,07	0,68	23,02	2,83	1,21	31,48	2,14	0,64	23,81
3,14	0,64	39,29	1,50	0,80	18,75	2,92	0,73	36,46	2,86	0,79	35,71
3,93	0,17	27,28	2,86	1,55	19,84	1,25	0,56	8,68	2,29	0,70	15,87
4,14	0,83	17,26	2,50	0,89	10,42	3,17	0,90	13,19	2,36	0,58	9,82
3,93	0,42	49,11	1,64	0,69	20,54	3,33	1,11	41,67	2,64	0,79	33,04
3,71	0,88	43,85	1,57	0,49	18,55	3,83	1,21	45,25	2,43	0,90	28,6706349
3,36	0,58	34,97	4,14	1,12	43,15	3,08	0,84	32,12	4,50	0,60	46,875
272,32			191,87			270,25			217,56		

Standardabweichung und Mittelwerte der Bewertungen:

	Elektronenstrahlschweißen (Fa. ProBeam)		Laserstrahlschweißen im Vakuum (Fa. Lava-X)		Laserschweißen (Fa. Trumpf)	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
Poren in der Schweißnaht	4,79	0,36	4,33	0,37	3,29	0,45
Schweißspritzer	4,64	0,69	4,33	0,37	2,93	0,42
Tiefschweißen möglich	4,07	1,15	4,21	0,84	4,00	0,58
Wärmeeintrag in die Schweißstelle	4,00	0,53	3,75	0,38	3,14	0,64
Platzbedarf des Schweißkopfes	2,79	0,52	3,75	0,38	3,93	0,17
Verschleiß/Wartung u. Instandhaltung	2,50	0,46	3,08	0,73	4,14	0,83
Prozesszeit Schweißen	3,79	1,06	3,83	0,47	3,93	0,42
Beschädigung der Isolierung Abisolierbereich	4,36	0,79	3,92	0,84	3,71	0,88
Investitionskosten	1,29	0,65	2,92	0,84	3,36	0,58
Durchschnittliche Konzeptbewertung	3,58		3,79		3,60	

WIG-Schweißen (Fa. Fronius)		Ultraschallschweißen		Plasmaschweißen (Fa. Inocon)	
\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
2,79	0,99	4,42	0,73	2,71	0,88
3,71	1,16	4,67	0,47	3,79	0,92
2,07	0,68	2,83	1,21	2,14	0,64
1,50	0,80	2,92	0,73	2,86	0,79
2,86	1,55	1,25	0,56	2,29	0,70
2,50	0,89	3,17	0,90	2,36	0,58
1,64	0,69	3,33	1,11	2,64	0,79
1,57	0,49	3,83	1,21	2,43	0,90
4,14	1,12	3,08	0,84	4,50	0,60
2,53		3,28		2,86	

(6) Berechnung der Periodenkosten der Konzepte zum Verschweißen der Pin-Enden

Periodenkosten Schweißen: 48V-Stator 25000 Stück/Jahr		Formelzeichen	Einheit	Formel	Elektronenstrahlschweißen im Vakuum	Laserstrahlschweißen im Vakuum	Laserstrahlschweißen
Kapitalkosten	Anfangsinvestition	I_A	[€]		€ 1 600 000,00	€ 430 000,00	€ 468 280,00
	Kosten Schweißzelle		[€]		€ 1 600 000,00	€ 225 000,00	€ 468 280,00
	Kosten Equipment		[€]			€ 200 000,00	
	Kosten Absaugung		[€]			€ 5 000,00	
	Folgeinvestition (Reparatur, etc)	I_F	[€]		€ 3 000,00	€ 3 000,00	€ 3 000,00
	Nutzungsdauer	ND	[Jahre]		6	6	6
	kalk. Zinssatz	$i_{\text{ kalk}}$	[%]		5,00%	5,00%	5,00%
Kalkulatorische Abschreibung		$I_{\text{ Ab}}$	[€]		€ 267 166,67	€ 72 166,67	€ 78 546,67
	Kalkulatorische Zinsen	I_Z	[€]		€ 40 000,00	€ 10 750,00	€ 11 707,00
Summe Kapitalkosten		$K_{\text{ kap}}$			€ 307 166,67	€ 82 916,67	€ 90 253,67
Betriebskosten	Energieverbrauch	E_S	[kWh]		144 045,00	142 170,00	125 150,85
	Laufzeit des Lasers bei Nennleistung	t_S	[h]		337,50	412,50	412,50
	Laufzeit des Lasers Stand-By	$t_{\text{ St}}$	[h]		6 358,50	6 283,50	6 283,50
	Nennleistung der Schweißzelle	P_S	[kW]		50,00	40,00	35,30
	Stand-By-Leistung des Lasers	$P_{\text{ St}}$	[kW]		20,00	20,00	17,60
	Energiekosten	k_E	[€/kWh]		€ 0,10	€ 0,10	€ 0,10
	Statoren pro Jahr	$\#_S$	[Statoren/Jahr]		25 000	25 000	25 000
	Anzahl Schweißpunkte pro Stator	$\#_{\text{ PS}}$	[Punkte/Stator]		72	72	72
	Anzahl Schweißpunkte pro Jahr	$\#_{\text{ PJ}}$	[Punkte/Jahr]		1 800 000	1 800 000	1 800 000
	Erforderliche Taktzeit je Schweißpunkt	$t_{\text{ Ser}}$	[s]		$t_{\text{ max}} \times \frac{OEE}{X_S} \times \frac{3600}{100}$	10,04	10,04
	Evakuierzeit (bei Schleusensystem = 0)	$t_{\text{ Ev}}$	[s]		0	0	0
	Schweißzeit	t_S	[s]		0,1	0,2	0,2
	Erkennungszeit für die Software	$t_{\text{ Er}}$	[s]		0,35	0,35	0,35
Vorhandene Taktzeit je Schweißpunkt	$t_{\text{ vorh}}$	[s]		0,45	0,55	0,55	
Anzahl Maschinen	z_M			1	1	1	
Kosten Betriebsstoffe	I_B	[€]		€ 14 404,50	€ 14 217,00	€ 12 515,09	
Summe Betriebskosten		K_B			€ 14 404,50	€ 14 217,00	€ 12 515,09
Summe Periodenkosten		K_P	€		€ 321 571,17	€ 97 133,67	€ 102 768,75
Leistungskosten		$K_{\text{ SP}}$	€/Schweißpunkt		€ 0,179	€ 0,054	€ 0,057
		$K_{\text{ Stator}}$	€/Stator		€ 12,863	€ 3,885	€ 4,111

(7) Anlagentaktzeiten und Simulationsergebnisse der Kleinserienanlage für unterschiedliche Produktparameter

Nr.	Prozessschritt	Anlagenname	CPS=4, N=36		CPS=6, N=48		CPS=8, N=54		CPS=8, N=72	
			Anzahl an Maschinen in Gesamtanlage	Taktzeit je Prozessschritt [s]	Anzahl an Maschinen in Gesamtanlage	Taktzeit je Prozessschritt [s]	Anzahl an Maschinen in Gesamtanlage	Taktzeit je Prozessschritt [s]	Anzahl an Maschinen in Gesamtanlage	Taktzeit je Prozessschritt [s]
1.3	Kupferdraht abblängen	Pin vorbereiten	1	1,5	1	1,5	1	1,5	2	1,5
1.4	Kupferdraht absollieren		1	1	1	1	1	1	1	1
2.1	Pin biegen 2D	Pin biegen	3	3,7	3	3,7	4	3,7	5	2,7
2.2	Pin biegen 3D		3	3,3	3	3,3	4	3,3	5	2,3
3	Nutisolation	Nutfisolation	1	4,5	1	4,5	1	4,5	1	4,5
	Stecken Sonderpins Innen		1	2	1	2	1	2	1	2
	Stecken Standardpins Lage 2+3	Stecken und Fügen	1	1	1	1	1	1	1	1
4.1	Stecken Standardpins Lage 4+5		1	1	1	1	1	1	1	1
	Stecken Standardpins Lage 6+7	Stecken Standardpins außen	1	2	1	2	1	2	1	2
	Stecken Sonderpins außen		1	2	1	2	1	2	1	2
4.2	Haarpinkorb in Blechpaket fügen	Stecken und Fügen	1	240	1	240	1	240	1	240
5.1	Drahtenden aufweiten	Aufweiten	1	218,4	1	290	1	337	1	416,8
5.2	Drahtenden twisten	Twisten	1	180	1	270	1	340	1	340
6	Drahtenden reinigen	Reinigung	1	15	1	15	1	15	1	15
7.2	Verschweißen der Pinenden	Kontaktieren	1	128	1	236	1	344	1	452
7.3	Verschaltetelemente	Kontaktieren	1	140	1	200	1	280	1	280
10	Stator EOL-testing	EOL-Test	1	240	1	310	1	310	1	310
Anzahl der Pins je Stator			72	144	144	216	216	288	288	288
Anlagentaktzeit			4:11min	6:42min	6:42min	8:34min	8:34min	7:52min	7:52min	7:52min
Statoren pro Tag			337	209	209	163	163	178	178	178
Statoren pro Jahr (288 Arbeitstage, 3-Schichtig)			97.344	60.192	60.192	46.944	46.944	51.264	51.264	51.264