

Abschlussbericht zur Pilotphase
**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/12
Förderzeitraum: 01.05.2020 – 31.10.2021
Berichtszeitraum: 01.05.2020 – 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	7
3.2	AP 2: Produktionsbaukastenentwicklung	13
3.2.1	Prozesskettenanalyse	13
3.2.2	Erarbeitung von Skalierungs- und Verkettungsstrategien	16
3.2.3	Erarbeitung eines modularen Werkstückträgerkonzepts	17
3.2.4	Aufbau eines flexiblen Handhabungsmoduls	20
4	Relevante F + E Ergebnisse von dritter Seite	22
5	Projektbezogene Veröffentlichungen	24
5.1	Veröffentlichungen im Jahr 2021	24
5.2	Geplante Veröffentlichungen im Jahr 2022	24

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 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.

Vor diesem Hintergrund wurde durch das Institut für Produktentwicklung (IPEK) die integrierte Produktbaukastenentwicklung unter Einbeziehung aktueller und zukünftiger technisch-wirtschaftlicher Restriktionen erforscht. Das Elektrotechnische Institut (ETI) befasste sich darüber hinaus mit der Erarbeitung durchgängiger digitaler Prozessketten für die effiziente elektromagnetische, thermische sowie mechanische Auslegung elektrischer Maschinen. Durch das wbk Institut für Produktionstechnik wurden im Rahmen der Entwicklung eines flexiblen Produktionsbaukastens die Prozessketten zur Herstellung elektrischer Traktionsmotoren analysiert sowie Rahmenbedingungen und Schnittstellen definiert. Darauf basierend konnten Strategien zur Konzeption und Entwicklung eines stückzahl-, varianten- sowie technologieflexiblen Produktionssystems erarbeitet werden.

Die im Verlauf der Pilotphase entwickelten Strategien und gewonnenen Erkenntnisse dienen als Vorarbeiten für eine übergangslose und effektive Aufnahme der Forschungsarbeiten im Kontext der dreijährigen Projektphase AgiloDrive2 – „Agile Produktionssysteme und modulare Produktbaukästen für elektrische Traktionsmotoren“, die seit November 2021 durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert wird. Der Transfer der wissenschaftlichen Ergebnisse aus der Pilot- in die Projektphase war und ist fester Bestandteil der Analysephase sowie zahlreicher Workshops mit den Industriepartnern.

2 Zielsetzungen

Im Rahmen der Pilotphase des Forschungsvorhabens AgiloDrive sollte der grundsätzliche Funktionsnachweis der gewählten Lösungsansätze erbracht werden. Hierbei stand in AP 1 die Entwicklung eines zukunftsrobusten Produktbaukastens im Fokus. Dies umfasst zum einen die szenarienbasierte Analyse aktueller und zukünftiger marktseitiger Anforderungen sowie darauffolgend die Entwicklung der varianten- und technologieübergreifenden Baukastenstruktur. Zum anderen sollte eine zeit- und ressourceneffiziente elektromagnetische, mechanische und thermische Auslegung elektrischer Traktionsmotoren erarbeitet und validiert werden.

Das AP 2 setzte sich die Entwicklung eines stückzahl- und technologieflexiblen Produktionsbaukastens für elektrische Traktionsmotoren zum Ziel. Im Rahmen der Pilotphase sollten hierzu notwendige Prozesse, Schnittstellen und Anforderungen der E-Motoren-Produktion systematisch analysiert werden. Darauf basierend galt es, die Machbarkeit der agilen, sprintbasieren Implementierung durch die Entwicklung von Strategien zur skalierbaren Automation, Verkettung und Anpassung der Produktionskapazitäten nachzuweisen. Darüber hinaus war es Ziel des Vorhabens, bestehende Technologieträger sowie ein Maschinenmodul zur geforderten Variantenflexibilität im Kontext der Produktion von Statorn mit Hairpin-Technologie zu befähigen.

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 Arbeitspaketes (AP) wurden durch das IPEK derzeitige und zukünftige Anforderungen an elektrische Traktionsmotoren erarbeitet. Anschließend wurden die zwischen den bei der Entwicklung elektrischer Traktionsmotoren zu berücksichtigenden Einflussgrößen vorliegenden Wechselwirkungen analysiert und bewertet. Darauf basierend wurden Produktszenarien erstellt und das Referenzsystem „Elektrische Traktionsmotoren“ um mögliche zukünftige Ausprägungen ergänzt und diese ggf. ebenfalls im Baukasten integriert. Abschließend wurde ein Funktionsdemonstrator des Baukastens erstellt, um eine niederschwellige Möglichkeit zur Validierung zu bieten.

Durch das ETI wurde darüber hinaus eine Toolkette zur automatisierten Auslegung elektrischer Traktionsantriebe grundlegend weiterentwickelt. Dabei wurden neue Methoden implementiert, welche den Anwender bei der initialen Auswahl der Maschine unterstützen, sowie weitere Effekte zu einer detaillierteren Auslegung berücksichtigt, wie z. B. Effekte durch die Pulsweitenmodulation. Darüber hinaus wurde die elektromagnetische Toolkette um eine mechanische Berechnung erweitert. Dadurch ist es möglich, den Auslegungsprozess ganzheitlich zu betrachten und interdisziplinär zu verknüpfen.

Arbeitspaket 2: Produktionsbaukasten:

Im Rahmen des AP 2 wurden durch das wbk zunächst die Prozessketten zur Produktion elektrischer Traktionsmotoren analysiert. Darauf basierend konnten Potenziale zur Standardisierung und Modularisierung abgeleitet werden. Darüber hinaus wurden flexible Werkstückträgerkonzepte sowie Skalierungs- und Verkettungsstrategien erarbeitet und ein Demonstrator eines flexiblen Handhabungsmoduls aufgebaut.

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 Pilotphase 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 des AP 1 wurden durch Auswertung von Studien und wissenschaftlichen Veröffentlichungen, welche sich mit der aktuellen und zukünftigen Entwicklung von Fahrzeugen, Fahrzeugantriebssystemen und -märkten befassen, Bedürfnisse an derzeitige und zukünftige

elektrische Traktionsmotoren sowie deren Entwicklung abgeleitet. Folgend sind insbesondere die Herausforderungen in Entwicklung, Auslegung und Produktion aufgeführt:

- Stark steigende Variantenvielfalt, um elektrische Traktionsmotoren für verschiedene Systemarchitekturen, bspw. batterieelektrische Fahrzeuge und Hybrid-Fahrzeuge, bereitzustellen, und daraus resultierende geringere Wirtschaftlichkeit beim Einsatz von starren Fertigungslinien.
- Steigende Produktkomplexität erhöht den Bedarf nach Unterstützung im Entwicklungsprozess.
- Effizienter Einsatz von Produkt-Produktions-Codesign zur Nutzung der Flexibilität des agilen Produktionssystem.

In gemeinsamen Workshops der Projektbeteiligten konnten die Einflussgrößen, welche zur Erfüllung von Funktionen und Anforderungen relevant sind, erarbeitet werden. Durch die Zusammenarbeit mit Fachexperten für die Entwicklung elektrischer Maschinen konnten weiterhin die bei der Auslegung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen zu berücksichtigenden Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Einflussgrößen systematisch analysiert und bewertet werden. Es zeigte sich, dass folgende Einflussgrößen einen sehr großen Effekt auf andere Einflussgrößen ausüben:

- Anzahl der zu produzierenden Motoren,
- Art der Magnetanordnung im Rotor,
- Wicklungstopologie sowie Wicklungsart und -verfahren,
- Polpaarzahl,
- Geometrie des bei der Wicklung verwendeten Drahtes.

Darüber hinaus wurden weitere, überwiegend geometrische Eigenschaften (jeweilige Außen- und Innendurchmesser von Rotor und Stator sowie die Windungszahl der Wicklung) von den Fachexperten als relevant benannt. Die Betrachtungen von Wechselwirkungen bei der technischen Auslegung der elektrischen Traktionsmotoren konnte in Zusammenarbeit mit dem AP 2 und Fachexperten aus Unternehmen darüber hinaus um die Berücksichtigung produktionstechnischer Randbedingungen auf den Auslegungsprozess erweitert werden.

Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse wurde zum einen der Auslegungsprozess dahingehend evaluiert, ob insbesondere Systemhebel, welche einen großen Einfluss auf andere Einflussgrößen ausüben, eine ausreichende und frühzeitige Berücksichtigung finden, sowie zum anderen ein Portfolio konsistenter Produktszenarien, welche mögliche Ausprägungen der elektrischen Traktionsmotoren abbilden, erstellt. Diese Produktszenarien erweitern das vorhandene Referenzsystem „Elektrische Traktionsmotoren“, welches derzeit am Markt befindliche elektrische Traktionsmotoren beinhaltet, um mögliche zukünftige Ausprägungen, welche bei der Konzeptionierung des Produktbaukastens Berücksichtigung finden müssen, um eine Zukunftsrobustheit des Baukastens zu erzielen. Bei der Analyse der derzeit am Markt befindlichen elektrischen Traktionsmotoren kam die Datenbank „a2mac1“¹ zum Einsatz, zu welcher im Rahmen des Projekts ein Zugang für die Projektbeteiligten am KIT angeschafft wurde. Die gebotene Übersicht über eine Vielzahl am Markt befindlicher Elektro- und Hybridfahrzeuge sowie deren Antriebsmaschinen ermöglichte eine sehr umfassende Systemanalyse. Ein Produktbaukasten wird als zukunftsrobust verstanden, wenn die Menge aller technischen Subsysteme, die dem Baukasten-Regelwerk folgen, zu Produkten konfiguriert werden können, welche in möglichst vielen Szenarien die Anforderungen erfüllen. Hieraus wurden weitere Kernpunkte für das Zielsystem des Produktbaukastens abgeleitet: Die Bereitstellung von elektrischen Traktionsmotoren für verschiedene Antriebssystem-Architekturen, die

¹ <https://portal.a2mac1.com/de/home-7/>

Wiederverwendung von Technologien anstelle von Teilen im Baukasten, eine Berücksichtigung geringer Stückzahlen und einer hohen Varianz sowie Produktvielfalt bei gleichzeitiger Ausnutzung der Flexibilität des Produktionssystems.

Bei der Erstellung der Produktszenarien wurden Methoden des Zukunftsmanagements² eingesetzt. Zu Beginn wurden verschiedene Anwendungsszenarien definiert (bspw. Fahrzeugsegmente, Einsatz in batterieelektrischen oder hybrid-elektrischen Antriebssystemen), welche in möglichen Zukunftsszenarien auftreten können. Anschließend wurden erarbeitete Projektionen der jeweiligen Einflussgrößen so zusammengeführt, dass eine konsistente Vorauslegung eines elektrischen Traktionsmotors resultiert, welcher die Anforderungen der jeweils ausgewählten Anwendung erfüllt. Hierdurch konnte das Referenzsystem um Traktionsmotoren für mögliche zukünftige Anwendungen erweitert werden, welche über den derzeitigen Einsatz hinausgehen, um die Zukunftsrobustheit zu erhöhen. Während ein Produkt als zukunftsrobust gilt, wenn in vielen Szenarien (möglichen Zukünften) eine Konsistenz zwischen dem Produkt und dem Szenario besteht, gilt ein Produktbaukasten als zukunftsrobust, wenn in vielen Szenarien eine Konsistenz zwischen aus dem Produktbaukasten ableitbaren Produkten und dem jeweiligen Szenario besteht.

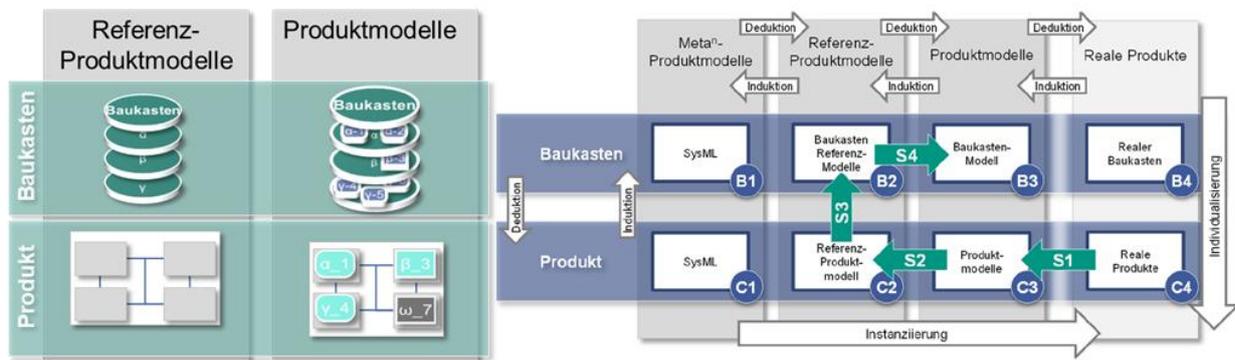


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung von Referenz- und Produktmodell auf den Ebenen Baukasten und Produkt (links); Vorgehen bei der Entwicklung von Baukästen nach Bursac³ (rechts).

Weiterhin wurde in der Pilotphase das Referenzsystem „Produktbaukasten“ erstellt. Hierbei wurde nach dem Produktmodellierungsframework, siehe Abbildung 3.1, vorgegangen. Das Referenzsystem „Produktbaukasten“ umfasst diverse Referenzelemente, beispielsweise Baukästen und deren Regelwerk sowie elektrische Traktionsmotoren, welche derzeit bereits produziert werden. Das Regelwerk eines Baukastens spezifiziert die Architektur der Subsysteme und insbesondere der Schnittstellen, um eine Kompatibilität von Modulen und Subsystemen des Baukastens bei der Produktsynthese zu gewährleisten. Hierbei ist zu beachten, dass sowohl technische Schnittstellen zwischen den Modulen des Produkts (geometrische, stoffliche, energetische und signaltechnische Flüsse) als auch organisatorische Schnittstellen im Systemmodell (Informationsfluss zwischen den Stakeholdern) definiert werden müssen (erfolgt im Rahmen von AgiloDrive2). Weiterhin wurde die System- und Funktionsstruktur elektrischer Traktionsmotoren analysiert und beschrieben, was ebenfalls die Erarbeitung des Regelwerks unterstützte. Die Umsetzung und Operationalisierung des Produktbaukastens im Rahmen von AgiloDrive2 wird mit Methoden des Modellbasierten Systems-Engineering (MBSE)⁴ in der

² A. Fink, A. Siebe, *Szenario-Management: Von strategischem Vorausdenken zu zukunftsrobusten Entscheidungen*, Campus Verlag Frankfurt / New York, 2016.

³ N. Bursac, *Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung*, in: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 93. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2016. ISSN: 1615-8113.

⁴ S. Kleiner, S. Husung, *Model Based Systems Engineering: Prinzipien, Anwendung, Beispiele, Erfahrung und Nutzen aus Praxissicht*, in: Schulze S.-O., Tschirner C., Kaffenberger R. (eds.), *Tag des Systems Engineering*: Herzogenaurach, 25.-27. Oktober 2016, München, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017, p. 13-22.

Software „Enterprise Architect“ in Form eines Systemmodells erfolgen. Um bereits in der Pilotphase erste Validierungsaktivitäten unter Einbeziehung möglicher Anwender durchzuführen, wurde ein Demonstrator des Produktbaukastens in *Microsoft Excel* erstellt, um einen niederschweligen Zugang zu den geplanten Funktionen des finalen Baukastens zu ermöglichen. Dieser Demonstrator ermöglicht die Vorauswahl bzw. eine Einschränkung des Lösungsraums basierend auf ausgewählter Anwendung und übergebenen Anforderungen unter Berücksichtigung der Kompatibilität der Parameter, ohne allerdings Schnittstellen zu den anderen Stakeholdern des Produktentstehungsprozesses zu bieten.

Die im Rahmen der Pilotphase bis zur Konzeptionierung des Baukastens durchgeführten Aktivitäten wurden in ein Vorgehensmodell abstrahiert, um das gesammelte Wissen auch zukünftigen Baukastenentwicklungen zugänglich zu machen und als Basis für das Folgevorhaben zu dienen. Stark abstrahiert umfasst es die in Abbildung 3.2 dargestellten Schritte.

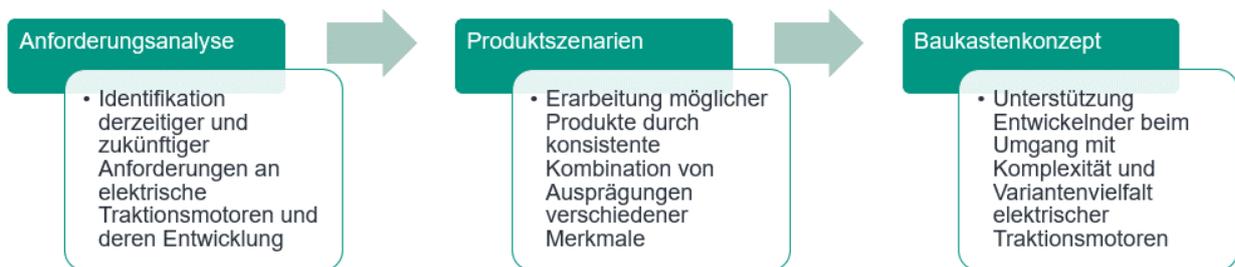


Abbildung 3.2: Abstrahiertes Vorgehensmodell zur Konzeptionierung von Baukasten.

3.1.2 Arbeitsinhalte des ETI

Am Elektrotechnischen Institut (ETI) entstand im Rahmen von Projektarbeiten und Dissertationen eine Toolkette zur elektromagnetischen Auslegung. Diese stellte den Ausgangspunkt für die Pilotphase dar. Die Toolkette ist nah am Stand der Technik orientiert und unterliegt ständiger Weiterentwicklung. Wichtig für eine effiziente Optimierung ist ein hoher Grad an Automatisierung und sinnvolle Verknüpfung der unterschiedlichen Berechnungsmethoden bzw. Auslegungsschritte. Im Rahmen der Pilotphase sollte die bestehende Toolkette um neue Methoden erweitert werden.

Ziel der Pilotphase war es, verschiedene Methoden zur Berechnung und Beurteilung elektrischer Maschinen zu erarbeiten und diese mit vorhandenen Methoden zu einer vollständigen Toolkette zusammenzuführen. Auf Basis dieser prototypischen Toolkette sollten verschiedene Potenziale der automatisierten Maschinenauslegung identifiziert werden.

Dabei wurde eine geeignete Datenstruktur erarbeitet und Schnittstellen zwischen den Methoden implementiert. Dies erlaubt einen hohen Integrationsgrad der Methoden, bei gleichzeitig offenen Schnittstellen für die Implementierung neuer Methoden. Neben der Automatisierung der Toolkette wurden neue Methoden erarbeitet und implementiert.

Im Folgenden werden einige Arbeiten und Ergebnisse detaillierter vorgestellt.

3.1.2.1 Design of Experiments

Im Rahmen der Auslegung elektrischer Maschinen wird zuerst eine initiale Geometrie erstellt, durch Variation der Eingangsparameter wird ein Lösungsraum aufgespannt, in dem die Maschine variiert werden kann. Hier gibt es im Rahmen der statistischen Versuchsplanung verschiedene Möglichkeiten, den Lösungsraum aufzuspannen. Da jede FEM-Simulation Rechenzeit benötigt, ist das Ziel, den Lösungsraum mit möglichst wenigen Variationen genau zu beschreiben. Aufgrund der mit der FEM-Simulation verbundenen Rechenzeit soll das Verhalten der Maschinen im Lösungsraum durch möglichst wenige simulierte Variationen abgebildet werden.

Neben dem sehr rechenintensiven „vollständigen Versuchsplan“ (Full Factorial Design), können weitere Methoden in Betracht gezogen werden. Im Rahmen der Pilotphase wurden erste Untersuchungen mit dem so genannten „Latin Hypercube Sampling“ (LHS) durchgeführt. Dabei wird der Lösungsraum in ein mehrdimensionales Schachbrett unterteilt. Nachdem die Anzahl der Samples festgelegt wurde, werden diese so im Raum verteilt, dass jede Spalte und Zeile mit genau einem Sample befüllt wird. In

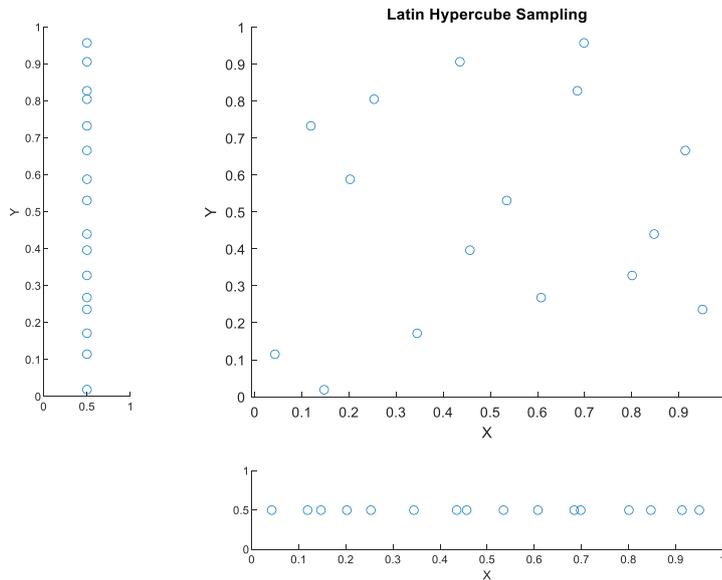
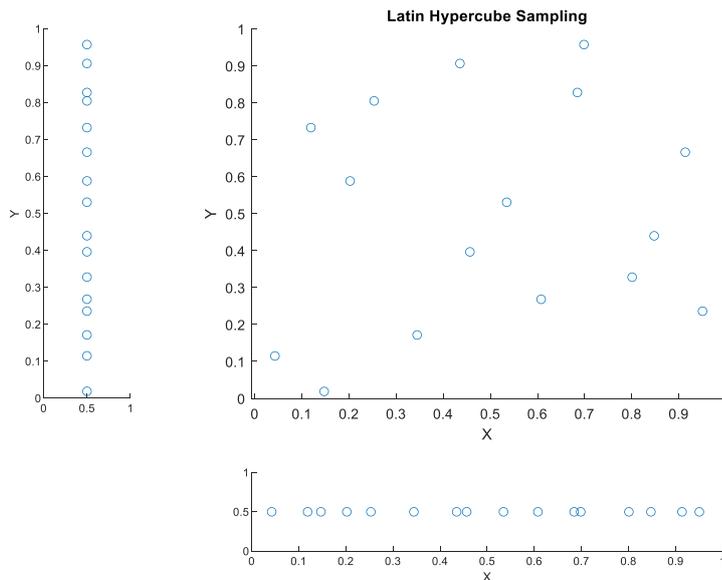


Abbildung 3.3: Visualisierung eines Latin Hypercube Sampling mit 16 Samples⁵

ist ein zweidimensionaler Lösungsraum mit 16 Samples beschrieben, dabei ist der Raum in 16x16 Rechtecke unterteilt. Die Samples werden im Anschluss in diesen Rechtecken verteilt. Dabei ist zu sehen, dass die Samples den Wertebereich der Eingangsparameter X und Y vollständig beschreiben. Im Rahmen der Projektphase werden weitere Methoden untersucht und validiert⁵.



⁵ K. Dalbey, G. Karystinos, *Fast Generation of Space-filling Latin Hypercube Sample Designs*, in 13th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis Optimization Conference, Fort Worth, Texas, 09132010, p. 299.

Abbildung 3.3: Visualisierung eines Latin Hypercube Sampling mit 16 Samples ⁵.

3.1.2.2 Berechnung frequenzabhängige Kupferverluste

Die elektrische Grundfrequenz von Traktionsantrieben kann bei Maximaldrehzahl je nach Auslegung des Antriebssystems über ein Kilohertz betragen. Bei diesen hohen Frequenzen müssen neben den DC-Kupferverlusten auch frequenzabhängige AC-Kupferverluste berücksichtigt werden. Insbesondere bei Wicklungstopologien mit großen Leiterquerschnitten sind die AC-Kupferverluste von großer Bedeutung und haben einen bedeutenden Einfluss auf den Wirkungsgrad der elektrischen Maschine.

Hervorgerufen werden die zusätzlichen Verluste in der Wicklung durch Stromverdrängungseffekte. Diese lassen sich primär auf das Streufeld in der Nut zurückführen. Das Nutstrefeld nimmt vom Nutgrund hin zur Nutöffnung zu und führt insbesondere so bei den Leitern an der Nutöffnung zu einer inhomogenen Stromdichte und somit zu zusätzlichen Kupferverlusten.

Kommt eine Wicklung mit parallelgeschalteten Leitern zum Einsatz, muss hierbei auch die leiterpositionsabhängige induzierte Spannung der einzelnen Leiter berücksichtigt werden. Bei einer ungeschickten Verteilung der parallelen Leiter können sonst zusätzlich Verluste durch Kreisströme entstehen.

Umgekehrt ausgedrückt hat die inhomogene Verteilung der Stromdichte einen Einfluss auf den effektiven Widerstandsbelag und somit die Impedanz der Leiter. Mit steigender Frequenz und steigendem Nutstrefeld nimmt der effektive Widerstand der Leitung zu und die ohmschen Verluste steigen.

In der Abbildung 3.4 ist für eine exemplarische Maschine mit konzentrierter Wicklung ein FE-Einzelleitermodell der Phase U erstellt worden. Die Stromdichte (siehe Abbildung 3.5) der Leiter in der Nähe der Nutöffnung zeigt eine deutliche Inhomogenität. Eine realitätsnahe Beschreibung der AC-Kupferverluste erfordert somit die Ermittlung der zusätzlichen Verluste über dem Betriebskennfeld der Maschine.

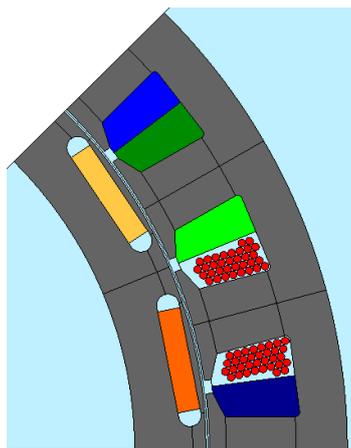


Abbildung 3.4: Diskrete Leiterpositionierung einer konzentrierten Runddrahtwicklung in der Nut.

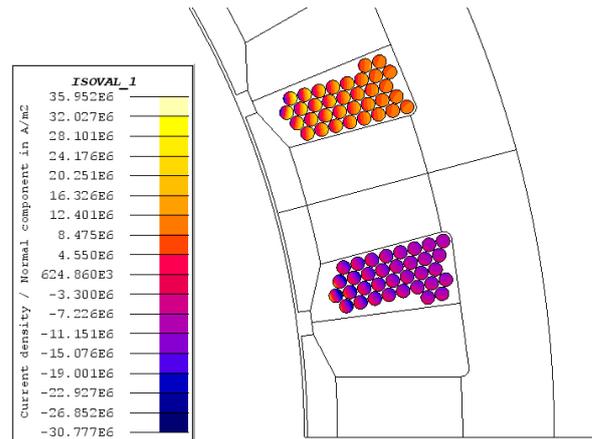


Abbildung 3.5: Visualisierung der Stromverdrängung in den Leitern.

In der Toolkette wurden zur Ermittlung der AC-Kupferverluste zwei Berechnungsmethoden hinterlegt. Zum einen die exakte Berechnung der Verluste in einem FE-Einzelleitermodell und zum anderen ein hybrider Ansatz, bei dem die Flussdichte innerhalb der Nuten für die Approximation der AC-Kupferverluste herangezogen wird.

Voraussetzung für beide Methoden ist die genaue Positionierung der einzelnen Leiter in der Nut. Diese ist abhängig von der Wicklungstopologie und der Form der Leiter. Umgesetzt wurden die typischen Wicklungsarten für elektrische Maschinen:

- Verteilte Wicklung mit Runddrähten,
- Verteilte Wicklung mit Rechteckleitern (Hairpin/Wellenwicklung),
- Konzentrierte Wicklung mit Runddrähten,
- Konzentrierte Wicklung mit Flachdrähten.

Mit Kenntnis der exakten Leiterpositionen konnte ein exaktes Einzelleitermodell der Maschine aufgebaut und für beliebige Arbeitspunkte ausgewertet werden. Diese Methode liefert die exakten frequenzabhängigen Kupferverluste der Maschine, erfordert aber ein komplexeres Modell und somit eine längere Rechenzeit.

Der hybride Ansatz greift auf die Flussdichte in der Nut zurück und kann ohne weitere FE-Berechnungen angewendet werden. Abhängig von der Flussdichte innerhalb eines Leiters können so mittels analytischer Gleichungen die zusätzlichen frequenzabhängigen Verluste ermittelt werden.

3.1.2.3 Pulsweiten Modulation (PWM) der eingprägten Spannung

Im Bereich der Traktionsantriebe ist die Verwendung von Umrichtern zum Betrieb elektrischer Maschinen nötig, um die je nach Fahrzustand benötigten Arbeitspunkte effizient ansteuern zu können. Ein damit einhergehender Nachteil ist die nicht mehr ideal sinusförmige Spannung an den Ausgangsklemmen. Ein konventioneller 2-Level-Umrichter stellt je Phase zwei Spannungen ($+\frac{U_{zk}}{2}$ und $-\frac{U_{zk}}{2}$) für den Betrieb der elektrischen Maschine zur Verfügung. Dabei taktet dieser mit mehreren Kilohertz, um den gewünschten Spannungsverlauf näherungsweise darzustellen. Je nach verwendetem Modulationsverfahren ergeben sich unterschiedliche Verläufe an den Klemmen des Umrichters. In Abbildung 3.6 ist die wirksame Spannung an der Maschine und der daraus resultierende Strom dargestellt. In Abbildung 3.7 sind die Soll- und Ist-Ströme abgebildet, wobei in den Ist-Strömen Oberwellen zu erkennen sind. Diese verursachen zusätzliche frequenzabhängige Verluste in der Maschine. Zu den zusätzlichen Verlusten zählen:

- Eisenverluste in Stator und Rotor
- Kupferverluste im Stator
- Magnetverluste im Rotor

Diese Verluste können berechnet werden, siehe z. B. Kapitel 0, jedoch wird dabei bislang der zusätzliche Einfluss der PWM nicht berücksichtigt. Hierzu muss der reale Stromverlauf berechnet und daraus die Kennfelder der Maschine abgeleitet werden.

Zur Berechnung des Einflusses durch die PWM werden zuerst die winkelabhängigen Kennfelder der Maschine mit den ideal sinusförmigen Strömen berechnet. Im Anschluss werden daraus mit den charakteristischen Differentialgleichungen der Maschine die benötigten Sollspannungen bestimmt. Aus den Sollspannungen können mit den Parametern des Umrichters die Ist-Ströme der Maschine berechnet werden. Mit diesen können schließlich die FEM-Simulationen erneut durchgeführt und die Verluste in Abhängigkeit des Stromes berechnet werden. Dies ermöglicht es, bei der Auslegung der Maschine auch die Regelung zu berücksichtigen, sodass das Gesamtsystem aus elektrischer Maschine und zugehörigem Umrichter optimiert werden kann.

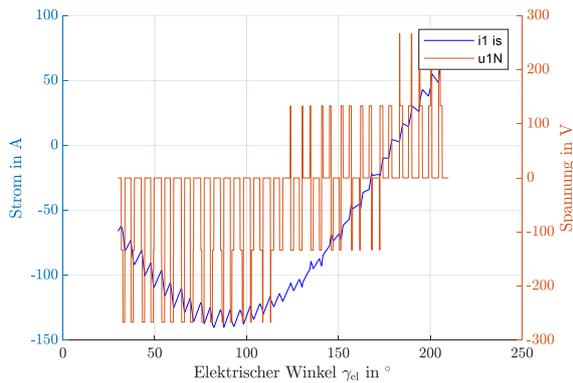


Abbildung 3.6: Spannungsverlauf und resultierender Strom bei der PWM.

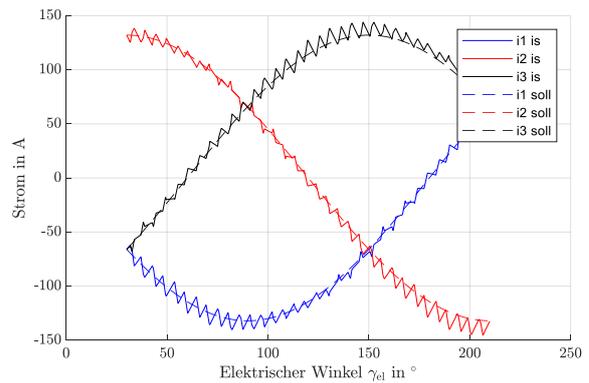


Abbildung 3.7: Ist- und Sollströme bei der PWM.

3.1.2.4 Berechnung von Zykluswirkungsgraden

Im Rahmen der Entwicklung neuer Traktionsantriebe werden diese u. a. einer Optimierung des Wirkungsgrades unterzogen. Jedoch sind für den Einsatz als Fahrzeugantrieb nicht das gesamte Wirkungsgradkennfeld bzw. der maximale Wirkungsgrad der Maschine von Bedeutung. Im Rahmen der Pilotphase wurde daher eine Methode implementiert, welche einen gegebenen, beliebigen Fahrzyklus (z. B. WLPT) analysiert und anhand eines beispielhaften Fahrzeugs Drehmomente und Drehzahlen für die elektrische Traktionsmaschine berechnet. In diesen Punkten wird anschließend der Wirkungsgrad berechnet und mit der Häufigkeit gewichtet addiert. Darauf basierend kann im Auslegungsprozess eine Zielfunktion implementiert werden, welche eine wirkungsgradoptimale Maschine anstrebt. Der Vorteil hierbei ist, dass hierdurch das Wirkungsgradkennfeld in den relevanten Betriebspunkten automatisiert optimiert wird und nicht der maximale Wirkungsgrad, welcher unter Umständen für die spätere Anwendung eine untergeordnete Relevanz aufweist.

Zur Berechnung des Zykluswirkungsgrades wird zuerst ein gewünschter Fahrzyklus und ein gewünschtes Fahrzeug parametrisiert. Aus dem Geschwindigkeitsprofil des Zyklus werden im ersten Schritt die Beschleunigungen berechnet. Aus der Fahrzeugmasse, den Widerstandsbeiwerten des Fahrzeugs sowie den Beschleunigungen werden im Anschluss die Drehzahlen und Drehmomente berechnet. Diese werden nach Häufigkeit sortiert und so die wichtigsten Arbeitspunkte der Maschine ausgewählt. Folgend kann aus den Ergebnissen der FEM Berechnung der Wirkungsgrad für die relevanten Arbeitspunkte berechnet werden. In Abbildung 3.8 wurden die Drehmomente und Drehzahlen für den WLTP am exemplarischen Beispiel eines VW ID3 bestimmt und in einem Diagramm aufgetragen. Die roten Kreise markieren die acht häufigsten Arbeitspunkte der elektrischen Maschine.

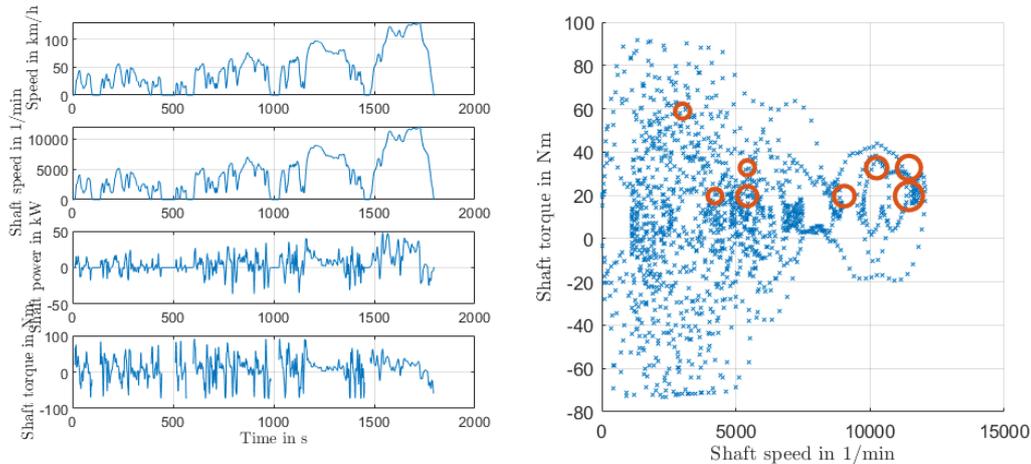


Abbildung 3.8: Analyse Fahrzyklus und Markierung der häufigsten Arbeitspunkte im Betrieb.

3.1.2.5 Mechanische Toolkette

Neben der elektromagnetischen Auslegung der elektrischen Maschine muss für eine ganzheitliche Betrachtung des Systems ebenfalls die mechanische Eignung überprüft werden. Im Vergleich zum Stand der Technik, bei dem die elektromagnetische und mechanische Auslegung getrennt bzw. nacheinander durchgeführt werden, wurden in diesem Zusammenhang die magnetische und mechanische Toolkette eng miteinander gekoppelt, sodass diese parallel durchgeführt werden können. Dies ermöglicht es, Erkenntnisse aus beiden Berechnungen direkt für beide Auslegungen zu nutzen. Hierdurch lassen sich bereits in einem frühen Stadium der Auslegung die Parameterräume begrenzen und die Anzahl an Berechnungen insgesamt reduzieren.

Bei der mechanischen Berechnung werden die Spannungen im Rotor aufgrund der Rotation bei Maximaldrehzahl berechnet. Daraus werden minimale Abstände und Stegbreiten berechnet, welche für eine Begrenzung der Parameter benötigt werden. In der Regel müssen für ein gutes magnetisches Verhalten Stegbreiten möglichst klein sein, jedoch für eine geringe mechanische Belastung möglichst groß. Daraus resultieren gegenläufige Optimierungsziele, welche nicht unabhängig voneinander gelöst werden können.

Für die Berechnung wurde im Rahmen des Vorhabens Altair-Hyperworks verwendet. Die Softwareumgebung erlaubt die Programmierung und Steuerung der Berechnungen über die Skript-Sprache TCL. In Kombination mit der magnetischen Toolkette wird die auftretende Spannung, unabhängig von der verwendeten Rotorgeometrie, automatisiert berechnet und ausgewertet, ohne dass Benutzereingriffe nötig sind. Die Berechnung selbst orientiert sich am Stand der Technik, ist jedoch modular und offen gestaltet, sodass diese weiterentwickelt werden kann.

Durch die direkte Einbindung der mechanischen Toolkette in den Auslegungsprozess steht für die mechanische Berechnung kein detailliert ausgestalteter Rotor zu Verfügung, da für die magnetische Berechnung eine vereinfachte Geometrie ausreichend ist. So sind die Magnete in der Regel noch nicht exakt im Rotor positioniert. Im Gegensatz hierzu werden die Magnete sowie die Vergussmasse für die mechanische Berechnung vollständig definiert. Weiter bestehen die Taschen der Magnete meist aus einfachen Geometrien und es wird auf Rundungen verzichtet. Dies ergibt Ecken und scharfe Kanten, welche zu mechanischen Spannungsüberhöhungen führen. Diese müssen identifiziert werden und dürfen das Ergebnis nicht verfälschen, da sonst ggf. geeignete Maschinen ausgeschlossen und verworfen werden.

Die magnetische Simulation basiert auf einer parametrischen Beschreibung der zu optimierenden Geometrie. Die charakteristischen Parameter werden im Ergebnis-Array der magnetischen

Berechnung gespeichert und stehen für die mechanische Berechnung zur Verfügung. Damit können das TCL-Skript automatisiert parametrisiert und das mechanische Simulationsmodell aufgebaut werden. Dies erlaubt es, die Modellbildungszeit deutlich zu verringern und den Simulations- und damit den eigentlichen Optimierungsprozess zu beschleunigen.

Ausgangspunkt der Modellierung ist ein CAD-Modell des Rotors im step-Format. Diese wird eingelesen und nachfolgend das parametrisierte TCL-Skript ausgeführt. Dabei werden die einzelnen Komponenten (Blechpakete, Magnete, Harz) automatisiert zugeordnet, das Netz wird erstellt und der Lastfall sowie die Randbedingungen werden definiert. Weiter werden die Kanten der Komponenten detektiert und die Kontakte definiert. Bei Bedarf können die Materialparameter bzw. das verwendete Materialmodell weiter angepasst werden. Berechnet werden der Spannungs- und Dehnungstensor, aus welchen nachfolgend die *von Mises'sche Vergleichsspannung* abgeleitet wird.

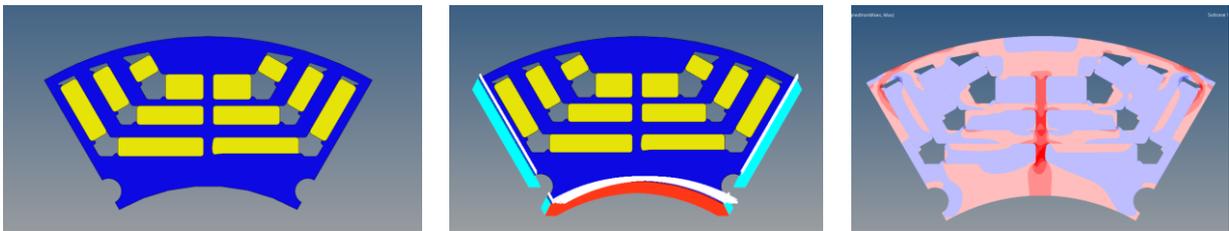


Abbildung 3.9: Darstellung des Ablaufs der mechanischen Berechnung, vom Ausgangsmodell bis zum Ergebnis.

3.2 AP 2: Produktionsbaukastenentwicklung

3.2.1 Prozesskettenanalyse

Als grundlegende Vorarbeit der späteren Arbeitsinhalte des Vorhabens wurden zu Beginn die Prozessketten zur Produktion elektrischer Traktionsmotoren systematisch analysiert. Hierzu mussten zunächst die notwendigen Prozessschritte zur Stator- und Rotorproduktion erarbeitet und die Grenzen des nachfolgend betrachteten Systems definiert werden. In diesem Stadium der Arbeiten wurde sowohl die Produktion von Rotoren fremderregter (FSM) als auch permanenterregter (PSM) Synchronmaschinen berücksichtigt. Bei den Prozessketten zur Statorproduktion wurden neben der Nutzung von Flachdrähten (Hairpin-Technologie und Wellenwicklung) auch Runddrahtwicklungen (Einzelzahnwicklung, Einziehtechnik, Polketten) betrachtet. Das Ergebnis dieser ersten Analyse ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Grau eingefärbte Prozessschritte stellen die Systemgrenzen dar und wurden im Folgenden nicht näher analysiert.

Für jeden der grün gefärbten Prozessschritte wurde anschließend eine detaillierte Prozesskettenanalyse in Anlehnung an die etablierte VDI 2860 durchgeführt. Diese stellt Symbole zur lösungsneutralen Beschreibung von Handhabungs- und Fertigungsprozessen zur Verfügung. Die Ergebnisse dienten sowohl als Diskussionsgrundlage für die institutsinterne Prozessanalyse als auch für die Durchführung von Workshops zur Erarbeitung eines gemeinsamen Prozessverständnisses unter Beteiligung des wbk, Gehring sowie Schaeffler. Die Prozesskettenanalyse nach VDI 2860 ist exemplarisch für die Magnetfixierung durch Kleben in Abbildung 3.11 dargestellt.

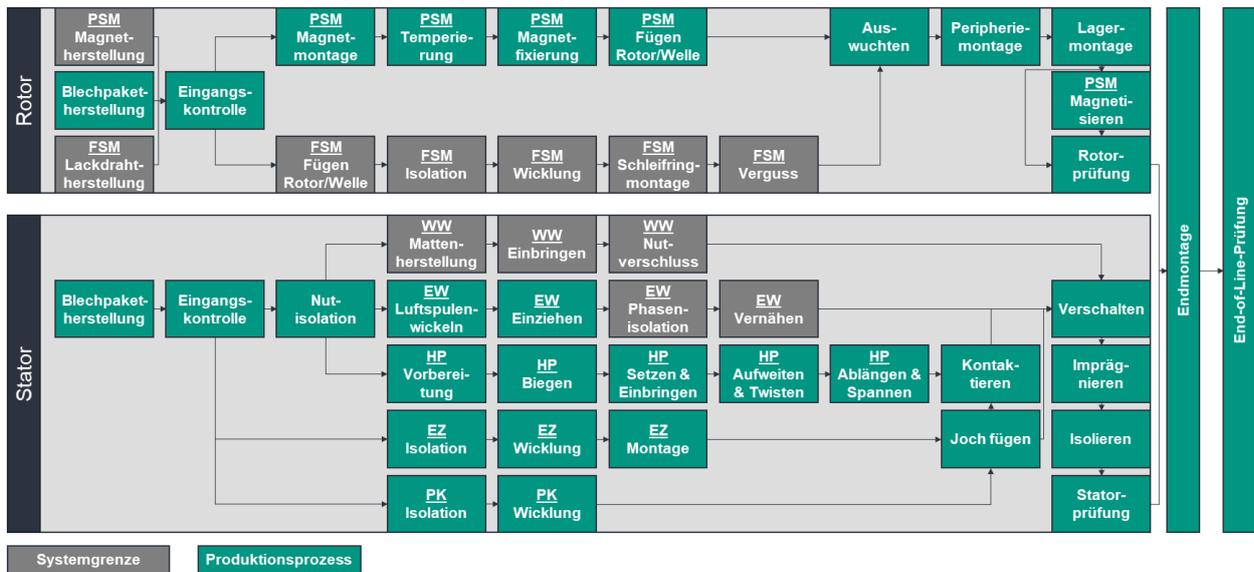


Abbildung 3.10: Prozessketten der Stator- und Rotorproduktion elektrischer Traktionsmotoren.

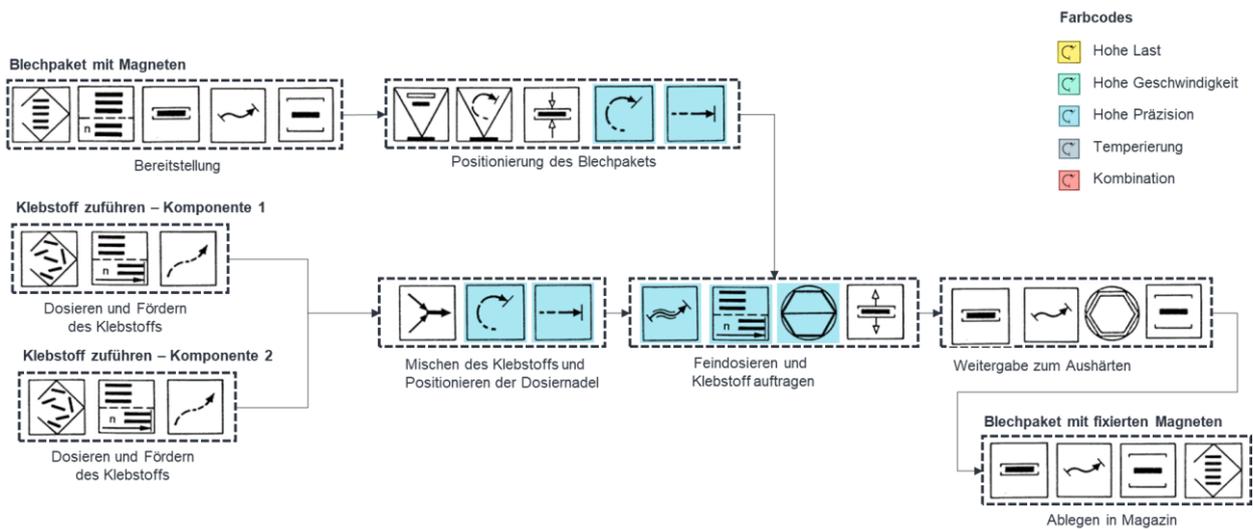


Abbildung 3.11: Prozesskettenanalyse nach VDI 2860 am Beispiel der Magnetfixierung durch Kleben.

Die Operationen aller Prozessschritte wurden in einer Tabelle zusammengetragen und anschließend die Anzahl der zur Produktion von PSM-Rotoren sowie Statoren mit Hairpin- und Einzelzahn-Wicklung notwendigen Handhabungs- und Fertigungsoperationen erfasst. Ein Vergleich der Produktion eines elektrischen Traktionsmotors mit Hairpin-Technologie und eines Motors mit Einzelzahnspulen ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Die größere Anzahl von Handhabungsoperationen bei der Produktion von Statoren mit Hairpin-Technologie gegenüber Statoren mit Einzelzahnspulen spiegelt sich in deren großem Automatisierungspotenzial und einem deterministischen Produktionsprozess wider. Diese Ergebnisse motivierten nicht zuletzt den Aufbau des in Kapitel 0 beschriebenen Demonstrators eines flexiblen Handhabungsmoduls zur skalierbaren Automation von Handhabungs- und Montageprozessen sowie dem Arbeitspaket „Kollaborative Montagetechnik“ im Kontext der Projektphase AgiloDrive2.

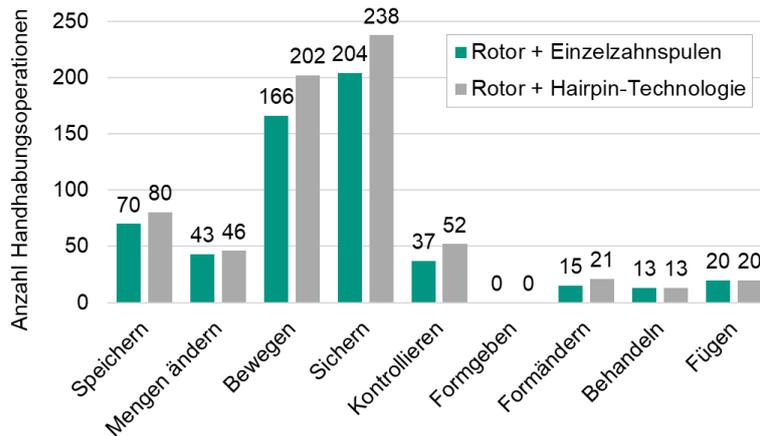


Abbildung 3.12: Vergleich der benötigten Handhabungs- und Fertigungsoperationen zur Produktion eines elektrischen Traktionsmotors mit Einzelzahnspulen und mit Hairpin-Technologie.

Um im späteren Projektverlauf und bei der Konkretisierung der Maschinenkonzepte Modularisierungs- und Standardisierungspotenziale aufdecken und nutzen zu können, wurden im Anschluss an die Prozesskettenanalyse nach VDI 2860 Cluster gebildet, in denen Prozesse gleicher oder ähnlicher Art enthalten sind. Auf diese Art konnten die für eine Standardisierung der Betriebsausrüstung erfolgversprechendsten Cluster „Temperieren“, „Fügen“ und „Isolation“ gefunden werden. Anschließend wurden Prozessanforderungen des jeweiligen Clusters definiert, anhand derer die Ähnlichkeit der Prozesse bewertet werden kann. Typische Prozessanforderungen sind beispielweise Temperaturen, Temperaturverläufe, Geschwindigkeiten, Prozesszeiten oder Kräfte, die für den Prozessschritt benötigt werden. Nach Definition der Anforderungen wurden diese für jeden Prozessschritt der drei Cluster quantifiziert.

Abbildung 3.13 zeigt exemplarisch das Ergebnis der Arbeiten für das Cluster „Temperieren“. Eine Temperierung ist für mehrere thermische Aufheiz- und Aushärtprozesse an verschiedenen Stellen der Rotor- und Statorproduktion notwendig (Abbildung 3.13 (links)). Auch hier sind Prozesse außerhalb der Systemgrenzen grau dargestellt. Wesentliche Prozessanforderungen sind Zieltemperatur, Temperaturprofil, Prozesszeit, Bauteilgewicht und -abmessung, aufzuheizendes Volumen und die Werkstückbewegung im Prozess. Abbildung 3.13 (rechts) zeigt exemplarisch das minimale und maximale Bauteilgewicht, das bei den Prozessschritten des Clusters auftreten kann. Hier kann deutlich erkannt werden, dass die Prozessanforderungen auch innerhalb eines Clusters stark variieren können, was bei der späteren Konzeption der Funktionseinheiten beachtet werden muss.

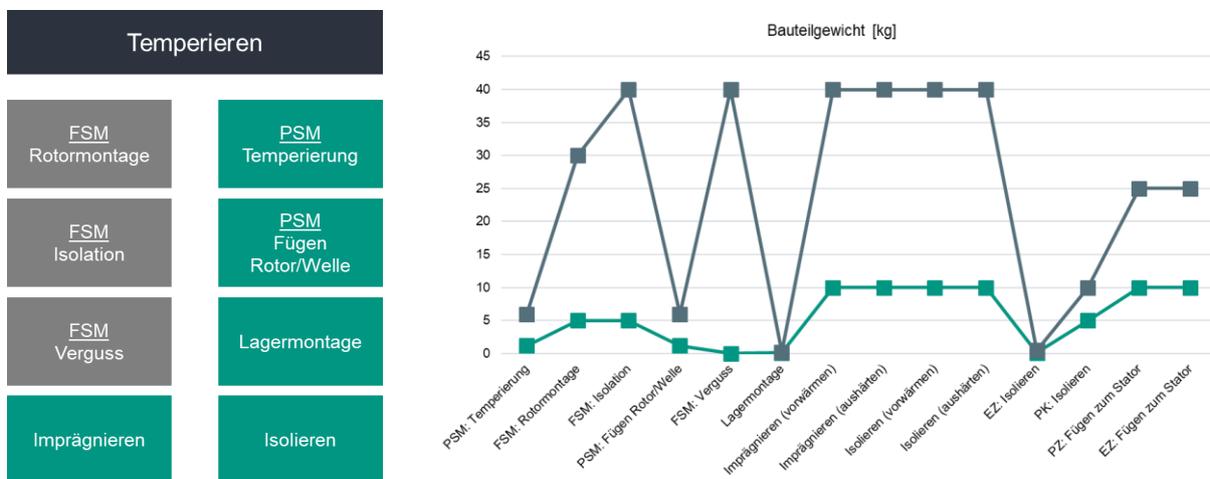


Abbildung 3.13: Prozesse im Cluster „Temperieren“ (links) und auftretende minimale und maximale Bauteilgewichte bei den Prozessen des Clusters „Temperieren“ (rechts).

3.2.2 Erarbeitung von Skalierungs- und Verkettungsstrategien

Im Rahmen der Pilotphase wurden verschiedene softwareseitige Ansätze zur Untersuchung der Skalierbarkeit der E-Motoren-Produktion verfolgt. Hierbei wurde vor allem die Frage näher untersucht, wie sich verschiedene Layouts des Produktionssystems – im Sinne einer unterschiedlichen Anzahl von Funktionseinheiten – und eine steigende Automation auf die erzielbare Stückzahl auswirken. Eine Funktionseinheit stellt hierbei ein oder mehrere eigenständig funktionsfähige(s) Maschinenmodul(e) zur Erfüllung des entsprechenden Prozessschrittes dar und kann auch weitere Prozessmodule enthalten.

Zunächst wurde auf Basis der in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Prozesskettenanalyse mit Hilfe der Softwareumgebung Microsoft Excel ein Tool entwickelt, das – in Anlehnung an eine Wertstromanalyse – eine initiale Abschätzung der benötigten Anzahl von Funktionseinheiten in Abhängigkeit einer gewünschten Stückzahl zulässt. Dieses Tool liegt sowohl für Rotoren permanenterregter Synchronmaschinen als auch Statoren mit Hairpin-Technologie vor. Es bietet zunächst die Möglichkeit, allgemeine Werte bzw. Vorgaben in ein Tabellenblatt einzutragen, bspw. die Anzahl zu fertigender Motoren, Arbeitstage pro Jahr, die Anzahl an Einzelstacks pro Blechpaket oder die Anzahl an Nuten und Hairpins. Darüber hinaus wird für jeden Prozess der Prozesskette ein Tabellenblatt angelegt, in dem Prozessdaten wie die Prozesszeiten bei manueller oder automatisierter Bearbeitung eingetragen werden können. Aus diesen Angaben errechnet sich ein stückzahlspezifischer, initialer Bedarf an Funktionseinheiten, der entsprechend Abbildung 3.14 angezeigt wird. Zudem kann, wie in Abbildung 3.15 dargestellt, die Betriebsart der einzelnen Arbeitsschritte jedes Prozesses von manuell zu automatisiert gewechselt werden, was in einer kürzeren Bearbeitungszeit resultiert. Zusätzlich kann die Anzahl an Arbeitsschichten verändert werden. Im abgebildeten Beispiel der geometrischen (Eingangs-)prüfung von Blechpaketen sind die Arbeitsschritte „Werkstückträger mit Blechpaket freigeben“ und „Werkstückträger mit Blechpaket weiterleiten“ exemplarisch als automatisierter Betrieb ausgewählt.

Prozess	Anzahl Anlagen	Anlagenauslastung
Prüfung_geometrisch	3	74%
Magnetmontage	2	76%
Transfermolding	1	78%
Querpressverband	2	72%
Wuchten	1	66%
Peripheriemontage	1	50%
Lagermontage	1	39%
Magnetisieren	1	28%
EoL	1	30%

Abbildung 3.14: Ergebnis der Berechnung der benötigten Anzahl an Funktionseinheiten (hier: Anlagen) für eine definierte Stückzahl zu produzierender Rotoren.

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

Abbildung 3.15: Auswahl der Betriebsart für den Prozess „Geometrische Prüfung“ sowie der Arbeitsschichten der Funktionseinheit.

Trotz vorhandener Unsicherheiten bei der Abschätzung von Prozesszeiten zeigt die initiale Abschätzung, dass die geometrische Prüfung und die Magnetmontage früh einer hohen Auslastung unterliegen. Unter anderem begründet sich hieraus die Erarbeitung, Konstruktion und Implementierung des in Kapitel 0 beschriebenen flexiblen Handhabungsmodul zur skalierbaren Automatisierung von Handhabungs- und Montageaufgaben. Mit Hilfe des beschriebenen Tools kann zukünftig eine erste Abschätzung getroffen werden, wie sich eine Erhöhung der Stückzahlen auf das Layout der E-Motoren-Produktion auswirkt. Darüber hinaus kann es bei der Entscheidungsfindung helfen, ob zur Erhöhung der Produktivität weitere Funktionseinheiten benötigt werden oder eine Automatisierung und somit Beschleunigung bestimmter Prozesse ausreicht, um die gewünschte Stückzahl zu erzielen.

Zur tiefer gehenden Untersuchung des Produktionssystems wurde parallel zur Entwicklung des Excel-Tools ein Modell der Rotorproduktion in der Simulationsumgebung Tecnomatix Plant Simulation implementiert. Während dessen grundsätzliche Struktur der Implementierung in Excel entspricht, bietet Plant Simulation die Möglichkeit, weitere Aspekte wie Rüstzeiten, Störungen der Maschine, verschiedene Varianten und Losgrößen, Werker aber auch Transportwege zwischen den Anlagen zu betrachten. Das Simulationsmodell zur Abschätzung der erreichbaren Stückzahl mit verschiedenen Produktionslayouts ist in Abbildung 3.16 dargestellt. Mit Hilfe der grünen bzw. roten Auswahlflächen kann eine Funktionseinheit aktiviert oder deaktiviert, also dem Produktionssystem hinzugefügt oder entnommen werden. Nachdem die initiale Abschätzung durch das Excel-Tool erfolgt, kann das Simulationsmodell bei einer präziseren Prognose unter Rücksichtnahme weiterer Parameter unterstützen.

Eine Betrachtung des Verkettungs- und Transportsystems der Rotorproduktion wurde im Rahmen der Transferphase ebenfalls mit Hilfe von Plant Simulation durchgeführt. Die Inhalte werden im entsprechenden Abschlussbericht vorgestellt.

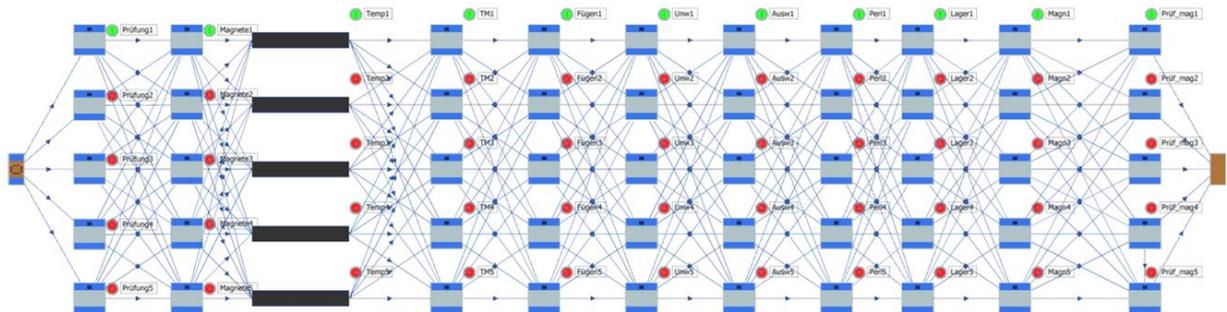


Abbildung 3.16: Simulationsmodell zur erweiterten Abschätzung der produzierbaren Stückzahl für verschiedene Layouts des Produktionssystems.

3.2.3 Erarbeitung eines modularen Werkstückträgerkonzepts

Eine flexible Verkettung erfordert auch ein flexibles Werkstückträgerkonzept, mit dessen Hilfe eine möglichst große Werkstückvielfalt transportiert und fixiert werden kann. Zur Erarbeitung eines solchen Werkstückträgerkonzepts wurden im Rahmen der Pilotphase zunächst die Anforderungen analysiert. Hierbei wurden zu transportierende Werkstücke – bspw. Rotorwellen, Blechpakete oder Lager – gesammelt und zur späteren lösungsneutralen Beschreibung eines Werkstückträgers zunächst im Kontext der E-Motoren-Produktion relevanten Geometrieprimitiven zugeordnet. Das Ergebnis dieser ersten Analyse ist in Abbildung 3.17 dargestellt. Zur sinnvollen Gruppierung aller relevanten Werkstücke reichen die Geometrieprimitive „Quader“ und „Zylinder“ sowie die Kombinationen „Rotationskörper und Polyeder“ und „Mehrstufige Rotationskörper“ aus.

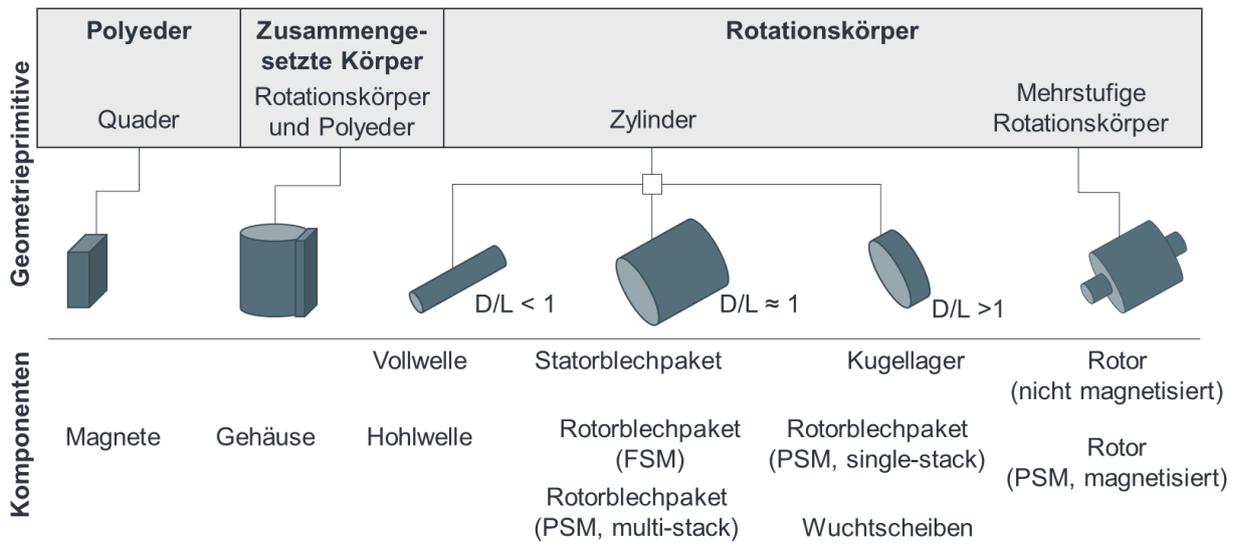


Abbildung 3.17: Einordnung der in der E-Motoren-Produktion auftretenden Werkstücke in Geometrieprimitive.

Der modular gestaltete Grundaufbau des Werkstückträgers (WT) ist in Abbildung 3.18 dargestellt. Auf unterster Ebene befindet sich ein Transportmittel. Das hier dargestellte fahrerlose Transportsystem (FTS) soll bei Bedarf auch gegen weitere Transportmittel wie bspw. Handwagen ausgetauscht werden können. Auf dem Transportmittel ist eine Grundplatte des Werkstückträgers befestigt, gefolgt von einem weiteren Aufsatz, der letztendlich das Werkstück fasst und fixiert. Basierend auf dieser schematischen Darstellung konnten zunächst notwendige zu erarbeitende Teilfunktionen des Werkstückträgers definiert werden – die Positionierung, Orientierung und Fixierung der WT-Grundplatte auf dem Transportmittel (FTS), die Positionierung, Orientierung und Fixierung des WT-Aufsatzes auf der WT-Grundplatte, die Gestalt des WT-Aufsatzes zur Fixierung des Werkstücks sowie die Integration von Herstellungsprozessen in den Werkstückträger und die Erfüllung sicherheitstechnischer Vorschriften. Anschließend wurden Wirkprinzipien und Konzepte für die beschriebenen Funktionen erarbeitet und in einem morphologischen Kasten gesammelt (siehe Abbildung 3.19).

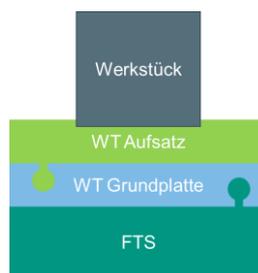


Abbildung 3.18: Schematischer Aufbau des Werkstückträgerkonzepts.

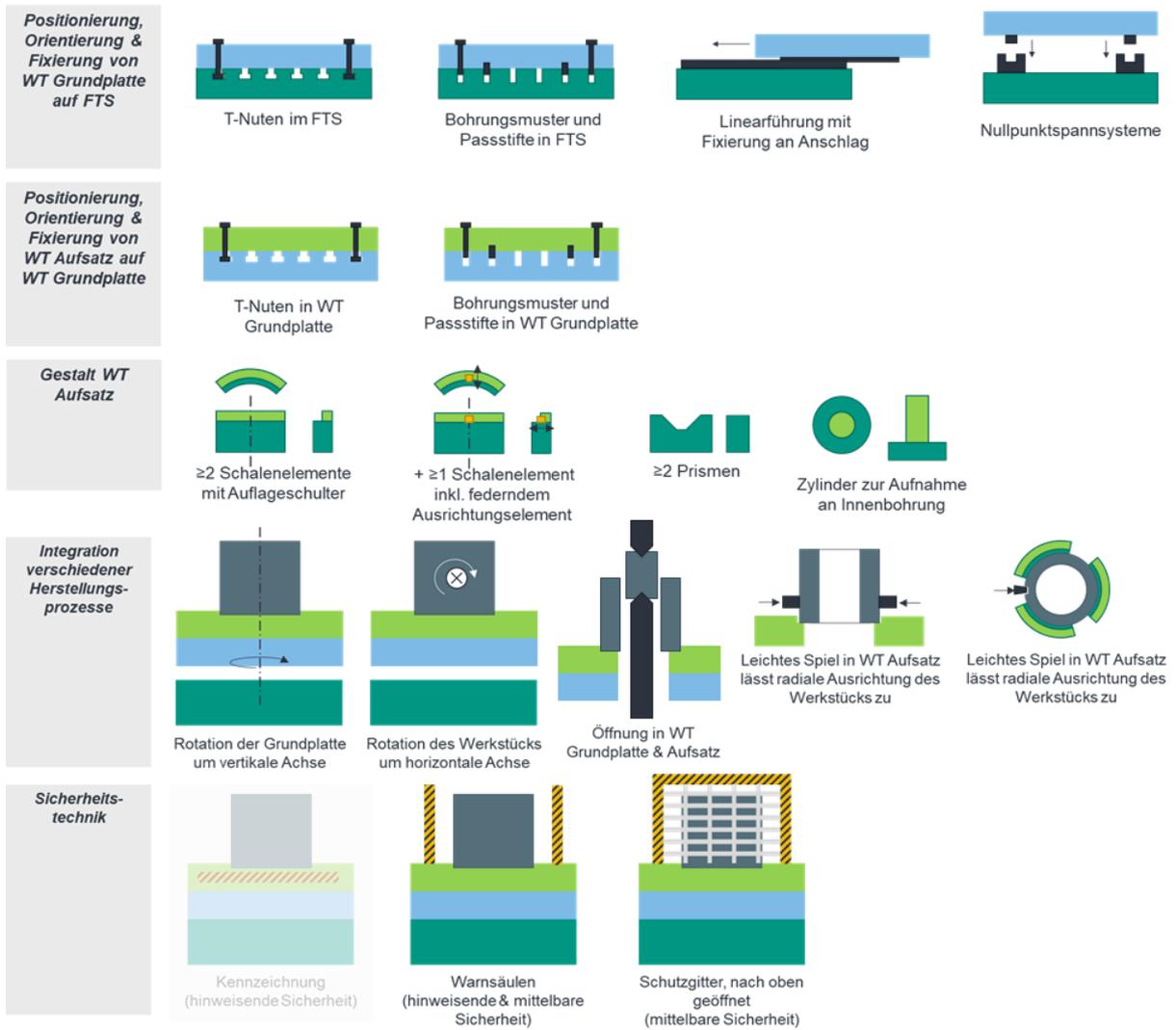


Abbildung 3.19: Ausschnitt des Morphologischen Kastens mit Teilfunktionen und möglichen Lösungskonzepten.

Im Rahmen eines gemeinsamen Workshops von wbk und Schaeffler wurden die Ergebnisse vorgestellt, ergänzt und konkretisiert. Darüber hinaus wurde das Spannungsfeld zwischen Modularität (große Anzahl mechanischer Schnittstellen) und technischer Sauberkeit (möglichst geringe Anzahl an Nuten und Öffnungen) adressiert. So konnten konstruktive Restriktionen und Regeln zur Sicherstellung der Sauberkeit erarbeitet und gesammelt werden, wie bspw. das Verschrauben von unten oder nach außen geneigte Oberflächen zur Minimierung von Schmutzablagerungen. Zuletzt wurden weitere Randbedingungen bzw. Anforderungen an das Werkstückträgerkonzept erarbeitet, wie sie in Abbildung 3.20 dargestellt sind. Die weitere Ausarbeitung der Konzepte war Bestandteil der Transferphase des Vorhabens und ist im entsprechenden Abschlussbericht näher beschrieben.

#	Anforderungen	Lösungsmöglichkeiten	Im Widerspruch zu	Im Einklang mit
1	Sicherer Transport des Werkstücks	Geringes Spiel bei Auflage auf WT (evtl. Klemmung)		
2	Sicheres Auflegen und Entnehmen des Werkstücks	Mindestspiel bei Auflage einhalten	1	
3	Verwendung innerhalb eines Prozessmoduls	Anheben und Zentrieren des Bauteils ermöglichen	1	
4	Sauberkeit des Werkstückträgers	Einhaltung von Hinweisen zur Sauberkeit + Reduzierung von Kontaktflächen		3
5	Geringe Kosten	Einsatz von Normteilen und einfachen Körpern	6	6
6	Kurze Rüstzeiten	Werkzeuglose Bedienung von WT's, individuell gestaltete WT's	8	
7	Anpassbarkeit an unterschiedliche Bauteilabmessungen	Verstellbare Aufsätze bspw. inkl. Ausrichtung der Auflagepunkte an Referenzbauteilen	4, 6	8
8	Geringe Lagerhaltung	Einsatz modularer Werkstückträger	6	5

Abbildung 3.20: Anforderungen und Lösungsmöglichkeiten an das Werkstückträgerkonzept.

3.2.4 Aufbau eines flexiblen Handhabungsmoduls

Wie aus den in Kapitel 3.2.2 vorgestellten Ergebnissen hervorgeht, spielt die Handhabungs- und Montagetechnik eine wichtige Rolle in der Produktion elektrischer Traktionsmotoren – nicht zuletzt beim Einsatz der Hairpin-Technologie. So werden diese Prozesse zum einen als Engpässe der Prozesskette eingeschätzt, das heißt die Kapazitäten der zugehörigen Funktionseinheiten werden bei Hochskalierung der Stückzahlen zuerst an ihre Grenzen kommen. Zum anderen bieten sie aber auch großes Potenzial bei der skalierbaren Automatisierung und Standardisierung, die beispielsweise durch den Einsatz von Robotern realisiert werden können. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der Pilotphase ein Handhabungsmodul konzeptioniert, konstruiert und anschließend implementiert. Dieses Modul soll flexibel an verschiedene Arbeitsplätze oder Maschinen angeschlossen werden können und verschiedene Handhabungs- oder Montageaufgaben übernehmen. Eine Standardisierung im Sinne einer einfach gehaltenen hard- und softwareseitigen Architektur ermöglicht die bedarfsgerechte Skalierung der Anzahl eingesetzter Handhabungsmodule in der Produktion. Die Flexibilität des Einsatzortes unterstützt zudem den geforderten modularen Aufbau des gesamten Produktionssystems und ermöglicht so ein stückzahlgetriebenes Produktionslayout. Abbildung 3.21 zeigt den ersten Entwurf des Handhabungsmoduls in der CAD-Software und den realen Aufbau in der Karlsruher Forschungsfabrik. Das Modul besteht aus einem KUKA-Roboter KR 10 R1100-2 mit zugehöriger Steuerung KR C4 compact, einer Siemens-Steuerung des Typs ET 200SP sowie einem Grundgerüst aus Aluminiumprofilen mit Nullpunktspannsystemen der Firma Schunk zur Fixierung des Roboters auf der Tischplatte sowie des Handhabungsmoduls an einer anderen Funktionseinheit. Softwareseitig wurde zur Konstruktion das CAD-System Siemens NX, zur Simulation der Mechatronic Concept Designer und PLCSIM Advanced sowie zur Programmierung der SPS und aller nötigen Sicherheitseinrichtungen das TIA Portal von Siemens genutzt.

Zur Demonstration und Validierung des Konzepts wurde zudem eine Montagestation konstruiert, die sowohl der manuellen als auch einer automatisierten Montage durch das Handhabungsmodul dient. Zur Absicherung der Werker während der automatisierten Montage wurden Lichtschranken

in die Montagestation integriert. Das CAD-Modell des gesamten Aufbaus ist in Abbildung 3.22 dargestellt. Während der Implementierung und Nutzung des Handhabungsmoduls wurden bereits diverse Verbesserungs- bzw. Änderungsvorschläge aufgezeigt. Da das Modul auch im Rahmen der Projektphase AgiloDrive2 weitergenutzt und -entwickelt werden soll, werden diese Änderungen entsprechend den finanziellen und zeitlichen Rahmenbedingungen integriert. Im Verlauf von AgiloDrive2 soll das Handhabungsmodul sowohl am wbk als auch für den Projektpartner Schaeffler als Entwicklungsplattform und schnell verfügbarer Demonstrator für Versuche genutzt werden können.

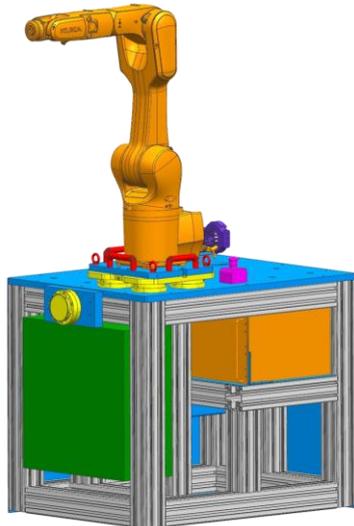


Abbildung 3.21: CAD-Modell des Handhabungsmoduls (links) und realer Aufbau des Handhabungsmoduls in der Karlsruher Forschungsfabrik (rechts).

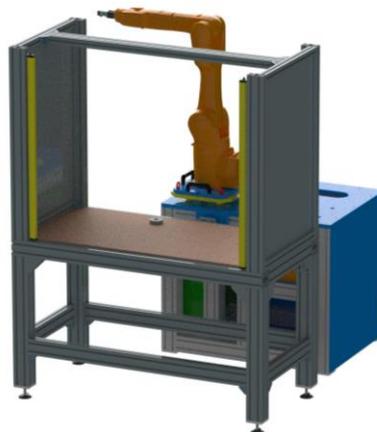


Abbildung 3.22: CAD-Modell eines Montagearbeitsplatzes mit angeschlossenem Handhabungsmodul.

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 des Forschungsvorhabens konnte bis zum Ende der Laufzeit am 31.10.2021 eine wissenschaftliche Veröffentlichung erarbeitet werden, die im März 2021 in der Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb publiziert wurde (siehe Kapitel 5.1). Darüber hinaus sind weitere Veröffentlichungen für das Jahr 2022 geplant, welchen unter anderem die Ergebnisse der Pilotphase 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)