
1 Einleitung

Die Bereitstellung von Schweißvorrichtungen im Karosseriebau erfordert Ressourcen, deren Verhältnismäßigkeit insbesondere in der Vorserie genauer hinterfragt werden sollte, um die Verschwendungen von nicht erforderlichen Materialmengen, Energie und Geldeinheiten zu begrenzen. Die Produktionsforschung sucht in der ganzheitlichen Betrachtung eines Fahrzeuglebenszyklus nach Lösungen, die Ressourcenverschwendungen und Treibhausgasemissionen insbesondere im Entwicklungs- und Herstellungsprozess einzudämmen. Die vorliegende Dissertation befasst sich in diesem Kontext mit der ressourcenschonenden additiven Fertigung von Schweißvorrichtungen im Karosseriebau. In der Einleitung werden die Ausgangssituation und Problemstellung formuliert und darauf aufbauend Ziele abgeleitet, die durch Klärung der gestellten Forschungsfragen erreicht werden sollen. Im Aufbau der Arbeit wird der formale Rahmen zur Zielerreichung beschrieben.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

In der Fahrzeugproduktion zeichnen sich derzeit Veränderungen ab, welche zum einen durch stärker heterogene Kundenwünsche und zum anderen durch den Wandel hin zu klimaneutralen Fahrzeuglebenszyklen geprägt sind. Individuelle Kundenwünsche, die auch nach dem Fahrzeugkauf auftreten, stehen mehr und mehr im Fokus, sodass die Automobilindustrie mit einem klassischen Verkäufermarkt neue Lösungen für einen kundenorientierten Käufermarkt gestalten muss.¹ Kürzer werdende Innovationszyklen verschärfen den Bedarf, individuelle Kundenbedürfnisse schneller realisieren zu können, sodass neue Modelle und Modellvarianten in immer kürzeren Abständen auf den Markt gebracht werden.² Mit neuen Ideen in der Produkt- und Produktionsgestaltung versuchen die Fahrzeughersteller schnell und adaptiv auf verän-

¹ Vergleiche (Vgl.) Schuh (2017), Lebenszyklusorientierte Produktentwicklung, S. 200.

² Vgl. Göpfert (2019), Logistik der Zukunft - Logistics for the Future, S. 350; Ehrlenspiel (2009), Integrierte Produktentwicklung, S. 183.

derte, kundenseitige Anforderungen reagieren zu können. Neue Lösungen wie der „Always Beta“-Ansatz verfolgen beispielsweise das Ziel, cyber-physische Produkte auch während der Nutzungsphase kontinuierlich mit Updates und Upgrades auf Nutzerbedürfnisse hin zu adaptieren.³ Die stetige Anpassbarkeit des Produktes erfordert dementsprechend ressourcenschonend anpassbare Produktionsmittel wie Werkzeuge und Vorrichtungen. Die zweite wichtige Veränderung, der die Fahrzeugproduktion ausgesetzt ist, ergibt sich aus dem Ziel der klimaneutralen Mobilität, welches in der ganzheitlichen Betrachtung des Fahrzeugebenszyklus auch den Material- und Energieverbrauch und die damit zusammenhängenden Schadstoffemissionen in der Entwicklung und Herstellung betrifft.⁴ Bemühungen, den CO₂-Ausstoß bereits im Herstellungsprozess eines Fahrzeugs zu senken, werden durch die derzeit hohen Emissionswerte bei der Batterieherstellung von Elektrofahrzeugen bestärkt.⁵ Zwar herrschen unterschiedliche Ansichten darüber, ob nun die Herstellung eines Elektrofahrzeugs mehr CO₂-Emissionen verursacht als die Herstellung eines Verbrennerfahrzeugs.⁶ Darüber, dass die Produktion von Fahrzeugen aller Art sauberer werden muss, ist man sich jedoch weitestgehend einig. VW hat beispielsweise den spezifischen Energieverbrauch je Fahrzeug in der Produktion von 2010 bis 2016 um mehr als 17 % reduziert.⁷ Die Verringerung des Ressourceneinsatzes bei der Bereitstellung von Betriebsmitteln wie Schweißvorrichtungen stellt eine Möglichkeit dar, den Material- und Energieverbrauch im Karosseriebau als Teilgewerk der Fahrzeugproduktion zu reduzieren.

Wie ressourcenintensiv die Bereitstellung von Vorrichtungen gegenwärtig im Karosseriebau ist, zeigen die erforderlichen Investitionskosten für Vorrichtungssysteme, deren Anteil sich auf 35-40 % einer Karosseriebaustation beläuft.⁸ Aufwendig konstruiert und robust gestaltete Vorrichtungen sind notwendig, um den hohen Toleranzanforderungen im Karosseriebau gerecht zu werden, wobei diese aufgrund der bauteilspezifischen Gestaltung nur geringfügig standardisiert beziehungsweise modularisiert werden können.⁹ Die Schweißvorrichtungen des Prototypenbaus und der Karosserie-Vorserie sind ähnlich robust gestaltet wie die Serien-Vorrichtungen, mit dem Unterschied,

³ Vgl. Schuh et al. (2020), Always Beta – DevOps für cyber-physische Produkte, S. 116f.

⁴ Vgl. Dahl (2019), Kriterien zur Bewertung von ökologischer Nachhaltigkeit in der Automobilindustrie – Eine Analyse aktueller Trends und angewandter Methoden, S. 75ff.

⁵ Vgl. Stan (2020), Alternative Antriebe für Automobile, S. 5.

⁶ Vgl. Doppelbauer (2020), Grundlagen der Elektromobilität, S. 381ff.

⁷ Vgl. Karle (2019), Elektromobilität, S. 166.

⁸ Vgl. Hansen et al. (2018), Approaches for flexibility in the future automobile body shop: results of a comprehensive cross-industry study, S. 995ff.

⁹ Vgl. Boyle et al. (2011), A review and analysis of current computer-aided fixture design approaches, S. 2ff.; Hesse et al. (2012), Betriebsmittel Vorrichtung, S. 20f.

dass sie manuell und nicht automatisch betrieben werden. Bauteiländerungen, wie sie in der Vorserie häufig auftreten, verursachen bei der beschriebenen gegenwärtigen Bauweise von Vorrichtungen aufgrund der erforderlichen Anpassung von spezifischen Vorrichtungselementen hohe zusätzliche Fertigungskosten. Durch die von späten Änderungen verursachten, zusätzlichen Zeit- und Kostenaufwände verzögert sich der „Start of Production“ (SOP).¹⁰ Für die Herstellung einer kompletten Karosserie kommen in der Vorserie ca. 190 unterschiedliche Schweißvorrichtungen zum Einsatz, die teilweise nur für eine Stückzahl von 20 Fahrzeugen einer Variante gebraucht werden und danach wieder demontiert werden, wonach die spezifischen Vorrichtungselemente entsorgt werden. Die additive Fertigung dieser Schweißvorrichtungen verspricht Einsparpotenziale hinsichtlich der Herstellkosten und -zeit und damit wichtiger Ressourcen. Bei der Herstellung von Montage- und Handvorrichtungen in Vorserie und Serie wird die additive Fertigung bereits erfolgreich eingesetzt.¹¹

1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Gestaltungsempfehlungen für die additive Fertigung von Schweißvorrichtungen zu erarbeiten, sodass Ressourcen im Bereit- und Herstellungsprozess von Schweißvorrichtungen im Karosseriebau eingespart werden können. Insbesondere im von hohen Kosten und vielen Änderungsanforderungen geprägten Schweißvorrichtungsbau für Prototypen und Vorserienfahrzeuge erscheint die additive Fertigung sinnvoll. Die erforderlichen Stückzahlen in der Vorserie sind gering, sodass die kunststoffbasierte additive Fertigung von manuellen Vorserien-schweißvorrichtungen vielversprechend erscheint. Ziel ist es jedoch auch, Potenziale der Lösung auf die Randbedingungen der Serienproduktion zu übertragen. Um die Praxistauglichkeit der erarbeiteten Gestaltungsempfehlungen sicherzustellen, werden diese anhand von zwei Beispiel-Schweißbaugruppen erprobt werden. Ziel ist es daher, Schweißvorrichtungen mit additiv gefertigten Vorrichtungselementen auf Basis der Gestaltungsempfehlungen zu konstruieren, zu fertigen, aufzubauen und mit den Baugruppen in Schweißserien zu testen. Um zu bewerten, in welchem Umfang Herstellkosten eingespart werden können, wird ein Kostenvergleich zwischen konventionell und additiv gefertigten Vorrichtungselementen durchgeführt. Ein weiteres Ziel der

¹⁰ Vgl. Steegmüller und Zürn (2014), Wandlungsfähige Produktionssysteme für den Automobilbau der Zukunft, S. 103ff.

¹¹ Vgl. Kampker et al. (2018), A Framework for Implementation of 3D-printing of Manufacturing Equipment, S. 53ff.

Arbeit ist daher die Erstellung eines Kostenmodells für die additive Fertigung von Schweißvorrichtungen.

Für die sinnvolle Eingrenzung des forschungsmethodischen Rahmens und der zielgerichteten Vorgehensweise empfiehlt KUBICEK die Formulierung einer Forschungsfrage.¹² Das Arbeitsprogramm zur Erreichung der genannten Ziele orientiert sich dementsprechend an der folgenden, handlungsleitenden Forschungsfrage:

Wie müssen Schweißvorrichtungen mit additiv gefertigten Funktionselementen gestaltet werden, damit sie wirtschaftlich eingesetzt werden können?

Die handlungsleitende Forschungsfrage lässt sich in Teilfragen untergliedern, deren Antworten das Arbeitsprogramm bilden und es im Innern strukturieren. Die Teilfragestellungen lauten wie folgt:

1. *Wie sieht der wirtschaftliche Einsatz von additiver Fertigung für die Schweißvorrichtungsherstellung aus?*
2. *Welche Verfahren und Materialien im Bereich der additiven Fertigung können an welchen Stellen von Schweißvorrichtungen eingesetzt werden?*
3. *Wie müssen die additiv gefertigten Vorrichtungselemente gestaltet werden, um die Anforderungen, im Wesentlichen Elementsteifigkeit, thermische Beständigkeit und Genauigkeit, zu erfüllen?*
4. *Wie sehen Gestaltungsempfehlungen für die Konstruktion der einzelnen Funktionselemente und Schnittstellen des Schweißvorrichtungssystems aus?*
5. *Erfüllt das Gesamtsystem Schweißvorrichtung mit additiv gefertigten Elementen alle Anforderungen hinsichtlich Merkmalstoleranzen und Reproduzierbarkeit innerhalb der geforderten Stückzahlen?*
6. *Wie hoch ist das Potenzial der Ressourceneinsparung durch additive Fertigung von Schweißvorrichtungselementen?*

1.3 Forschungsmethodischer Rahmen

Die angewandten Wissenschaften wurden nach ULRICH im Gegensatz zu den reinen Grundlagenwissenschaften wissenschaftstheoretisch und „forschungsmethodisch lange vernachlässigt“, gleichwohl insbesondere die angewandten technischen Wissenschaften für den Fortschritt der Menschheit an großer Bedeutung gewonnen haben

¹² Vgl. Kubicek (1977), Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesigns als Elemente einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung, S. 14.

und diese Bedeutung weiterhin wächst.¹³ Dabei sieht ULRICH ein durch Wissenschaft geleitetes Wechselspiel zwischen Fortschritt und Rückschritt. Als Rückschritte sieht ULRICH wachsende Größen wie die Zahl und Wirkungskraft von Waffen und das Ausmaß der Umweltverschmutzung, welche mit dem wachsenden materiellen Wohlstand auf der Erde einhergehen. Aus dieser Perspektive heraus sieht ULRICH die Aufgabe von Wissenschaft und Technik, erkannte Schädigungen durch wissenschaftsgeleitetes Handeln in der Praxis wieder zu beseitigen.¹⁴ Das Ziel der vorliegenden Arbeit, durch additive Fertigung im Schweißvorrichtungsbau Ressourcen zu schonen und damit mehr Fortschritt als Rückschritt zu erzeugen, ist demnach ein anwendungsorientiertes Wissenschaftsziel, mit welchem praktischer Nutzen erzeugt werden soll. Der beschriebene Praxiszusammenhang erlaubt damit eine Einordnung der Arbeit im Bereich der angewandten Handlungswissenschaften nach ULRICH UND HILL, wobei diese im technischen Bereich als Ingenieurwissenschaften bezeichnet werden.¹⁵

Im Sinne des Konstruktivismus soll nach BINDER UND KANTOWSKY ein Forschungsansatz in anwendungsorientierten Wissenschaften darauf abzielen, Problemstellungen in der Praxis zu identifizieren und innerhalb der Praxisprobleme neue und verbesserte Gestaltungsmodelle zu entwerfen, die eine neue Wirklichkeit schaffen.¹⁶ Sie empfehlen dabei, dem Forschungsansatz eine exploratorische beziehungsweise hypothesengenerierende Funktion zukommen zu lassen. Die explorative Vorgehensweise zur Gewinnung von Erkenntnissen beginnt dabei bei der Erkennung von Problemen, die durch Fragestellungen der handelnden Personen in der Praxis ausgedrückt werden. Nach POPPER besteht die Forschungsmethodik der Handlungswissenschaften darin, die Lösungsversuche für die erkannten Probleme auszuprobieren und diese dann der sachlichen Kritik auszusetzen.¹⁷ Für die Gestaltung des explorativen Forschungszyklus der vorliegenden Arbeit kann dabei auf die Arbeiten von KUBICEK zurückgegriffen werden. Die Explorationsstrategie ist nach KUBICEK von „theoretisch geleiteten Fragen an die Realität“ geprägt, die zu einem Lernprozess führen, der es ermöglicht, Probleme „auf dem Hintergrund von systematischem Erfahrungswissen“ präzise und detailliert zu untersuchen und zu lösen.¹⁸ Für die genauere Definition des Problems und systematische Suche nach Lösungshinweisen empfiehlt KUBICEK die Konstruktion eines heuristischen

¹³ Vgl. Ulrich (1981), Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft, S. 3f.

¹⁴ Vgl. Ulrich (1981), Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft, S. 21f.

¹⁵ Vgl. Ulrich und Hill (1976), Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, S. 305.

¹⁶ Vgl. Binder und Kantowsky (1996), Technologiepotentiale, S. 9ff.

¹⁷ Vgl. Popper (1987), Die Logik der Sozialwissenschaften, sechste These.

¹⁸ Vgl. Kubicek (1977), Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesigns als Elemente einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung, S. 13f.

Bezugsrahmens. Der heuristische Bezugsrahmen ist als „provisorisches Erklärungsmodell“ zu verstehen, mit welchem der Forschungsprozess gesteuert wird und als Orientierungshilfe im Lösungsprozess praktischer Probleme dient.¹⁹ Dabei beinhaltet er ein Potenzial für wissenschaftlichen Fortschritt, welches durch die Beantwortung der im Bezugsrahmen enthaltenen Fragen gehoben wird.²⁰ Der initiale heuristische Bezugsrahmen der vorliegenden Arbeit fußt dabei auf der in Abschnitt 1.1 ausgeführten Problemstellung und ordnet das Potenzial der additiven Fertigung von Schweißvorrichtungen im Spannungsfeld der in Abbildung 1.1 dargestellten Domänen ein.

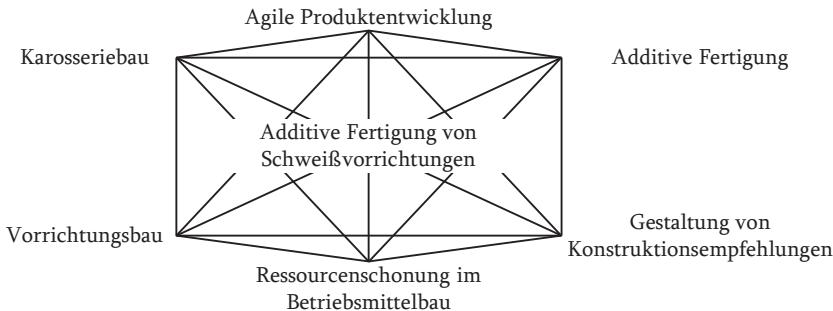


Abbildung 1.1: Initialer heuristischer Bezugsrahmen

Die Konkretisierung der Zusammenhänge zwischen den in den Domänen herausgearbeiteten Erkenntnissen erfolgt im Verlaufe des Forschungsprozesses. Dies geschieht durch das Aufstellen von Thesen, das Ausprobieren von Lösungsideen, die Durchführung von Experimenten und die Auswertung der in den Experimenten gewonnenen Daten. Die gewonnenen Erkenntnisse werden dabei kritisch reflektiert und hinsichtlich wissenschaftlicher und praktischer Relevanz hinterfragt. Die wissenschaftliche Relevanz der Lösungsidee wird im forschungsmethodischen Rahmen durch eine Literaturanalyse antizipiert, in welcher die relevante Literatur der genannten Domänen analysiert und für die Lösungsfindung herangezogen wird.²¹ Die kritische Hinterfragerung der Praxisrelevanz erfolgt durch den fachlichen Austausch mit Experten aus Unternehmen, die innerhalb der Domänen wirtschaften.

¹⁹ Vgl. Kubicek (1977), Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesigns als Elemente einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung, S. 18.

²⁰ Vgl. Kubicek (1977), Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesigns als Elemente einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung, S. 24.

²¹ Vgl. Seiffert (1976), Einführung in das wissenschaftliche Arbeiten, S. 43ff.

1.4 Aufbau der Arbeit

Für den Aufbau der Arbeit wird die Strategie der angewandten Forschung nach ULRICH verfolgt, demnach die Problemstellung aus der Praxis kommt und im explorativen Forschungsprozess nach KUBICEK durch eine anwendungsorientierte Lösungsfindung einen Beratungsbeitrag leistet.²² Der Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1.2 dargestellt.

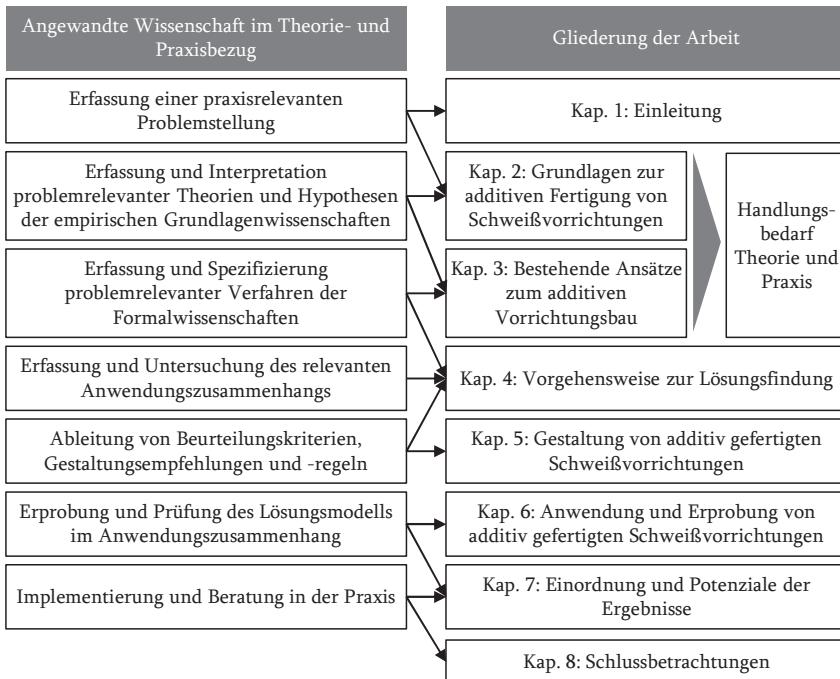


Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit²³

Im vorliegenden ersten Kapitel werden die Ausgangssituation und Problemstellung beschrieben sowie die Forschungsziele und Forschungsfrage formuliert, die mit dem forschungsmethodischen Rahmen erreicht und beantwortet wird.

²² Vgl. Ulrich et al. (1984), Management, S. 192ff.; Kubicek (1977), Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesigns als Elemente einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung.

²³ In Anlehnung an (I. A. a.) Ulrich et al. (1984), Management, S. 192ff.

Die Grundlagen zum betrachteten Objektbereich werden in Kapitel zwei aufgearbeitet. Das zweite Kapitel beginnt mit Erläuterungen zum Produktentstehungsprozess im Karosseriebau. Darauf aufbauend werden die Grundlagen zu Schweißvorrichtungen im Karosseriebau näher ausgeführt. Außerdem werden erforderliche Grundlagen zur additiven Fertigung von Strukturauteilen behandelt.

Das dritte Kapitel befasst sich mit bestehenden Ansätzen zum additiven Vorrichtungsbau in Forschung und Praxis. Der aufgezeigte Handlungsbedarf aus Praxisansätzen und das Theoriedefizit in der Forschungsliteratur bilden die Basis für den ebenfalls im dritten Kapitel beschriebenen Forschungsbedarf.

Im vierten Kapitel wird die Vorgehensweise zur Lösungsfindung vorgestellt. Darin werden ausgewählte Methoden aus Forschung und Literatur zur Klärung der Forschungsfrage herangezogen und die Anwendung der Methoden als Arbeitsprogramm der Lösungsfindung aufgezeigt.

Die Anwendung der im vierten Kapitel vorgestellten Methoden erfolgt in Kapitel fünf. Die systematische Verfahrens- und Materialauswahl wird mit Materialprüfungen bestätigt. Die Erkenntnisse werden anschließend in Gestaltungsempfehlungen für additiv gefertigte Schweißvorrichtungselemente überführt und diese vorgestellt.

Im sechsten Kapitel werden die Gestaltungsempfehlungen für die Konstruktion und Herstellung von zwei Schweißvorrichtungen angewandt und erprobt. Es wird zudem das Potenzial der Ressourceneinsparung aufgezeigt.

Weitere Potenziale der Lösung hinsichtlich der Bereitstellungsdauer von Schweißvorrichtungen werden im siebten Kapitel herausgearbeitet. Zudem wird die Lösung im „Internet of Production“ eingeordnet und Nachhaltigkeitsbetrachtungen angestellt.

Kapitel acht fasst die Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick für weitere, auf den Ergebnissen der Arbeit aufbauende Forschungsaktivitäten.