

Abschlussbericht zur Transferphase
**AgiloDrive – Entwicklung und Implementierung eines agilen
Produktionssystems für die technologie- und stückzahlflexible
E-Motoren-Produktion**



Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Anschrift: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
wbk Institut für Produktionstechnik
Kaiserstr. 12
76131 Karlsruhe
Tel: 0721 608 44009
E-Mail: juergen.fleischer@kit.edu



Beteiligte Institute des KIT: Elektrotechnisches Institut (ETI)



Institut für Produktentwicklung (IPEK)



Assoziierte Projektpartner: Schaeffler Automotive Buehl GmbH & Co. KG



Gehring Technologies GmbH + Co. KG



e-mobil BW GmbH



Aktenzeichen: 3-4332.62-KIT/15
Förderzeitraum: 01.05.2021 – 31.10.2021
Berichtszeitraum: 01.05.2021 – 31.10.2021

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer, Felix Fraider, Maximilian Halwas, Ludwig Hausmann, Felix Wirth und Wilken Wößner am wbk Institut für Produktionstechnik des KIT

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers, Sascha Ott, Adrian Braumandl, Marc Etri, Christoph Kempf, Maximilian Kübler und Yunying Zeng am Institut für Produktentwicklung des KIT

Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer, Michael Schmitt und Patrick Breining
am Elektrotechnischen Institut des KIT

Inhalt

1	Kurzfassung	3
2	Zielsetzungen	3
3	Arbeitsergebnisse	4
3.1	AP 1: Produktbaukastenentwicklung	4
3.1.1	Arbeitsinhalte des IPEK	4
3.1.2	Arbeitsinhalte des ETI	5
3.2	AP 2: Produktionsbaukastenentwicklung	11
3.2.1	Skalierungs- und Verkettungsanalysen unter Einbeziehung der Systemkomplexität	11
3.2.2	Technologisches Produkt-Prozess-Modell für die agile E-Motoren-Produktion	13
3.2.3	Konzeption eines modularen Werkstückträgersystems	14
4	Relevante F + E Ergebnisse von dritter Seite	18
5	Projektbezogene Veröffentlichungen	20
5.1	Veröffentlichungen im Jahr 2021	20
5.2	Geplante Veröffentlichungen im Jahr 2022	20

1 Kurzfassung

Vor dem Hintergrund der weltweiten Anstrengungen gegen den Klimawandel ist in der nächsten Dekade von einem stetig steigenden Absatz elektrifizierter Mobilitätslösungen auszugehen, woraus eine tiefgreifende Transformation der automobilen Wertschöpfungsketten resultiert. Der elektrische Traktionsmotor nimmt dabei eine leistungs- und effizienzbestimmende Rolle im elektrifizierten Antriebsstrang ein und muss bei geringen Kosten in höchster Qualität und Leistungsdichte produziert werden. Volatile Märkte sowie wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen führen jedoch zu einer hohen Unsicherheit hinsichtlich der zu erwartenden Stückzahlen und eingesetzten Technologien, weshalb das Investitionsrisiko in dem Stand der Technik entsprechende, hochproduktive aber starre Produktionssysteme als hoch einzustufen ist.

Ziel des Forschungsvorhabens AgiloDrive ist es daher, entwicklungs- und produktionsspezifische Methoden sowie neuartige Prozesse für die Entwicklung und Produktion elektrischer Traktionsmotoren als Basis für ein wandlungsfähiges und skalierbares Produktionssystem zu erarbeiten, zu implementieren und zu validieren.

Im Rahmen der durch das baden-württembergische Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus mit knapp 1 Mio. Euro geförderten Pilotphase des Vorhabens AgiloDrive – „Entwicklung und Implementierung eines agilen Produktionssystems für die technologie- und stückzahlflexible E-Motoren-Produktion“ wurden vom 01.05.2020 bis zum 31.10.2021 durch die drei am Vorhaben beteiligten Institute des KIT gemeinsam mit den assoziierten industriellen Partnern Lösungsansätze und Strategien zur Entwicklung eines zukunftsrobusten Produktbaukastens und flexiblen Produktionsbaukastens im Kontext elektrischer Traktionsmotoren entwickelt sowie deren grundsätzliche Funktionstüchtigkeit für den weiteren Projektverlauf nachgewiesen.

Die im Rahmen des Berichtes beschriebene Transferphase diene der vertiefenden Untersuchung von Forschungsfragen, die sich aus den Zwischenergebnissen der Pilotphase des Gesamtvorhabens ergeben haben. Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen der durch das baden-württembergische Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus mit ca. 130.000 Euro geförderten Transferphase vom 01.05.2021 bis zum 31.10.2021 die Bildung eines Referenz-Produktmodells fremderregter Synchronmaschinen sowie eine Potenzialabschätzung zum Einsatz von Mehrphasenmaschinen im Kontext der Produktbaukastenentwicklung vorangetrieben. Im Kontext der Produktionsbaukastenentwicklung wurden Skalierungs- und Verkettungsanalysen, ein technologisches Produkt-Prozess-Modell sowie die Konzeption eines modularen Werkstückträgersystems tiefergehend betrachtet.

Wie auch in der Pilotphase wurden die Ergebnisse der Transferphase zu Beginn der Projektphase des Gesamtvorhabens den Projektpartnern zur Verfügung gestellt und dienen somit der schnellen und effektiven Aufnahme und Umsetzung der Arbeiten. Die Projektphase AgiloDrive2 – „Agile Produktionssysteme und modulare Produktbaukästen für elektrische Traktionsmotoren“ wird seit November 2021 durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

2 Zielsetzungen

Basierend auf den Ergebnissen der Pilotphase sollen im Rahmen der Transferphase des Forschungsvorhabens AgiloDrive weitergehende Fragestellungen untersucht werden. Hierbei steht im Arbeitspaket (AP) 1 zum einen die Bildung eines Referenz-Produktmodells von fremderregten Synchronmaschinen (FSM) im Fokus. Zum anderen soll im Rahmen der Simulation und Auslegung elektrischer Motoren der Fokus von bislang dreiphasigen Traktionsantrieben auf Mehrphasensysteme verlegt und der Einfluss der Phasenanzahl auf die Eigenschaften der Maschine untersucht werden.

Das AP 2 setzt sich zum einen die tiefergehende, simulationsbasierte Untersuchung von Skalierungs- und Verkettungsstrategien unter Einbeziehung wirtschaftlicher Aspekte zum Ziel.

Darüber hinaus soll ein technologisches Produkt-Prozess-Modell zur Verknüpfung von Produkteigenschaften und Prozessparametern erarbeitet werden. Zuletzt wird, basierend auf den Ergebnissen der Pilotphase, die Konzeption eines modularen Werkstückträgersystems weiter vorangetrieben.

3 Arbeitsergebnisse

Im Folgenden werden die im Verlauf des Forschungsvorhabens durch die beteiligten Institute des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) – das wbk Institut für Produktionstechnik, das Elektrotechnische Institut (ETI) und das Institut für Produktentwicklung (IPEK) – erzielten Arbeitsergebnisse beschrieben.

Arbeitspaket 1: Produktbaukasten:

Im Rahmen des AP 1 wurden durch das IPEK die Einflussgrößen, welche die Produkteigenschaften fremderregter Synchronmaschinen (FSM) bestimmen, erarbeitet, analysiert und bewertet sowie in den Kontext von permanenterregten Synchronmaschinen (PSM) gestellt.

Durch das ETI wurde das Potenzial mehrphasiger Maschinen für den Einsatz als Traktionsantrieb untersucht. Besonderer Fokus sollte dabei auf den Drehmomentrippel und die Verluste gelegt werden. Hierzu wurde in einem ersten Schritt die Toolkette aus der Pilotphase um mehrphasige Maschinen mit Fokus auf die automatisierte und flexible Geometrieerzeugung erweitert. Weiter wurden die Berechnungen der Verluste von 3-phasigen auf m-phasige Maschinen erweitert.

Arbeitspaket 2: Produktionsbaukasten:

Im Rahmen des Arbeitspaketes wurde durch das wbk zunächst ein Simulationsmodell der Rotorproduktion mit Fokus auf die Verkettung der Funktionseinheiten erstellt. Ebenso wurden die Wechselwirkungen von Produkteigenschaften und der zur prozessseitigen Abbildung dieser Eigenschaften notwendigen Produktionstechnik analysiert. Darüber hinaus wurden auf Grundlage der methodischen Vorarbeiten der Pilotphase Werkstückträgerkonzepte für die variantenflexible E-Motoren-Produktion ausgearbeitet.

Arbeitspaket 3: Implementierung und Validierung:

Das AP 3 stellt mit der Implementierung und Validierung des zukunftsrobusten Produktbaukastens und agilen Produktionssystems einen wichtigen Bestandteil im Kontext des Gesamtvorhabens AgiloDrive dar. Im Rahmen der Transferphase war dieses AP jedoch nicht Inhalt der Arbeiten und wird folgend nicht näher beschrieben.

3.1 AP 1: Produktbaukastenentwicklung

3.1.1 Arbeitsinhalte des IPEK

Im Rahmen der Pilotphase des Forschungsvorhabens (Az. 3-4332.62-KIT/12) wurden ausschließlich Untersuchungen zur Baukastenentwicklung von PSM durchgeführt. Während PSM ausschließlich Permanentmagnete zur Erregung einsetzen, gibt es auch Hybriderregte Maschinen, in welchen die Erregung sowohl durch Permanentmagnete als auch elektromagnetische Reluktanz dargestellt wird, sowie FSM, in welchen komplett auf den Einsatz von Permanentmagneten verzichtet wird. Das Rotormagnetfeld wird, vergleichbar mit dem Stator magnetfeld, durch einen Stromfluss erzeugt. Zu Beginn der Transferphase wurden die bei FSM neu hinzugekommenen Einflussgrößen, welche die Eigenschaften der FSM bestimmen, erarbeitet und analysiert. Es handelt sich hierbei insbesondere um Einflussgrößen im Kontext der Rotorwicklung, welche bei PSM den Stator charakterisieren, bspw. zur Beschreibung der Nuten, Blechpakete, Wicklung sowie des verwendeten Drahtes. Darüber hinaus ist insbesondere die Fixierung der Rotorwicklung zu betrachten. Während die Wicklung eines Stators kaum mechanisch belastet wird, wird die Rotorwicklung bei der Rotation des Rotors in Abhängigkeit der

Drehzahl und der daraus resultierenden Umfangsgeschwindigkeit mit hohen Fliehkräften beaufschlagt. Dies führt zu hohen Anforderungen an die Fixierung der Wicklung und beeinflusst die Gestaltung des Rotorblechpakets. In Abbildung 3.1 ist ein Vergleich zwischen einem FSM und PSM gegeben, welcher jeweils eine vierpolige Ausprägung der beiden Maschinenvarianten gegenüberstellt.

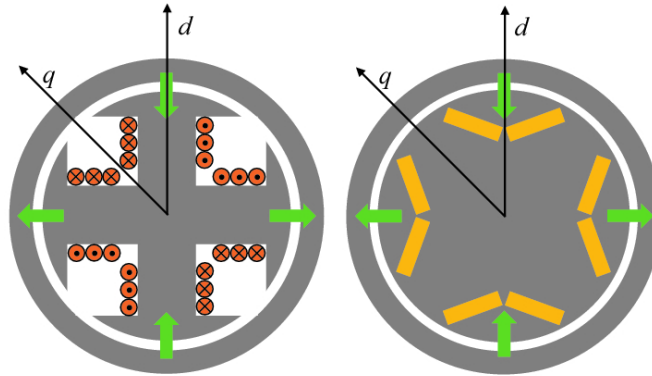


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung von FSM (links); PSM (rechts)¹.

Anschließend an die Analyse der vorliegenden Wechselwirkungen im System „Fremderregte Synchronmaschine“ wurde, analog zur Vorgehensweise für PSM im Rahmen der vorangegangenen Pilotphase, ein Referenz-Produktmodell von FSM erarbeitet. Dieses wird in der Projektphase AgiloDrive2 als Basis zur Überprüfung der Kompatibilität mit dem konzeptionierten Baukasten für elektrische Traktionsmotoren mit Fokus auf PSM dienen. Vorliegende Synergiepotenziale können bei der Implementierung des Produktbaukastens Berücksichtigung finden, um somit einen größeren Nutzen auch über den initialen Fokus des Vorhabens hinaus zu gewährleisten.

3.1.2 Arbeitsinhalte des ETI

Im Folgenden werden die Ergebnisse des ETI im Rahmen der Transferphase vorgestellt. In Kapitel 3.1.2.1 werden Erweiterung der bestehenden Toolkette auf m-phasige Maschinen beschrieben und erste Simulationsergebnisse gezeigt. In Kapitel 3.1.2.2 wird eine Methode vorgestellt, mit der sich Wechselwirkungen der geometrischen Eingangsparameter und den Eigenschaften der Maschine darstellen lassen. Diese Erkenntnisse können im Rahmen der Optimierung weiter genutzt werden, um die Eingangsparameter zielgerichtet zu verfeinern und schrittweise den Lösungsraum zu präzisieren.

3.1.2.1 Modellbildung mehrphasiger Maschinen

Im Rahmen der Transferphase soll das Potenzial von Maschinen mit einer Phasenzahl $m > 3$ als Traktionsantriebe untersucht werden. Im Rahmen der Dissertation von Miriam Boxriker² wurden hierzu am ETI erste Untersuchungen durchgeführt. Im Rahmen der Dissertation wurde eine 3-phasige Maschine mit einer 9-phasigen Maschine verglichen. Dabei wurde gezeigt, dass die Erhöhung der Phasenzahl grundsätzlich von Vorteil ist. So weist die Durchflutungsgrundwelle eine höhere Amplitude auf und der Oberwellenanteil wird verringert. Dadurch konnten das Drehmoment gesteigert und die Verluste verringert werden. Dies geschieht jedoch zu Lasten eines verringerten Wickelfaktors. Frau Boxriker bezieht sich auf das Grundwellenmodell der

¹ M. Doppelbauer, *Grundlagen der Elektromobilität*, 2020.

² M. Boxriker, *Höhere Ausnutzung mehrphasiger Synchronmaschinen durch Spulen- und Polpaarzahlumschaltung*, 2020.

Maschine, dort werden Oberwelleneffekte nicht dargestellt und somit können diese auch nicht berücksichtigt werden.

An diesem Punkt setzten die Arbeiten der Transferphase des Vorhabens AgiloDrive an. Dabei wurde die Toolkette allgemeingültig erweitert, sodass beliebige mehrphasige Maschinen berechnet werden können. Hierzu wurde die initiale Geometrieerzeugung angepasst. Die initiale Geometrie wird mit FluxMotor erstellt, wobei nur 3-phasige Maschinen erstellt werden können, sodass die bestehenden Skripte entsprechend angepasst werden mussten. Die initiale Maschine wird als parametrisches Modell in die Toolkette eingelesen. Nachfolgend werden die Phasen- und Nutzahl an die gewünschten Randbedingungen angepasst. Die parametrische Beschreibung der Maschine bietet hierbei große Vorteile. So ist initial nur eine Nut parametrisiert, die restlichen Nuten werden durch Duplizieren und Rotation dieser erstellt. Durch Anpassen des Rotationswinkels in Abhängigkeit der Nutzahl kann so sehr schnell die Anzahl der Nuten angepasst werden. Ähnliches gilt für die Phasenzahl der Maschine. Hier muss die Wicklung angepasst und darauf geachtet werden, in welcher Nut welche Phase liegt und wie diese verschaltet werden. Abschließend wird die initiale Rotorposition basierend auf Nut- und Polteilung berechnet.

Nach Abschluss dieser Anpassungen können FE-Simulationen in der Softwareumgebung Altair Flux durchgeführt werden. Für die Auswertung mussten weitere Anpassungen im Postprocessing vorgenommen werden. Der Einfluss der Phasenzahl hat Auswirkungen auf die Amplitude der Ströme i und Spannungen u sowie auf das Luftspaltfeld und damit auf die Flussverkettung ψ im Rotor. Dies muss im gesamten Postprocessing berücksichtigt werden.

Im Rahmen elektrischer Maschinen hat sich die Raumzeigertransformation als besonders vorteilhaft herausgestellt. Bei dieser werden die Stranggrößen in Zeiger umgeformt, ohne dass dabei Informationen darüber verloren gehen. Die Transformation selbst, kann für jede Phasenzahl durchgeführt werden. Im Allgemeinen gilt für Mehrphasensysteme, dass $(m-1)/2$ Raumzeiger (RZ) und eine Nullkomponente (NK) existieren. Die Berechnungsvorschrift wurde in Clarke³ und Boxriker⁴ vorgestellt und lautet allgemein für ein m -phasiges System:

$$RZ = \frac{2}{m} \cdot \begin{bmatrix} \underline{a}^{1 \cdot 0} & \dots & \underline{a}^{1 \cdot (m-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{a}^{\frac{m-1}{2} \cdot 0} & \dots & \underline{a}^{\frac{m-1}{2} \cdot (m-1)} \end{bmatrix} \cdot \underline{u} \quad (1)$$

$$NK = \frac{1}{m} \cdot [1 \quad \dots \quad 1] \cdot \underline{u} \quad (2)$$

mit $\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{m}}$

Die vorgestellte Transformation wird auch α - β - Transformation genannt und bildet ein statorfestes Koordinatensystem. Für die Regelung wiederum ist ein rotorfestes Koordinatensystem von Vorteil, dazu werden die RZ um den Winkel $\gamma_{dq}(t)$ zwischen Stator- und Rotorfeld gedreht⁵.

$$RZ_{dq} = RZ \cdot e^{j\gamma_{dq}(t)} \quad (3)$$

Das rotorfeste System wird auch d-/q- System genannt. Dabei ist die d-Achse in Richtung der Rotorerregung, die q-Achse 90° elektrisch zur d-Achse orientiert.

³ W. Clarke, *Circuit Analysis of AC Power Systems*, vol. I. J. Wiley & sons, New York, 1943.

⁴ M. Boxriker, *Höhere Ausnutzung mehrphasiger Synchronmaschinen durch Spulen- und Polpaarzahlumschaltung*, 2020.

⁵ R. H. Park, *Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part I*, Trans. Am. Inst. Electr. Eng., vol. 48, no. 3, pp. 716–727, 1929.

Am Beispiel des inneren Drehmoments der Maschine sollen die Auswirkungen der Änderung der Phasenzahl verdeutlicht werden. Die Gleichung (4) muss auf m-phasige Maschinen erweitert werden. Daraus folgt für m-phasige Maschinen Gleichung (5), mit m für die Anzahl der Phasen. Die Änderung der Phasenzahl hat, wie in Gleichung (1) beschrieben, Auswirkungen auf Ströme und Spannungen und damit ebenfalls auf die Flussverkettung der Maschine, daher hat die eigentlich trivial wirkende Anpassung der Gleichung (4) weitreichende Änderungen für die Maschine zur Folge.

$$M_i = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\psi_d(i_d, i_q, \gamma) \cdot i_q - \psi_q(i_d, i_q, \gamma) \cdot i_d) \quad (4)$$

$$M_i = \frac{m}{2} \cdot p \cdot (\psi_d(i_d, i_q, \gamma) \cdot i_q - \psi_q(i_d, i_q, \gamma) \cdot i_d) \quad (5)$$

Die Berechnung der Verluste im Postprocessor muss ebenfalls angepasst werden. Diese war ebenfalls auf 3-phasige Maschinen begrenzt. Die Kupferverluste werden in der Toolkette allgemein pro Phase berechnet, hier war es ausreichend die Berechnung der Phasenströme aus dem Effektivwert des Stromes unter Berücksichtigung der Phasenverschiebung anzupassen und von standardmäßigen 3 Phasen auf m Phasen zu erweitern.

Bei der Berechnung der Eisenverluste gestaltete sich die Anpassung deutlich komplizierter, die Berechnung der Eisenverluste wird nach der FE-Simulation im Postprocessing der Toolkette durchgeführt und wurde durch Zhang⁶ detailliert beschrieben. Darin wurde ein Berechnungsverfahren eingeführt, durch welches durch Ausnutzen von Symmetrien sowohl im Rotor als auch im Stator sowie der Erregung der Maschine die Rechenzeit reduziert wird. Es wurde gezeigt, dass es für eine vollständige Beschreibung einer beliebigen Feldgröße, wie etwa der magnetischen Feldstärke, ausreicht, lediglich $360^\circ/(2 \cdot m)$ einer Periode zu berechnen. Im Anschluss können diese Abschnitte einer Periode zusammengesetzt und daraus die vollständige Periode berechnet werden. Diese Methode wurde für 3-phasige Maschinen implementiert und im Rahmen der Transferphase auf m-phasige Maschinen erweitert. Dies ermöglicht es, bei der Berechnung der Eisenverluste ebenfalls die frequenzabhängigen Verluste zu berechnen.

Nach Abschluss der Erweiterungen der Toolkette ist es möglich, m-phasige Maschinen zu simulieren und zu optimieren, sowie die Eisen-, Kupfer-, und Magnetverluste im gesamten Kennfeld zu berechnen. Weiter ist es möglich, Stator und Wicklung beliebig anzupassen – unter Beibehalten des Rotordesigns. Abbildung 3.2 zeigt eine beliebige initiale Maschine, Abbildung 3.3 bis Abbildung 3.5 zeigen beispielhaft, wie Stator und Wicklung angepasst werden können. Neben der Anpassung der Phasenzahl (Abbildung 3.3) können ebenfalls die Lochzahl (Abbildung 3.4) und die Anzahl der Schichten (Abbildung 3.5) verändert werden. Darüber hinaus ist es bei Mehrschichtwicklungen möglich, eine Sehnung einzufügen, ebenfalls Abbildung 3.5.

⁶ B. Zhang, *Modellierung und hocheffiziente Berechnung der lastabhängigen Eisenverluste in permanentmagneterregten Synchronmaschinen*, 2019.

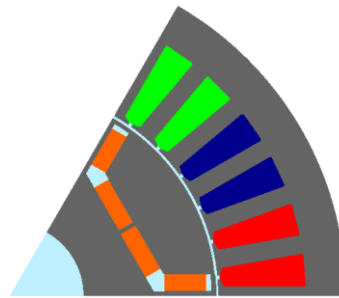


Abbildung 3.2: 3-phasige initiale Maschine.

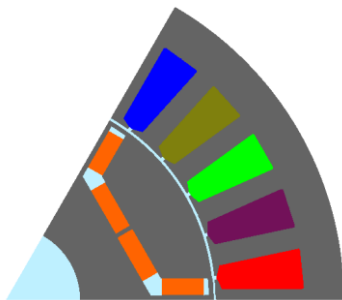


Abbildung 3.3: 5-phasige Maschine mit Lochzahl $q = 1$.

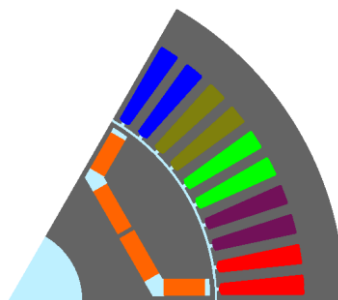


Abbildung 3.4: 5-phasige Maschine mit Lochzahl $q = 2$.

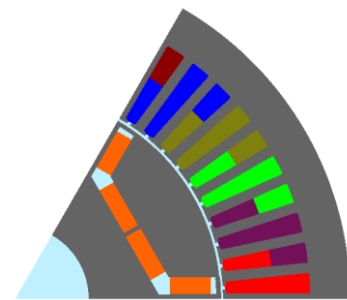


Abbildung 3.5: 5-phasige Maschine mit Zweischichtwicklung, Lochzahl $q=2$ und Sehnung um eine Nut.

Neben den zuvor gezeigten Anpassungen ist es bei geradzahigen Phasenzahlen darüber hinaus möglich, einen Phasenversatz einzufügen. Für eine 6-phasige Maschine ergeben sich die Phasenwinkel aus Tabelle 3-1. Die Maschine m6 verhält sich dabei wie eine 3-phasige Maschine, da Phase 1 und Phase 4, Phase 2 und Phase 5 sowie Phase 3 und Phase 6 genau um 180° phasenverschoben sind. Dies bedeutet, dass z. B. der Rückleiter von Phase 1 in Phase zum Leiter von Phase 4 liegt. Wird nun das 6-Phasen System in ein 2×3 -Phasensystem aufgeteilt und diese um einen Phasenversatz von 30° gegeneinander verschoben, so ergeben sich für die Regelung und Ansteuerung neue Freiheitsgrade. In Abbildung 3.6 sind die ersten Ergebnisse dargestellt für eine Optimierung des Betriebsverhaltens am Beispiel des Drehmomentrippels bei einem reinen q-Strom von 200 Arms. Durch den Phasenversatz der Maschine m6s ist der Betrag des mittleren Drehmoments größer, was mit den Vorarbeiten durch Boxriker⁷ übereinstimmt. Darüber hinaus ist der Drehmomentrippel geringer. Hier zeigen sich weitere Vorteile der mehrphasigen Maschine im Vergleich zur 3-phasigen. In Abbildung 3.9 ist das gesamte Differenzkennfeld der beiden Maschinen dargestellt. Für die Berechnung wurde der Drehmomentrippel der Maschine m6s von dem Drehmomentrippel der m6 Maschine abgezogen. Zu sehen ist, dass nahezu im gesamten Kennfeld der Drehmomentrippel der m6s Maschine geringer ist als bei der m6 Maschine. Im Feldschwächbetrieb auf der Maximalkennlinie ist dieser sogar um bis zu 50 % reduziert.

Tabelle 3-1: Phasenwinkel für 6-phasige Maschinen

6-phasige Maschine (m6)	$0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ, 300^\circ$
2x3-phasige Maschine (m6s)	$0^\circ, 30^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 240^\circ, 270^\circ$

⁷ M. Boxriker, *Höhere Ausnutzung mehrphasiger Synchronmaschinen durch Spulen- und Polpaarzahlumschaltung*, 2020.

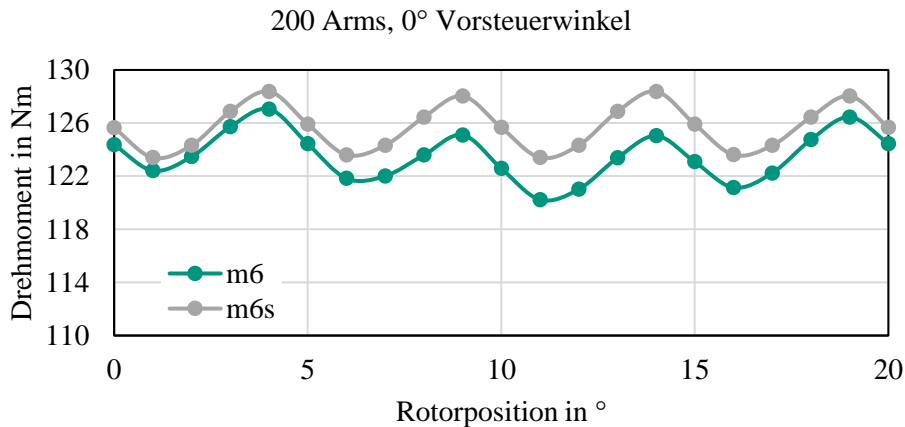


Abbildung 3.6: Drehmomentrippel für die 6-phasige (m6) und die 2x3-phasige Maschine (m6s).

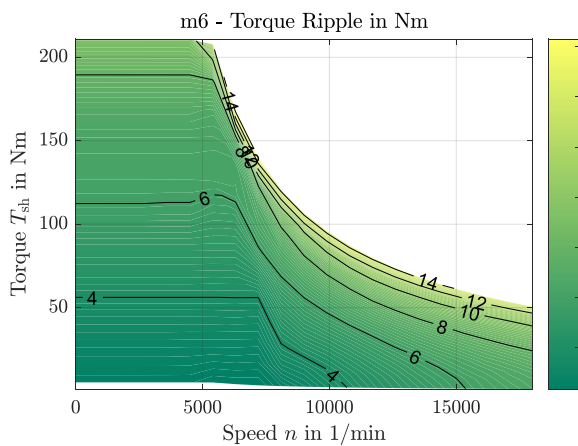


Abbildung 3.7: Drehmomentrippel für die Maschine m6.

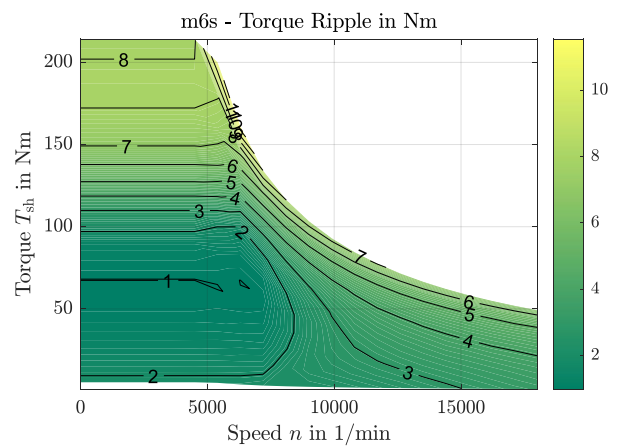


Abbildung 3.8: Drehmomentrippel für die Maschine m6s.

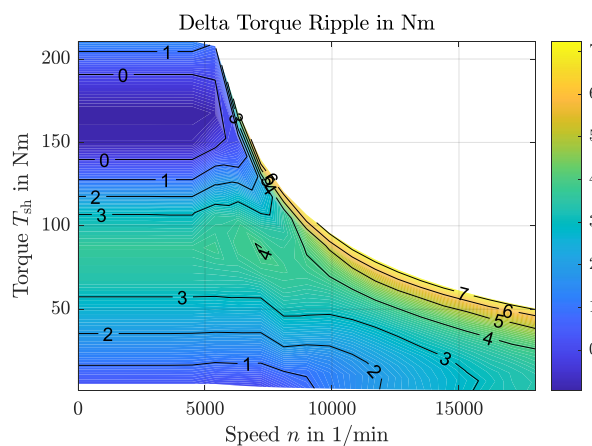


Abbildung 3.9: Differenzkennfeld des Drehmomentrippels für die Maschinen m6 und m6s.

Im Rahmen der Transferphase des Vorhabens AgiloDrive2 sollte das Potenzial von mehrphasigen Maschinen für die Verwendung als Traktionsantrieb analysiert werden. Zur Bewertung wurden hierfür der Drehmomentrippel und die Verluste herangezogen werden. In Abbildung 3.6 ist der Drehmomentverlauf über dem Rotorwinkel dargestellt. Hier konnte gezeigt werden, dass durch die Verwendung mehrphasiger Maschinen der Drehmomentrippel in einem bestimmten Arbeitspunkt reduziert werden kann. In Abbildung 3.9 wurde das Differenzkennfeld

einer 3-phasigen und einer 6-phasigen Maschine gebildet. Dabei sind die geometrischen Abmessungen der beiden Maschinen identisch, lediglich die Wicklung wurde angepasst. Hier ist zu sehen, dass nahezu im gesamten Kennfeld durch Anpassen der Wicklung der Drehmomentrippel deutlich reduziert werden kann. Somit kann der Einsatz von mehrphasigen Maschinen bei Anwendungen, welche besondere Anforderungen an die Drehmomentgüte stellen, sinnvoll sein.

Im Rahmen der Laufzeit der Transferphase des Gesamtvorhabens konnte eine solide Auslegung nicht durchgeführt werden, sodass seriöse Aussagen, welche über die umfassenden Vorarbeiten von Boxriker⁸ hinaus gehen, zum gegenwärtigen Zeitpunkt leider nicht getroffen werden können. Das Potenzial von Mehrphasenmaschinen wird daher im Rahmen der Projektphase AgiloDrive2 weitergehend untersucht.

3.1.2.2 Analyse von Wechselwirkungen der Eingangsparameter mit charakteristischen Größen der Maschine

Im Rahmen der Optimierung elektrischer Maschinen werden die geometrischen Parameter der initialen Maschine variiert und so ein Parameterraum aufgespannt. Innerhalb dieses Lösungsraumes kann die unter den gegebenen Rahmenbedingungen optimale Maschine gefunden werden. Da für jede dieser Variationen eine FE-Simulation durchgeführt werden muss, muss für eine effiziente Auslegung die Anzahl an durchzuführenden Simulationen möglichst gering sein. Im Rahmen der Pilotphase wurde bereits eine Methode erarbeitet, welche den Parameterraum mit möglichst wenigen Variationen genau abbilden kann. Da der Auslegungsprozess ein iterativer Prozess ist, in dem der Lösungsraum Schritt für Schritt verfeinert und so immer detailliert aufgelöst wird, wurde im Rahmen der Transferphase eine Methode implementiert, welche die Wechselwirkungen der Parameter analysiert und visualisiert. So soll der Einfluss der Parameter auf die Eigenschaften der Maschine in jedem Stadium der Entwicklung neu bewertet und ggf. von weiteren Variationen ausgeschlossen werden. Da im ersten Schritt möglichst alle geometrischen Parameter aufgenommen werden sollen, um einen möglichst großen Parameterraum aufzuspannen, muss die Methode bei großer Dimension des Parametervektors und vergleichsweise wenigen Variationen bereits valide Ergebnisse erzielen. Eine erste Implementierung mit einem linearen bzw. quadratischen Modell konnte hier nicht die gewünschte Genauigkeit liefern, so dass auf die statistische Methode der Korrelation zurückgegriffen wurde⁹. Hiermit konnten erste vielversprechende Ergebnisse erzielt werden, jedoch müssen weitere Untersuchungen über die Signifikanz der Eingangsparameter durchgeführt werden.

In Abbildung 3.10 ist die Korrelation für einen Maschinensatz dargestellt. Der Maschinensatz besteht aus 435 Variationen und der Eingangsparametervektor wurde bereits auf 6 Parameter reduziert. Gut zu erkennen ist dabei, dass die Eingangsparameter Nuthöhe (OS_{HS}), Zahnbreite (OS_{WT}), Winkel der Magnete (IM_{VM}), Magnetdicke (IM_{TM}) und Magnetbreite (IM_{WM}) eine sehr geringe Korrelation untereinander aufweisen, sodass diese statistisch unabhängig voneinander sind. Die charakteristischen Größen (Leistung (P), Drehmomentrippel T_{ripple}) hingegen besitzen eine statistische Abhängigkeit zu den Eingangsparametern, siehe hierzu den maximalen Drehmomentrippel $T_{maxripple}$ und die Magnetdicke IM_{TM} . Es hat sich gezeigt, dass bei einem ungünstigen Wertebereich der Eingangsparameter mit vielen invaliden Maschinen eine statistische Abhängigkeit der Eingangsparameter auftritt und dadurch der Lösungsraum ungleichmäßig befüllt wird.

⁸ M. Boxriker, *Höhere Ausnutzung mehrphasiger Synchronmaschinen durch Spulen- und Polpaarzahlumschaltung*, 2020.

⁹ F. M. Brückler, *Geschichte der Mathematik kompakt: Das Wichtigste aus Analysis, Wahrscheinlichkeitstheorie, angewandter Mathematik, Topologie und Mengenlehre*, 1st ed. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2017.

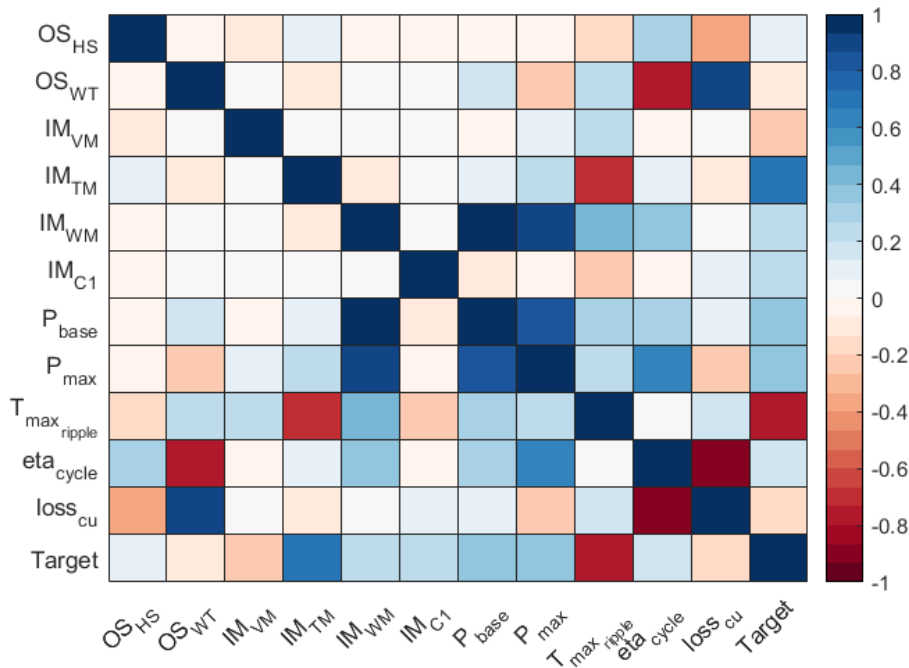


Abbildung 3.10: Korrelation zwischen Eingangsparametern und charakteristischen Größen der Maschine.

3.2 AP 2: Produktionsbaukastenentwicklung

3.2.1 Skalierungs- und Verkettungsanalysen unter Einbeziehung der Systemkomplexität

Im Rahmen der Transferphase wurde das in der Pilotphase implementierte Excel-Tool zur schnellen Abschätzung der benötigten Anzahl an Funktionseinheiten für die Produktion einer bestimmten Stückzahl elektrischer Traktionsmotoren um die Möglichkeit der Eingabe der Gesamtanlageneffektivität (OEE – Overall Equipment Effectiveness) erweitert.

	Prozesse	Betriebsart	Arbeits-schichten	Bearbeitungs-zeit	Gesamtzeit	OEE Gesamt	Anzahl Anlagen	Anlagen-auslastung
Prüfung_geometrisch	Blechkpaket in Ladungsträger bereitstellen	Manuell		0	160	80%	3	74%
	Blechkpaket aus Ladungsträger entnehmen	Manuell		20				
	Blechkpaket auf Werkstückträger positionieren	Manuell		20				
	Blechkpaket mit Werkstückträger fixieren	Manuell	2	20				
	DMC scannen	Manuell		10				
	Blechkpaket prüfen	Manuell		75				
	Werkstückträger mit Blechkpaket freigeben	Automatisiert		5				
	Werkstückträger mit Blechkpaket weiterleiten	Automatisiert		10				

Abbildung 3.11: Auswahl der Betriebsart für die Prozessschritte der „Geometrischen Prüfung“ sowie der Arbeitsschichten und des OEE der entsprechenden Funktionseinheit.

Wie in Abbildung 3.11 dargestellt ist, kann nun für jede Funktionseinheit ein prozentualer Wert der OEE gewählt werden, der sich folglich auf die zur Produktion zur Verfügung stehende Bearbeitungszeit der entsprechenden Funktionseinheit auswirkt. Gemeinsam mit der bereits vorhandenen Möglichkeit, die Betriebsart einzelner Prozessschritte jeder Funktionseinheit als „manuell“ oder „automatisiert“ auszuwählen, kann hierdurch dem Umstand Rechnung getragen werden, dass durch eine zunehmende Automatisierung in der Regel sowohl schnellere Bearbeitungszeiten als auch eine höhere OEE angenommen werden können. Im Gegensatz hierzu kann die steigende Komplexität der Funktionseinheiten, die mit der geforderten Flexibilität im Sinne des agilen Ansatzes des Produktionssystems einhergeht, auch zu größeren Störzeiten und somit einer geringeren OEE führen. Das Excel-Tool bietet die Möglichkeit, dies für jeden Prozess entlang der Prozessketten der Rotor- und Statorproduktion zu berücksichtigen.

Wie dem Abschlussbericht der Pilotphase des Forschungsvorhabens entnommen werden kann, dient das in der Pilotphase in Tecnomatix Plant Simulation implementierte Modell der Rotorproduktion vor allem der Erweiterung des Excel-Tools um Stör- und Reparaturzeiten sowie einer Simulation der Fertigung verschiedener Produktvarianten und Losgrößen.

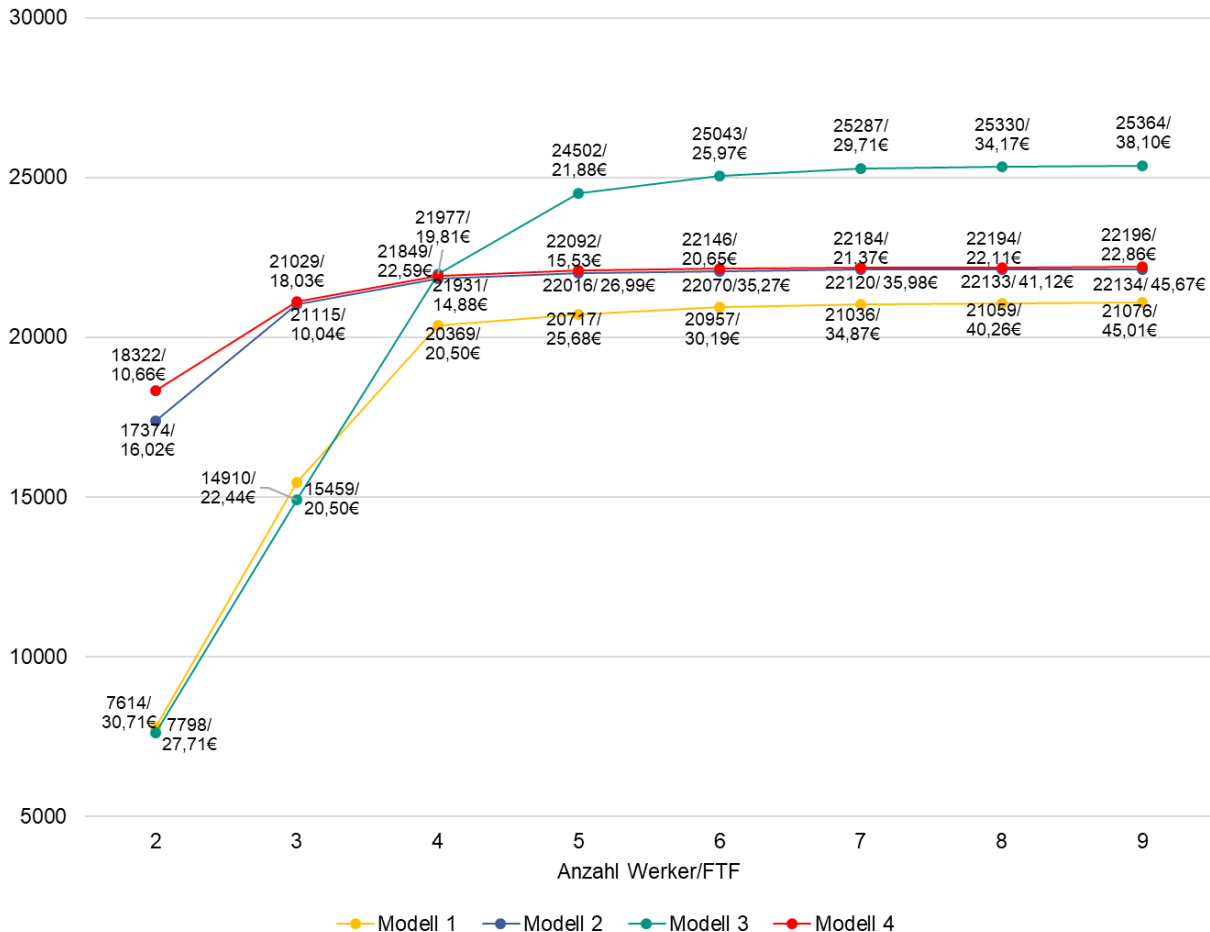


Abbildung 3.12: Ausbringungsmenge und Produktionskosten pro Rotor für die vier simulierten Modelle der Rotorlinie (Quelle: KIT/wbk¹⁰).

Im Rahmen der Transferphase wurde die Betrachtung von Verkettungs- und Transportstrategien tiefergehend vorangetrieben. Hierzu wurden insgesamt vier Modelle M1-M4 der Rotorlinie mit verschiedenen Automationsgraden der Verkettung und des Transports erstellt. So wurde neben dem rein manuellen Bestücken von Anlagen und dem Transport von Bauteilen mit Handwagen (M1) auch eine automatisierte Bestückung – z. B. mit Robotern – und ein vollautomatischer Transport mit fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) (M4) simuliert. Darüber hinaus wurden zwei Mischsysteme (M2, M3) erarbeitet und analysiert. Die Abbildung von Störzeiten durch Ausfälle der Maschinen konnte durch die Implementierung von „Reparaturwerkern“ in Plant Simulation verbessert werden. In die gesamte Betrachtung flossen zudem auch wirtschaftliche Aspekte wie Anschaffungs-, Betriebs- oder Personalkosten ein. Aus einer Vielzahl an Simulationsläufen konnten so für jedes Modell die erreichbare Ausbringungsmenge und entstehende Produktionskosten pro Rotor in Abhängigkeit der Anzahl an Werkern oder FTF ermittelt werden (siehe Abbildung 3.12). Trotz Ungenauigkeiten aufgrund notwendiger Schätzwerte dienen die Simulationsergebnisse einer ersten Abschätzung der benötigten Mitarbeiter, Technologien und anfallender Kosten. Mit ihrer Hilfe kann eine „Roadmap“ bzw. Strategie erarbeitet werden, zu

¹⁰ R. Gürtler, *Entwicklung und Simulation skalierbarer Verkettungsstrategien im Kontext der Produktion elektrischer Traktionsmotoren*, Abschlussarbeit, 2021.

welchem Zeitpunkt und in welcher Form das Verkettungs- und Transportsystem ausgebaut werden muss. So kann der Einsatz von weiteren Mitarbeitern der Automatisierung von Bestückungs- und Transportprozessen gegenübergestellt werden.

3.2.2 Technologisches Produkt-Prozess-Modell für die agile E-Motoren-Produktion

Bei der Entwicklung des technologischen Produkt-Prozess-Modells für die agile E-Motoren-Produktion wurden im Rahmen der Transferphase mehrere Workshops durchgeführt. Hierbei wurde darauf geachtet, dass Personen aus den Fachkreisen der Auslegung, Produktentwicklung und Produktionstechnik für elektrische Maschinen anwesend waren. Hierbei war es insbesondere wichtig, eine einheitliche Nomenklatur für Begrifflichkeiten im Kontext der Produkt-Prozess-Entwicklung zu definieren. Die in diesem Zusammenhang relevanten Begrifflichkeiten sind in Tabelle 3-2 dargestellt.

Tabelle 3-2: Bezeichnungen für die grundsätzlichen Begrifflichkeiten im Vorhaben AgiloDrive.

Name	Beschreibung	Beispiel im Kontext des Vorhabens
Produkt	Alles, was als Produkt angeboten werden kann.	Technisches System elektrischer Traktionsmotor
Merkmal	Attribut eines Strukturelements eines technischen Systems.	Leitermaterial, Wicklungstopologie, geom. Formen, ...
Ausprägung	Wert, Umsetzung des Merkmals.	Kupfer, konzentrierte Wicklung, Statordurchmesser 300 mm, ...
Gestalt	Geometrische, stoffliche und informationsbezogene Ausprägungen.	Z. B. virtuelles Modell / realer Prototyp
Funktion	Umwandlung von Input zu Output, Interaktion der Gestalt.	Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie
Gestalt-Funktion	Wechselwirkungen	Statorwicklung <--> magnetisches Feld (es resultiert die Eigenschaft --> Drehmoment)
Eigenschaft	Ausprägung von Gestalt-Funktion.	Drehmoment, Dauerleistung, Gewicht

Im Anschluss wurden Parameter für die Stator- und Rotorbaugruppen identifiziert und in Form von Listen beschrieben. Sämtliche Merkmale wurden in der Reihenfolge der Auslegung festgelegt, um eine Abschätzung für die Entwicklungsreihenfolge zu ermöglichen. Bei der Statorbaugruppe ist zu erwähnen, dass die Merkmale für die drei Maschinentypen der Asynchronmaschine, fremd- und permanenterregten Synchronmaschinen als prinzipbedingt ähnlich einzuschätzen sind. Seitens der Produktionstechnik ist nur der Unterschied von konzentrierten Wicklungen mit Einzelzähnen und verteilten Wicklungen im Vollblechschnitt mit tiefgreifenden Änderungen in der Prozesskette verbunden. Bei der Rotorbaugruppe hingegen ist die gesamte Topologie der drei Maschinentypen unterschiedlich (vgl. Abbildung 3.13).

Liste der E-Maschinen Parameter und Randbedingungen zur Rotorauslegung								
	Reihenfolge	Name	Anmerkungen	Wechselwirkung Fertigungstechnik	Linienwechsel	Modultausch	Werkzeugtausch	Programmierung
	0.1	Auswahl Maschinentopologie (PMSM / ASM / FESM / ...)	Vielseitige Randbedingungen, definiert unterschiedliche Ausnutzungsgrade	2	x	x		
Alle Rotortypen	1.1	Elektr. Frequenz		0				
	1.2	Übersetzung	Bestimmt Maximaldrehzahl	0				
	1.3	Polpaarzahl	Maximal zulässige Polpaarzahl ergibt sich aus maximaler Drehzahl und maximaler elektrischer Frequenz	0				
	1.4	Maximaldrehzahl		1				x
	1.5	erforderliches Drehmoment		1				x
	1.6	Bohrungsdurchmesser Stator		1			x	x
	1.7	Umfangsgeschwindigkeit	Ergibt sich aus Bohrungsdurchmesser Stator und Maximaldrehzahl	0				
	1.8	Magnetische Flussdichte im Luftspalt		0				
	1.9	Luftspalt	Beeinflusst Aufteilung des Gehäuses in 1 oder 2 Lagerschilder; je kleiner der Luftspalt, desto größer die harmonischen Anteile	1			x	x
	1.10	aktive Länge		1			x	x
PMSM	2.1	Magnetaordnung		1			x	x
	2.2	Maximal zulässige Rotortemperatur	Beeinflusst durch Magnetwerkstoff	1		x	x	x
	2.3	Temperatur an der Rotorwelle (eingestellt durch Kühlkonzept des Rotors)	Ermöglicht höhere Dauerleistung und günstigeren Magnetwerkstoff, eventuell höhere mechanische Dauerfestigkeit	1		x	x	x
	2.4	Remanenzflussdichte		1			x	x
	2.5	Koerzitivfeldstärke		1			x	x
	2.6	Innendurchmesser Blechpakete	Beeinflusst Herstellungsprozess der Welle, zu übertragendes Drehmoment und Belastbarkeit des Blechpakets	1			x	x
	2.7	Aximale Höhe der Blechpakete	Maximalwert von (Außendurchmesser-Innendurchmesser)/Axiale Länge darf nicht überschritten werden. Dieser Maximalwert sollte in Abhängigkeit von Erfahrungswerten gewählt werden, damit die Blechpakete nicht axial zu kurz werden und sich wie Tellerfedern verhalten.	1			x	x
	2.8	Anzahl Blechpakete	Verluste durch Toleranzketten zwischen Magnetlänge und axialer Höhe der Blechpakete berücksichtigen	1				x
	2.9	Anzahl Magnete pro Blechpakete		1			x	x
	2.10	Schränkungswinkel der Blechpakete	Erfordert Aufwand bei Ausrichtung der Blechpakete / Herstellung der Blechpakete	1			x	x
ASM	2.11	Zulässiges Fügespiel in Magnetaschen	Festen Wert definieren (bspw. 0.5-0.1mm umlaufender Spalt), je nach Magnetfixierungsverfahren zu wählen	2			x	x
	2.12	Art der Magnetfixierung	Erst mechanische Auslegung ohne Verlass auf die Magnetfixierung	2		x		
	2.13	Anzahl unterschiedlicher Magnetabmessungen		1			x	x
	2.14	Magnetabmessungen	L.B.H sollten sich deutlich unterscheiden (bspw. Differenz>2mm)	1			x	x
	3.1	Werkstoff für Kurzschlussläufer		2		x	x	x
	3.2	Anzahl Stäbe des Kurzschlussläufers	Festlegung durch Verhältnis aus Stabzahl zu Nutzahl des Stators	2			x	
	3.3	Abmessungen des Kurzschlussläufers		1			x	x
	3.4	Zulässige Porosität des Kurzschlussläufers		1			x	x
	3.5	Kühlkonzept / Temperatur an Rotorwelle		1		x	x	x
	FESM	4.1	Phasen / Stränge		1			x
4.2		Wicklungsart		harte Randbedingung				
4.3		Verschaltungsart		1				x
4.4		Isolationsfestigkeit		1			x	x
4.5		Mech. Kuperfüllfaktor		1			x	x
4.6		Elektr. Kuperfüllfaktor		1			x	x
4.7		Fixierung der Wicklung		2		x	x	x
Alle Rotortypen	5.1	Blechstärke	Beeinflusst Verluste	harte Randbedingung				
	5.2	Paketierungsart der Blechpakete		1			x	x
	5.3	Welle-Nabe-Verbindung zwischen Blechpaket und Welle		2		x	x	x
	6.1	Drehmomentübertragung zum Getriebe		0				
	6.2	Lagerabstand	Beinflusst durch aktive Länge, Abstand zu spannungsführenden Teilen (Wicklungen)	1			x	x
	6.3	Lagerabmessungen A	Bestimmt Montagereihenfolge der Lagerschilder	1			x	x
	6.4	Lagerabmessungen B	Bestimmt Montagereihenfolge der Lagerschilder	1			x	x
7.1	Wuchtgüte		1				x	

Abbildung 3.13: Ausschnitt der Auflistung der Produktmerkmale für die drei verschiedenen Rotortypen mit Wechselwirkungsanalyse zur Produktionstechnik. Eine analoge Liste wurde für die Statorbaugruppe angelegt.

Nachdem die Merkmale für den Rotor und Stator mit Erklärungen und Randbedingungen festgelegt wurden, ist in der Liste eine Erweiterung für die abgeschätzten Wechselwirkungen mit den unterschiedlichen Produktionstechnologien erstellt worden. Mittels dieser Abschätzung kann ermittelt werden, wie schwerwiegend sich Entscheidungen bei der Produktauslegung auf die Produktionstechnologie auswirken können und zu welchem Zeitpunkt diese zu treffen sind. Im Laufe der Projektphase AgiloDrive2 kann das Produkt-Prozess-Modell weiter detailliert werden.

3.2.3 Konzeption eines modularen Werkstückträgersystems

Im Rahmen der Transferphase des Vorhabens wurde zudem ein modulares Werkstückträgersystem konzeptioniert. Dieses besitzt zwei wichtige Schnittstellen: zum einen zu dem Transportsystem und zum anderen zu dem Werkstück (vgl. Abbildung 3.14). Weiterhin stehen die drei Grundkomponenten in Wechselwirkung mit den Maschinen- und Prozessmodulen der Funktionseinheiten. Diese lassen sich weiterhin unterteilen in die Rotorfertigung und -montage, die Statorfertigung und -montage sowie die abschließende Endmontage. Das

Werkstückflusssystem bezeichnet den Transport des Werkstückträgersystems mittels eines Transportsystems, wie z. B. dem fahrerlosen Transportsystem (FTS), und der Handhabungstechnik. Die Handhabungstechnik befasst sich jedoch hauptsächlich mit der Handhabung des Werkstücks, also der Entnahme und Beladung des Werkstückträgersystems mit Werkstücken. Dies ist stets ein wichtiger Schritt zu Beginn und zum Ende der Prozesskette, kann aber auch innerhalb der Fertigungs- bzw. Montagemodule erfolgen. Der Werkstückträger muss während der Handhabung allerdings fixiert werden.

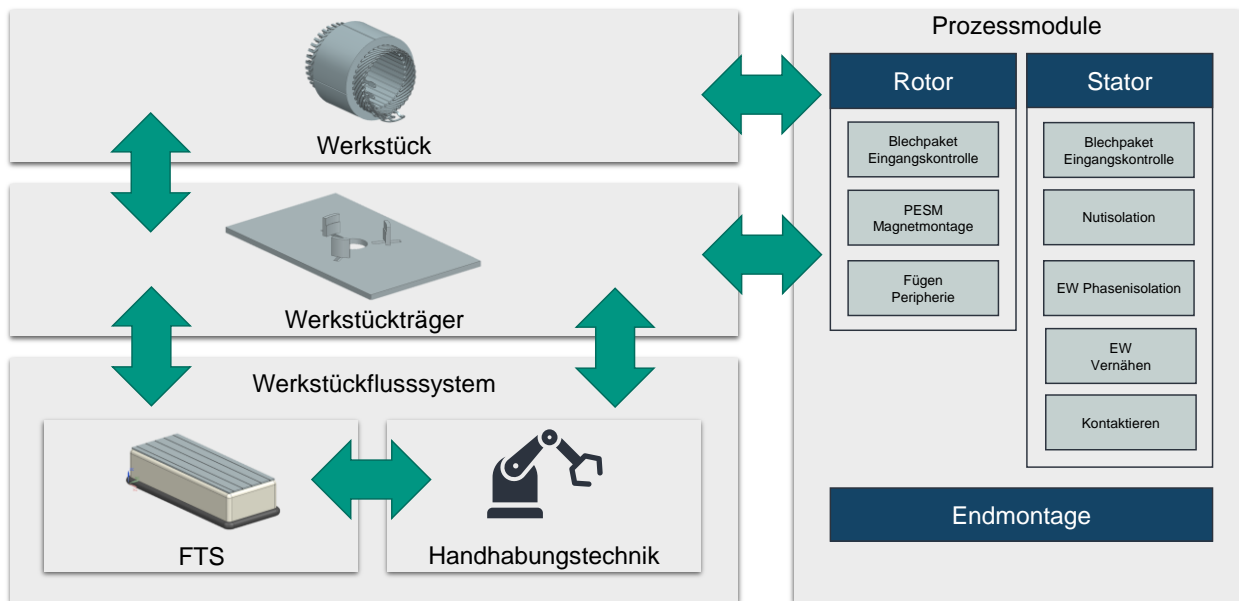


Abbildung 3.14: Darstellung der Schnittstellen des Werkstückträgersystems zu anderen Komponenten des Fertigungssystems.

Wie es in der Entstehung technischer Systeme üblich ist, wurden in einem ersten Schritt die Anforderungen und Randbedingungen analysiert und bewertet. Hierbei leiten sich die Anforderungen aus dem zu tragenden (und ggf. zu spannenden) Werkstück, dem Werkstückträgersystem und dem übergeordneten Transportsystem ab. Die entscheidenden Werkstückbaugruppen leiten sich aus den drei wichtigsten Baugruppen einer elektrischen Maschine ab: dem Rotor, Stator und dem Gehäuse. Innerhalb der Pilotphase sind die möglichen in Frage kommenden Körper, Aggregatzustände und Geometrien abgebildet worden.

Nach der Klärung der Anforderungen und Randbedingungen wurden die Schnittstellen basierend auf den Erkenntnissen der Pilotphase analysiert, auch um die Systemgrenzen der Lösungsbereiche zu definieren. Die Aufnahme und Spannung des Werkstückes auf dem Werkzeugträger, die Fixierung des Werkstückträgers auf dem Transportsystem und die Modularisierung für verschiedene Werkstückvarianten stellen in diesem Zusammenhang jeweils einen Lösungsraum dar. Für diese Lösungsräume wurden mittels Kreativmethoden Teillösungen generiert, welche in einem morphologischen Kasten in strukturierter Form gesammelt wurden.

Abbildung 3.15 zeigt einen Ausschnitt des morphologischen Kastens, der Möglichkeiten für die Aufnahme von Statorn beschreibt. Im Anschluss können die Teillösungen zu einer Gesamtlösungen des Werkstückträgersystems kombiniert werden. In der Pilotphase konnten hierfür bereits Konzepte für die Fixierung des Werkstückträgers auf dem Transportsystem erarbeitet werden, welche im Rahmen der Transferphase weiter ausgestaltet wurden. Im gegebenen Beispiel wurde exemplarisch ein Fahrerloses Transportfahrzeug (FTF) gewählt.

Morphologischer Kasten

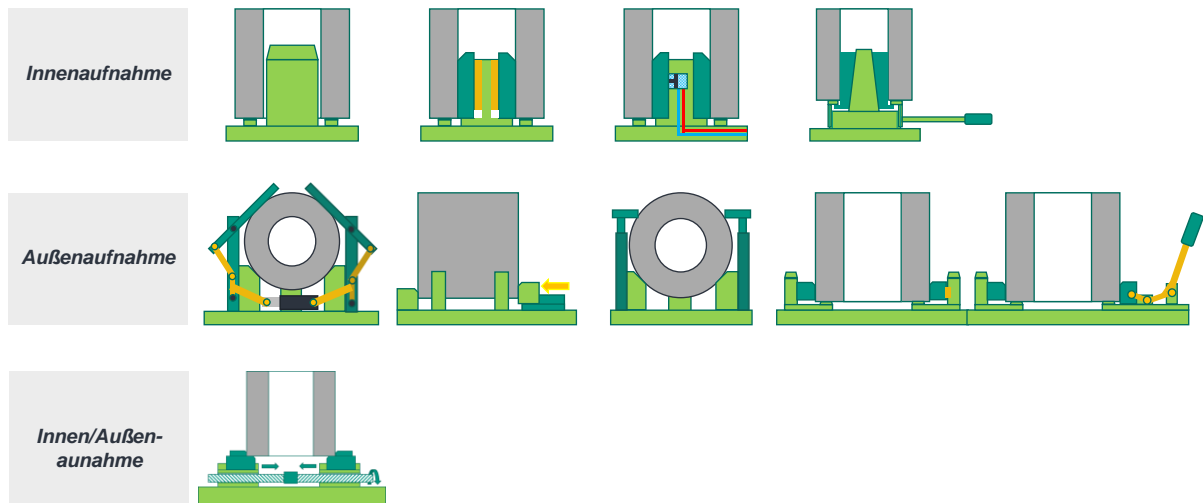


Abbildung 3.15: Morphologischer Kasten (Ausschnitt) zur Lösungsfindung für die Fixierung des Werkstücks auf dem Werkstückträger.

Da die Baugruppe des Stators für alle Arten von Traktionsantrieben prinzipbedingt ähnlich aufgebaut ist, wurde zuerst das Modulkonzept für Statoren umgesetzt (siehe Abbildung 3.17). Bevor dies allerdings mit Hilfe des CAD-Programmes Siemens NX auskonstruiert werden konnte, musste ein passendes Modulkonzept ausgewählt werden. Aufgrund der getroffenen Randbedingungen wurde das Hut-Plattform-Modulkonzept am besten bewertet und für die Konzeptionierung des Werkstückträgers ausgewählt. Nach Albers et al.¹¹ beinhaltet die Plattform hierbei alle Subsysteme, die in unterschiedlichen Systemen wiederholt und unverändert genutzt werden. Der Hut wiederum schließt die verbleibenden Subsysteme ein, die abhängig vom System variieren können. Einzig die Schnittstelle zur Plattform muss bei verschiedenen Hüten gleich sein.

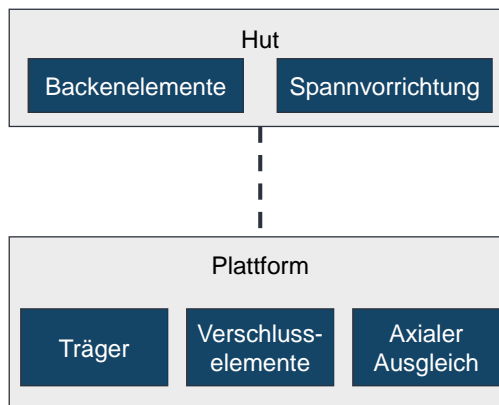


Abbildung 3.16: Vereinfachte schematische Darstellung des gewählten Hut-Plattform-Modulkonzeptes.

In Abbildung 3.16 ist ein schematisches Blockdiagramm des Hut-Plattformkonzeptes graphisch dargestellt. Der Hut stellt ein ringförmiges Element (vgl. Abbildung 3.17) dar, auf dem die Backen- und Spannelemente montiert sind. Er ist mittels Stütz-, Arretier- und Positionierelementen auf der Plattform fixiert. Als Trägerplatte wurde ein in der Industrie etabliertes Transfersystem des Herstellers Bosch Rexroth gewählt. Da einige Prozesse eine Zugänglichkeit von unten an das

¹¹ A. Albers, H. Scherer, N. Bursac, G. Rachenkova, *Model Based Systems Engineering in Construction Kit Development – Two Case Studies*, Procedia CIRP, vol. 36, pp.129-134, 2015.

Werkstück erfordern, ist eine kreisförmige Aussparung in der Trägerplatte vorzusehen. Für verschiedene Baugrößen des Stators oder unterschiedliche Bauteile wie Rotoren, Statoren und Gehäuse werden nur die Komponenten des Huts verändert. Bei kleinen Durchmesseränderungen ist es ausreichend, nur die Backenelemente auf dem Ring durch die Änderung verschiedener Bohrungen zu versetzen oder die Backenelemente zu wechseln. Sollten die Varianten in größeren Abstufungen variieren, kann das Ringelement getauscht werden.

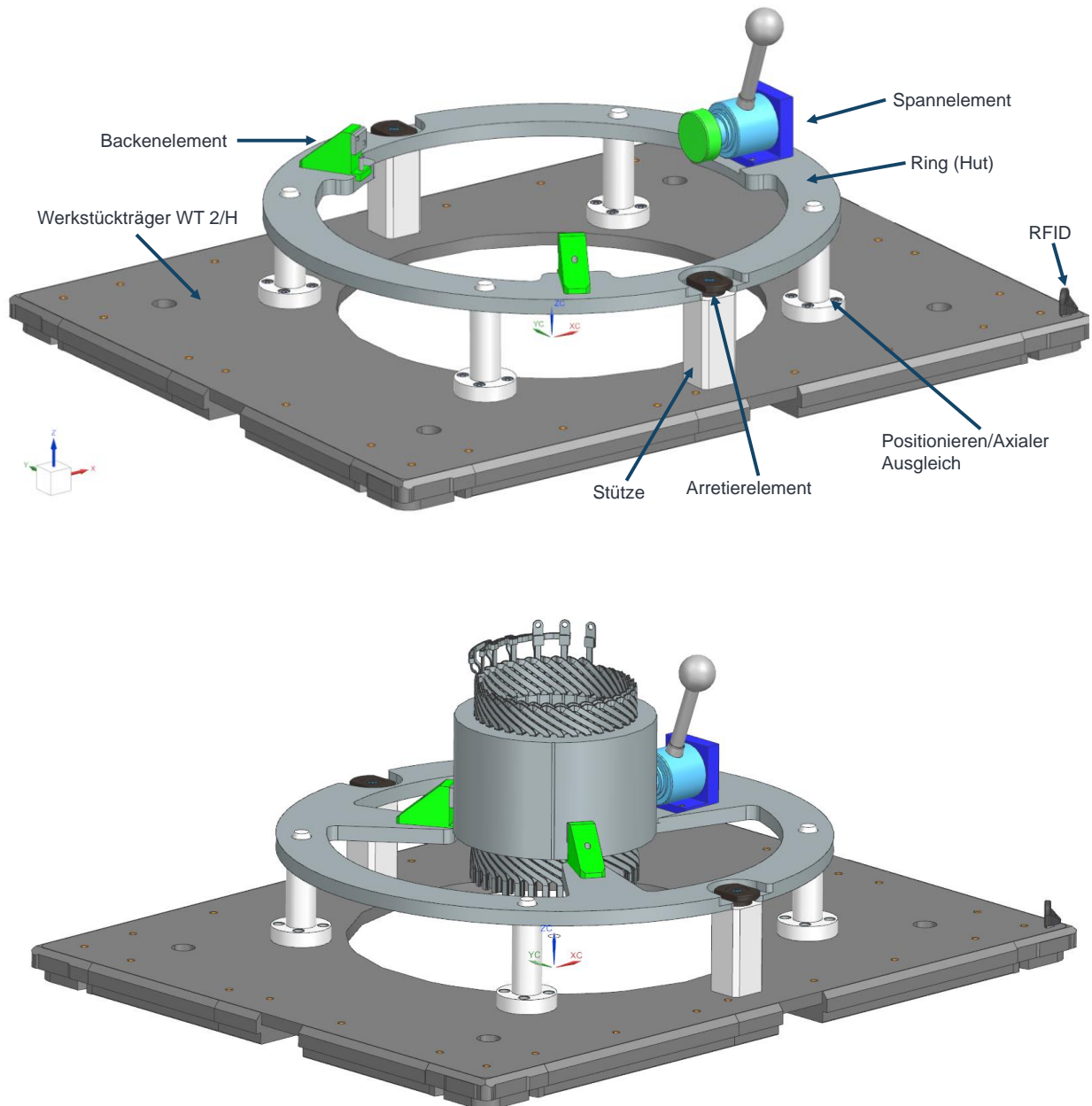


Abbildung 3.17: Version des Werkstückträgersystems ohne (oben) und mit Werkstück (unten). Hut: Backen- und Spannelemente auf ringförmigem Bauteil. Plattform: Trägersystem der Firma Bosch Rexroth mit montierten Stütz-, Arretier- und Positionierelementen.

4 Relevante F + E Ergebnisse von dritter Seite

Forschungsvorhaben E|Real am Lehrstuhl FAPS der FAU Erlangen-Nürnberg

In dem bilateralen Forschungsvorhaben E|Real forscht der Lehrstuhl FAPS der FAU Erlangen-Nürnberg seit Juli 2020 zusammen mit dem KMU SciMo an der Automatisierung der E-Motoren-Fertigung für Luftfahrtsysteme. Der Einsatz von Fertigungsrobotern soll hierbei eine flexible, automatisierte Produktion ermöglichen. Das Vorhaben wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt gefördert. Aufgrund des stark abweichenden Anwendungsfalls sind keine nennenswerten Kontaktpunkte zu AgiloDrive vorhanden.

Forschungsvorhaben AIMFREE des WZL der RWTH Aachen und Fraunhofer IPT

Im Verbundforschungsprojekt AIMFREE wird seit Januar 2020 durch das WZL der RWTH Aachen, das Fraunhofer IPT und industrielle Partner an der Entwicklung eines agilen Montagesystems im Kontext der automobilen Endmontage geforscht. Die Produktion elektrischer Traktionsmotoren wird im Rahmen des Projektes nicht adressiert, weshalb die Erkenntnisse aufgrund abweichender technischer Rahmenbedingungen nicht übertragen werden konnten.

Forschungsvorhaben AnStaHa des wbk Institut für Produktionstechnik am KIT

Durch das KIT/wbk und Gehring wurden im Rahmen des Projektes Maschinen und Prozesse für die Fertigung von Statoren mit Hairpin-Technologie entwickelt. Der Forschungsfokus lag hierbei auf der Technologie- und Prozessentwicklung, weshalb die Ergebnisse zwar nur eingeschränkt übertragen werden konnten, allerdings eine wichtige Vorarbeit zur Entwicklung der angestrebten Variantenflexibilität im Rahmen des Vorhabens AgiloDrive dargestellt haben.

Forschungsvorhaben Elektrische Antriebe des Werner-von-Siemens Centre for Industry and Science

Im Verbundforschungsprojekt wird durch das Fraunhofer IPK, die BAM, die TU Berlin und Industriepartner um die Siemens AG seit Juli 2020 an Ansätzen geforscht, sowohl die elektrische Maschine als auch deren Fertigung durch den Einsatz digitaler Methoden und additiver Fertigungstechnologien neu zu gestalten. Im Gegensatz zum Forschungsvorhaben AgiloDrive werden in diesem Vorhaben Fertigungstechnologien für zukünftige Generationen grundlegend erforscht, die auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Informationen einem TRL von 1–3 zuzuordnen sind; ein Transfer der erarbeiteten Lösungen in die industrielle Anwendung ist daher nur langfristig möglich.

Forschungsvorhaben HaPiPro2 am Lehrstuhl PEM der RWTH Aachen

In dem Verbundforschungsprojekt HaPiPro2 „Produkt- und Produktionskonzepte für die variantenflexible Hairpin-Stator-Produktion“ erarbeiten und erproben das PEM und DAP der RWTH Aachen seit August 2020 gemeinsam mit Industriepartnern Produkt-, Produktions- und Prozesskonzepte für die variantenflexible Produktion von Hairpin-Statoren. Im Gegensatz zum Vorhaben AgiloDrive wird im Projekt HaPiPro2 durch dessen Fokussierung auf die Hairpin-Technologie keine Technologieflexibilität adressiert.

KIPrEMo, KIKoSA und E|KI-Opt am Lehrstuhl FAPS der FAU Erlangen-Nürnberg

Am Lehrstuhl FAPS der FAU Erlangen-Nürnberg wird seit 2020 im Rahmen der drei durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie geförderten Verbundforschungsprojekte KIPrEMo, E|KI-Opt und KIKoSA zusammen mit industriellen

Partnern an Lösungen für die Optimierung von Formgebungs- und Schweißprozessen im Kontext der Hairpin-Technologie bzw. erklärbaren KI-Methoden für die E-Motoren-Produktion geforscht. Eine Modularisierung, Flexibilisierung und Digitalisierung der Prozessketten zur Herstellung elektrischer Traktionsmotoren wird in den Vorhaben jedoch nicht adressiert.

OptiWiRE am Lehrstuhl FAPS der FAU Erlangen-Nürnberg

Im durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Verbundforschungsprojekt OptiWiRE forscht das FAPS gemeinsam mit dem Partner ElringKlinger AG an der Prozesskette der E-Motoren-Produktion. Im Rahmen des Teilvorhabens "Prozessentwicklung beim Rotorbau – Fixierung der Magnete" werden neuartige, recyclingfreundliche Fixierungsstrategien für Magnete in Rotoren entwickelt. Im Teilvorhaben "füllgradoptimierte, automatisierte Statormontage von verteilten Einzugswicklungen" werden das Einziehwickelverfahren sowie vor- und nachgelagerte Prozesse untersucht. Eine ganzheitliche Betrachtung der E-Motoren-Produktion, wie diese im Vorhaben AgiloDrive adressiert wird, ist nicht ersichtlich.

IPANEMA am Lehrstuhl PEM der RWTH Aachen

Das PEM der RWTH Aachen und die API Hard- und Software GmbH entwickeln im bilateralen, durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Forschungsvorhaben IPANEMA seit März 2020 KI-basierte Prüfmethode für die Hairpin-Stator-Produktion. Analog zu den zuvor beschriebenen Projekten des FAPS erfolgt auch hierbei keine Betrachtung der gesamten Prozessketten.

AgiloBat des wbk Institut für Produktionstechnik am KIT

Im Kontext agiler Produktionssysteme ist das durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg geförderte Projekt AgiloBat zu erwähnen, in dem das KIT/wbk und wissenschaftliche Partner seit Januar 2020 die flexible Batteriezellproduktion erforschen. Trotz grundlegend verschiedener Fertigungsprozesse konnten vor dem Hintergrund des gemeinsamen Forschungsziels eines skalierbaren und agilen Produktionssystems Synergieeffekte zwischen den beiden Vorhaben genutzt werden. So ist die in Kapitel 5.2 erwähnte Veröffentlichung auf der CIRP CMS eine gemeinschaftliche Veröffentlichung, die aus den beiden Vorhaben AgiloDrive und AgiloBat gemeinsam hervorgeht.

5 Projektbezogene Veröffentlichungen

Im Rahmen der Transferphase des Forschungsvorhabens ist keine wissenschaftliche Veröffentlichung erfolgt. Aufgrund der thematischen Überschneidung ist daher die im Rahmen der Pilotphase entstandene Veröffentlichung in der Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb aufgeführt. Darüber hinaus sind weitere Veröffentlichungen für das Jahr 2022 geplant, welchen unter anderem die Ergebnisse der Transferphase des Vorhabens AgiloDrive zugrunde liegen. Eine Auflistung der geplanten Veröffentlichungen ist in Kapitel 5.2 hinterlegt.

5.1 Veröffentlichungen im Jahr 2021

- Fleischer, J., Pfund, T., Wirth, F., Fraider, F., Halwas, M., Hausmann, L. & Wößner, W. (2021). Agile Produktion elektrischer Traktionsmotoren als Antwort auf volatile Märkte und Technologien. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 116(3), 128-132, ISSN 0947-0085.

5.2 Geplante Veröffentlichungen im Jahr 2022

- 55th CIRP Conference on Manufacturing Systems: Agile Production Systems for Electric Mobility (Veröffentlichung eingereicht; Konferenz vom 29.06.–01.07.2022)
- EVS35 Symposium: Product production co-design for agile production of electric traction motors (Abstract eingereicht; Konferenz vom 11.06.–15.06.2022)