

1 Einleitung

Die Elektromobilität emanzipiert sich immer mehr von einer lange als disruptiv bezeichneten Nischentechnologie zur Technologie für die breite Masse. Hieraus ergeben sich für die Automobilindustrie neue technologische wie auch produktionssystematische Herausforderungen, denen es zu begegnen gilt. Diese Arbeit soll einen Beitrag zur Lösung bestehender Herausforderungen im Umfeld der Elektromobilkomponentenproduktion liefern. Es erfolgt zunächst die Skizzierung der Ausgangssituation und Problemstellung (vgl. Kapitel 1.1). Anschließend werden in Kapitel 1.2 die Zielsetzung der Arbeit formuliert und hierauf basierend zu beantwortende Forschungsfragen abgeleitet. Es folgen eine wissenschaftstheoretische Einordnung und die Beschreibung der Vorgehensweise (vgl. Kapitel 1.3) sowie die Darlegung des Aufbaus der Arbeit (vgl. Kapitel 1.4).

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

„Wer heute einen Kolben fertigt, wird nicht morgen einfach eine Leistungselektronik herstellen können.“¹

Diese Aussage ist ebenso evident wie empirisch richtig und gilt für OEM genauso wie für Automobilzulieferer und deren Zulieferer. Was für die Leistungselektronik gilt, gilt genauso für den elektrischen Antrieb und seine Hauptkomponenten Stator und Rotor.² Der Produktionsprozess von Verbrennungsmotoren unterscheidet sich grundlegend von dem elektrischer Antriebe – sowohl in Bezug auf relevante Fertigungstechnologien als auch auf die Notwendigkeit der Verarbeitung grundunterschiedlicher Werkstoffe.³ Abbildung 1-1 veranschaulicht diese Feststellung durch die vergleichende Einordnung relevanter Fertigungsverfahren für Komponenten von Verbrennungsmotoren und für Statoren elektrischer Antriebe⁴. Dieser Umstand erfordert bei Marktteilnehmern andere und vor allem neue Expertise.⁵

Sowohl im Hinblick auf die Produkt- als auch auf die Produktionstechnologie besteht die Notwendigkeit, neues Wissen im Bereich elektrischer Antriebe aufzubauen, was für Produzenten ebenso gilt wie für Maschinen- und Anlagenhersteller. Eine im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Patentanalyse⁶ zu Statoren mit Hairpin-Technologie zeigt, dass knapp 92% aller betrachteten Patente mit Fokus auf das Produkt durch Produzenten eingereicht wurden, wohingegen 66% aller Patente mit dem Fokus auf Produktionsprozesse auf Maschinen- und Anlagenhersteller zurückzuführen sind. Maschinen- und Anlagenhersteller haben sich in den letzten Jahren vermehrt als

¹ Lienkamp (Status Elektromobilität) 2023, S. 50.

² Siehe Kapitel 2.4

³ vgl. Kampker et al. (Elektromotorenproduktion) 2022, S. 7.

⁴ Zur Prozesskette zur Herstellung eines Stators mit Hairpin-Technologie siehe Kapitel 2.4

⁵ vgl. Mayr et al. (Integrated Product and Process Development) 2017, S. 1 und Abele et al. (PKW-Antriebsstrang) 2009, S. 15f.

⁶ Betrachtet wurden 725 Patente im Zeitraum von 1984 bis 2022

Wissensträger im Bereich der Produktion elektrischer Antriebe etabliert.⁷ Beim Aufbau von Produktionssystemen agieren Maschinen- und Anlagenhersteller vermehrt als Generalunternehmer und sind somit frei in der Gestaltung der Lösungsfindung. Dies trägt wiederum zu weiterem Wissensaufbau bei, resultiert in einer Stärkung der eigenen Positionierung am Markt und birgt für Produzenten die Gefahr, sich in technologische Abhängigkeit gegenüber Maschinen- und Anlagenherstellern zu begeben.⁸

1 Urformen	2 Umformen	3 Trennen
1.1 Urformen aus dem flüssigen Zustand	2.1 Druckumformen	3.1 Zerteilen
1.2 Urformen aus dem plastischen Zustand	2.2 Zugdruckumformen	3.2 Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden
1.3 Urformen aus dem breiigen Zustand	2.3 Zugumformen	3.3 Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden
1.4 Urformen aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand	2.4 Biegeumformen	3.4 Abtragen
1.5 Urformen aus dem span- oder faserförmigen Zustand	2.5 Schubumformen	3.5 Zerlegen
1.6 Urformen aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand		3.6 Reinigen
1.9 Urformen aus dem ionisierten Zustand		
4 Fügen	5 Beschichten	6 Stoffeigenschaft ändern
4.1 Zusammensetzen	5.1 Beschichten aus dem flüssigen Zustand	6.1 Verfestigen durch Umformen
4.2 Füllen	5.2 Beschichten aus dem plastischen Zustand	6.2 Wärmebehandeln
4.3 An- und Einpressen	5.3 Beschichten aus dem breiigen Zustand	6.3 Thermomechanisches Behandeln
4.4 Fügen durch Urformen	5.4 Beschichten aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand	6.4 Sintern Brennen
4.5 Fügen durch Umformen	5.6 Beschichten durch Schweißen	6.5 Magnetsieren
4.6 Fügen durch Schweißen	5.7 Beschichten durch Löten	6.6 Bestrahlen
4.7 Fügen durch Löten	5.8 Beschichten aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand	6.7 Photochemische Verfahren
4.8 Kleben	5.9 Beschichten aus dem ionisierten Zustand	

Komponentenproduktion Verbrenner
 Beide
 Statorproduktion (Hairpin)

Abbildung 1-1 Produktionsprozesse für Antriebskomponenten in DIN 8580⁹

Eine derartige Abhängigkeit wird dramatisch verschärft, sobald bestehende Produktionssysteme verändert werden müssen. Produzenten auf Auftraggeberseite verfügen über geringes produktionstechnologisches Erfahrungswissen und sind auf die

⁷ Siehe Kapitel 2.4 und Kapitel 2.5

⁸ Siehe Kapitel 2.1

⁹ vgl. Deutsches Institut für Normung (DIN 8580:2003-09) 2003, S. 8 ff. Es wurden die Prozesse zur Herstellung von Motorblock, Kurbelwelle, Pleuel, Kolben und Nockenwelle in Anlehnung an Deutskens (Konfiguration der Wertschöpfung) 2014, S. 26 und der Prozess zur Herstellung eines Stators mit Hairpin-Wicklung in Anlehnung an Kampfer et al. (Produktionsprozess eines Hairpin-Stators) 2022, S. 4 ff. herangezogen

Expertise von Maschinen- und Anlagenherstellern auf Auftragnehmerseite angewiesen. Die Gründe für Veränderungen an Produktionssystemen können vielschichtig sein. So sind Produktlebenszyklen oft kürzer gestaltet als die der zugehörigen Produktionsanlagen.¹⁰ Produktänderungen, aber auch Abweichungen in der Prozess- oder Maschinenfähigkeit, können zur Notwendigkeit kurzfristiger Änderungen bestehender Produktionstechnologie führen. CONRAT NIEMERG unterscheidet zwei Arten von Änderungsauslösern: Veränderungen des Soll-Zustands können beispielsweise durch die Verfügbarkeit neuer technischer Lösungen auftreten. Aus Veränderungen des Ist-Zustands kann eine Soll-Ist-Abweichung entstehen, die mit einer Nichterfüllung von Qualitätsanforderungen einhergeht.¹¹ BUCHHOLZ benennt unter anderem Kostenvorteile, erhöhte Leistungsfähigkeit und höhere Flexibilität anderer Technologien als mögliche Gründe, bestehende Technologien zu ersetzen.¹² In der vorliegenden Arbeit liegt der Schwerpunkt auf der Planung von Produktionssystemänderungen in Form einer Technologiesubstitution bedingt durch das Aufkommen neuer technologischer Lösungen mit höherer Leistungsfähigkeit. Die grundsätzliche Herausforderung einer Produktionssystemänderung wird im Betrachtungsbereich der Arbeit durch den Umstand unzureichenden Erfahrungswissens auf Seiten der verantwortlichen Planenden erschwert.

1.2 Zielsetzung der Arbeit und Forschungsfrage

Nach der Darlegung der Ausgangssituation und Problemstellung erfolgt die Beschreibung des Ziels dieser Arbeit. Die Zielsetzung besteht in der Bereitstellung einer Methodik, mithilfe derer die Planung von Technologiesubstitutionen innerhalb bestehender Produktionssysteme erleichtert werden soll. Die Besonderheit hierbei liegt in der Grundannahme, dass der Anwender der Methodik als verantwortlicher Planender über wenig Erfahrungswissen im Zusammenhang mit dem bestehenden Produktionssystem und dessen Technologie verfügt. Die erfolgreiche Planung erfordert eine enge Zusammenarbeit mit Technologielieferanten (Maschinen- und Anlagenherstellern), die in der beschriebenen Ausgangssituation als hauptsächliche Wissensträger fungieren. Es gilt – aus Sicht des Planenden – das technisch-wirtschaftliche Risiko, das mit einer aus der Technologiesubstitution resultierenden Produktionsunterbrechung einhergeht, nach Möglichkeit zu minimieren. Die Zielsetzung der Arbeit wird wie folgt zusammengefasst:

Das übergeordnete Ziel der Arbeit besteht in der Entwicklung einer Methodik zur Planung von Technologiesubstitutionen in bestehenden Produktionssystemen unter Berücksichtigung mangelnden Erfahrungswissens des Planenden.

¹⁰ vgl. Schuh et al. (Gestaltung von Betriebsmitteln) 2004, S. 212.

¹¹ vgl. Conrat Niemerg (Änderungskosten) 1997, S. 51 f; Maue (Gestaltung des Produktionsanlaufs) 2016, S. 141.

¹² vgl. Buchholz (Bewertung des Substitutionsrisikos) 2014, S. 10.

Gemäß KUBICEK sind zur Eingrenzung des Betrachtungsbereichs und der Ausrichtung des Forschungsvorgehens Forschungsfragen zu definieren.¹³

Die **übergeordnete Forschungsfrage dieser Arbeit** lautet:

Wie muss die Planungsphase für die Substitution einer Technologie innerhalb eines bestehenden Produktionssystems unter Berücksichtigung mangelnden Erfahrungswissens des Planenden gestaltet sein, um das mit einer Produktionsunterbrechung einhergehende technisch-wirtschaftliche Risiko möglichst gering zu halten?

Zur Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage bietet sich darüber hinaus die Formulierung von Nebenforschungsfragen an. Die **Nebenforschungsfragen** zur Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage lauten:

- Wie lassen sich planerische Risiken unter der Maßgabe mangelnden Erfahrungswissens frühzeitig identifizieren und bewerten, um rechtzeitig entsprechende Gegenmaßnahmen zu formulieren?
- Wie lässt sich die technische Reife der zu integrierenden Technologie unter Berücksichtigung planerischer Umfeldfaktoren bei geringer Prozessenerfahrung bewerten?
- Wie lassen sich Planungsaufwände quantifizieren und bewerten, sodass sichergestellt werden kann, dass stets ein angemessenes Verhältnis zwischen (Planungs-)kosten und Integrationsrisiko gewahrt wird?
- Welche Auswirkungen hat die multilaterale Projektkonstitution aus Auftraggeber und Technologielieferant(en) auf die finale Umsetzungsplanung?

1.3 Wissenschaftstheoretische Einordnung und Vorgehen

Vor der Auswahl einer geeigneten Forschungsmethodik zur Beantwortung der Forschungsfragen aus Kapitel 1.2 erfolgt zunächst die wissenschaftstheoretische Einordnung der Arbeit. Nach ULRICH und HILL lassen sich Wissenschaften in Formal- und Realwissenschaften unterteilen. Während sich Formalwissenschaften um die „Konstruktion von Sprachen, d.h. von Zeichensystemen mit Regeln zur Verwendung dieser Zeichen“¹⁴ bemühen, fokussieren die Realwissenschaften die „Beschreibung, Erklärung und Gestaltung empirisch [...] wahrnehmbarer Wirklichkeitsausschnitte“.¹⁵ Die Realwissenschaften wiederum unterteilen sich in „reine“ Wissenschaften bzw. Grundlagenwissenschaften (z.B. Naturwissenschaften) und „angewandte“ Wissenschaften bzw. Handlungswissenschaften (z.B. Sozialwissenschaften). Während der Fokus der Grundlagenwissenschaften auf der Erklärung empirischer Wirklichkeitsausschnitte liegt (Bildung von Erklärungsmodellen), liegt er bei Handlungswissenschaften in der Analyse menschlicher Handlungsalternativen (Bildung von Entscheidungsmodellen).

¹³ vgl. Kubicek (Heuristische Bezugsrahmen) 1976, S. 25.

¹⁴ Ulrich et al. (Wissenschaftstheoretische Grundlagen) 1976, S. 305.

¹⁵ Ulrich et al. (Wissenschaftstheoretische Grundlagen) 1976, S. 305.

Nach Auffassung von ULRICH und HILL sind Ingenieurwissenschaften und Betriebswirtschaftslehre – also die Wissenschaftsdisziplinen, die im Rahmen der Arbeit adressiert werden – den Handlungswissenschaften zuzuordnen.

Als eine zielführende Forschungsmethodik für angewandte Handlungswissenschaften hat sich das Forschungsvorgehen in sieben Phasen nach ULRICH ET AL. etabliert.¹⁶ Es basiert auf der Überlegung, dass der Forschungsprozess in der Praxis beginnt, auf die Untersuchung von Anwendungszusammenhängen gerichtet ist und wiederum in der Praxis endet. Zu Beginn steht die Erfassung und Typisierung praxisrelevanter Probleme, gefolgt von der Erfassung und Interpretation problemrelevanter Theorien unterschiedlicher Grundlagenwissenschaften. Daraufhin erfolgen die Erfassung und Spezifizierung problemrelevanter Verfahren der Formalwissenschaften. Die Erfassung und Untersuchung relevanter Anwendungszusammenhänge sowie die Ableitung von Beurteilungskriterien, Gestaltungsregeln und Modellen stehen im Zentrum dieses Forschungsprozesses. Zum Schluss stehen die Phasen der Prüfung von Regeln und Modellen im Anwendungszusammenhang sowie die Beratung der Praxis.¹⁷

Die dieser Arbeit zugrundeliegende Problemstellung sowie die daraus resultierende Forschungsfrage werden aus Beobachtungen innerhalb der industriellen Praxis abgeleitet. Aufgrund des engen Praxisbezugs zu Beginn und während des Vorgehens sowie der Prüfung der Anwendbarkeit im Praxiszusammenhang am Ende des Vorgehens bildet die „Strategie zur angewandten Forschung“ nach Auffassung des Autors einen geeigneten forschungsmethodischen Rahmen für die vorliegende Arbeit.

1.4 Aufbau der Arbeit

Es folgt die Beschreibung des Aufbaus der vorliegenden Arbeit mit Bezug zu den Phasen der angewandten Forschung nach ULRICH (vgl. Abbildung 1-2).¹⁸

In Kapitel 1 erfolgte die Darlegung der Ausgangssituation und Problemstellung sowie die Formulierung der Zielsetzung der Arbeit und die hieraus resultierende Forschungsfragen. Zudem wurde die Arbeit wissenschaftstheoretisch eingeordnet und eine zur Beantwortung der Forschungsfrage geeignete Forschungsmethodik identifiziert.

Kapitel 2 beinhaltet den Betrachtungsbereich der Arbeit und legt Grundlagen zum Verständnis der Arbeit. Hierunter fallen die Grundlagen der Produktionssystemplanung (vgl. Kapitel 2.1), die Änderung von Produktionssystemen (vgl. Kapitel 2.2) sowie die Beschreibung von Branchenstandards in Bezug auf Produkt- und Prozessfreigaben in der Automobilindustrie (vgl. Kapitel 2.3). Außerdem wird die Disziplin der Produktion elektrischer Antriebe vor dem Hintergrund der aktuellen Marktsituation analysiert (vgl.

¹⁶ Siehe u.a. Giehler (Planungsproduktivität) 2010; Döring (Konfliktmanagement) 2010; Narr (Kooperatives Lieferantenmanagement) 2012; Heimes (Auswahl von Fertigungsressourcen) 2014; Nee (Wertschöpfungsnetzwerke) 2014; Krunke (Reifegradmanagement) 2017.

¹⁷ vgl. Ulrich (Management) 1984, S. 192 f.

¹⁸ vgl. Ulrich (Management) 1984, S. 193.

Kapitel 2.4). Es folgen die Ergebnisdiskussion einer im Rahmen der Arbeit durchgeführten Industriestudie (vgl. Kapitel 2.5) und die Ableitung des Handlungsbedarfs aus der Praxis (vgl. Kapitel 2.6).

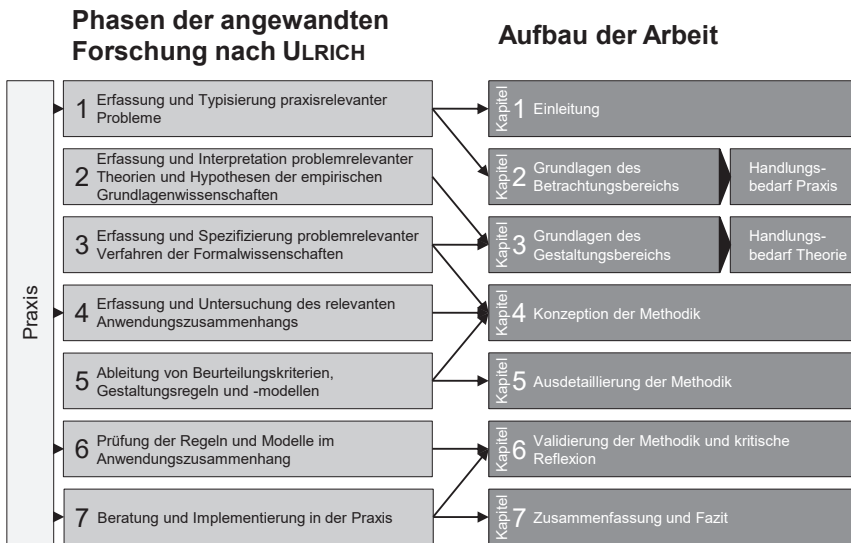


Abbildung 1-2 Aufbau der Arbeit¹⁹

In Kapitel 0 erfolgt zunächst die Ableitung inhaltlicher und formaler Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik (vgl. Kapitel 3.1) basierend auf den Ergebnissen aus Kapitel 2. Anschließend wird ein geeignetes Vorgehen zur Prüfung bestehender Ansätze aus der Theorie beschrieben (vgl. Kapitel 3.2). Es folgen die kritische Würdigung bestehender Ansätze aus der Theorie (vgl. Kapitel 3.3) und die Ableitung des Handlungsbedarfs aus Sicht der wissenschaftlichen Theorie (vgl. Kapitel 3.4).

Zu Beginn von Kapitel 4 werden Grundlagen zur Methodikgestaltung dargelegt. Es folgen die Einordnung der Methodik (vgl. Kapitel 4.2) sowie die Vorstellung des Grobkonzepts der Methodik in Form der Aufbau- (vgl. Kapitel 4.3) und Ablaufstruktur (vgl. Kapitel 4.4).

In Kapitel 5 werden die Module der Methodik detailliert.

Kapitel 6 dient der Anwendung der entwickelten Methodik im Praxiszusammenhang am Beispiel der Statorproduktion für elektrische Antriebe.

In Kapitel 7 erfolgt die Zusammenfassung der Arbeit sowie die Identifikation weiterer Forschungsbedarfe.

¹⁹ Eigene Darstellung in Anlehnung an Ulrich (Management) 1984, S.193.