

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Handlungsbedarf

Die Automobilindustrie ist insbesondere aufgrund eines harten Wettbewerbs sowie einer starken Krisenanfälligkeit einem hohen Innovationsdruck hin zu disruptiven Innovation ausgesetzt [KAMP19, S. 34], [MOHR13, S. 7f.]. U.a. setzen ein zunehmender technologischer Wandel, kürzere Produktlebens- und -entwicklungszyklen sowie die Notwendigkeit der parallelen Entwicklung und Produktion mehrerer unterschiedlicher Antriebskonzepte die Branche unter Druck [KAMP19, S. 34], [MOHR13, S. 7f.]. Verstärkt wird dieser Effekt durch eine steigende Anzahl kleiner und mittelgroßer Serien, eine anhaltend geforderte Reduktion des Fahrzeuggewichts, den Trend hin zu Mass Customization und einen wettbewerbsintensiveren Markt durch neue Marktteilnehmer [FRIE17, S. 1–15]. Diese Trends führen zu Herausforderungen der Produktentwicklung hinsichtlich der Bereitstellungszeit von Betriebsmitteln, Kosten, Flexibilität sowie Globalisierung [WALT07, S. 1f.]. [BURG20, S. 142434]

Derzeit ist der Automobilbau durch eine hohe Verfügbarkeit sowie Kapitalbindung geprägt und zeichnet sich durch hohe Qualitätsanforderungen sowie minimale Rüstzeiten und Ausfälle aus [DOEG00, S. 1f.]. Für eine sichere, nachhaltige und finanzierbare Mobilität stehen die Reduktion von Emissionen sowie Strategien des Leichtbaus als unverzichtbare und prosperierende Bausteine im Vordergrund [FRIE17, S. 1]. Folglich hängt die Zukunftsfähigkeit produzierender Unternehmen im Automobilbau insbesondere an einem ressourcenschonenden Leichtbau [KLEI19, S. 1f.], [DOEG00, S. 2]. Dahingegen sinken Markteintrittsbarrieren des aktuell wachsenden Elektromobilitätsmarkts [BMW18, S. 3f.], [NATH18, S. 10–15]. Zusätzlich hat sich der Drang der Gesellschaft nach einer zunehmenden Individualisierung bzw. Personalisierung ebenfalls in der Automobilproduktion durchgesetzt, nachdem gemäß KOREN dieser Trend bereits in den 80er Jahren als Treiber für neue Paradigmen in Produktionssystemen entstand (vgl. Abbildung 1-1) [KORE10, S. 34]. Einer hohen Produktvielfalt wird durch personalisierte Produktion oder rekonfigurierbare Fertigungslinien begegnet. Bereits 2015 gaben mehr als 49 % der produzierenden Unternehmen an, dass die individuelle Anpassung von Produkten für sie einen strategischen Fokus darstellt [VDMA16, S. 44]. Dadurch sieht sich insbesondere die traditionell durch Großserien sowie durch eine technologische Pionierstellung geprägte Automobilindustrie mit zahlreichen Herausforderungen in der

Werkstoff-, Betriebsmittel- und Anlagenentwicklung konfrontiert [DOEG00, S. 1]. Diese Herausforderungen treffen v.a. den automobilen Rohbau sowie das Presswerk, welche eine hohe Kapitalbindung sowie Automatisierungsgrade $>90\%$ aufweisen [KAMP19, S. 34]. Dabei ist insbesondere die Stellung des Fahrzeugbaus für die Blechumformung hervorzuheben, welche in Deutschland mehr als die Hälfte der gesamten Produktionsleistung aller Blechformteile einnimmt, gefolgt von rund 8% für den Maschinenbau. Die Automobilindustrie ist von hoher Bedeutung für die Umformtechnik [TENN19, S. 1], [INDU20, S. 8–30]. Der Fahrzeugbau ist mit rund 50% ebenso der wichtigste Abnehmer der Werkzeugmaschinenindustrie. Innerhalb dieser ist der Werkzeug- und Formenbau die größte Teilbranche. Geprägt ist das Verhältnis zwischen Fahrzeug- und Werkzeugbau durch eine zyklische Investitionsdynamik und eine hohe Kapitalbindung in Form eines Presswerks, der Anlagentechnik sowie bauteilspezifischer Werkzeuge. [VDMA17, S. 66f.], [INDU20, S. 8–30] Durch eine zunehmende Modularisierung sowie den Entfall des Verbrennungsmotors sinken Wertschöpfungsanteile und Produkt- sowie Produktionskomplexität erheblich [VDA13, S. 38]. Daraus folgt, dass mit zunehmender Derivatisierung Risiken und Herausforderungen im Variantenmanagement zunehmen und die Profitabilität sinkt. Dadurch wird es insbesondere für OEMs im Premiumsegment schwieriger, das Umsatzpotential zu vergrößern und Differenzierungsmerkmale zu erschaffen. [MOHR13, S. 11f.]

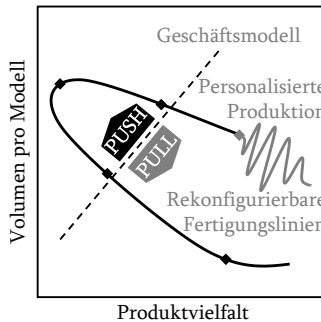


Abbildung 1-1: Paradigmen der Produktionssysteme des letzten Jahrhunderts gemäß KOREN [KORE10, S. 34]

Des Weiteren erfährt das produzierende Gewerbe im Rahmen der vierten Industriellen Revolution (Industrie 4.0) drastische Änderungen. Ein wesentliches Merkmal dieses Wandels ist die zunehmende Interaktion von Menschen, Produktionstechnik und Produkten. In der Folge wandelt sich die konventionelle Massenproduktion allmählich hin zu Produktionssystemen für Mass Customization mit höherer Flexibilität sowie On-Demand-Fertigung. Eine solche industrielle Entwicklung erfordert optimierte Konnek-

tivität, Automatisierung im Rahmen von intelligenten Produktionssystemen, On-Demand-Ansätze zusätzlich zu bisherigen Ansätzen von hocheffizienten automobilen Großserien sowie eine höhere Flexibilität [YANG18, S. 1]. Flexibilität wird in diesem Kontext als Reaktionsfähigkeit eines Produktionssystems gegenüber Änderungen verstanden [CHRY13, S. 6788]. Hierbei sind im Automobilbau insbesondere Volumen- sowie Produktflexibilität relevant [FENO14, S. 760–764]. In Hinblick auf diese Anforderungen eröffnet sich der Bedarf an einer flexibleren Gestaltung von diversen Betriebsmitteln in der Produktion. Folglich haben insbesondere Blechumformwerkzeuge einen großen Hebel hinsichtlich Flexibilität.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Eine flexiblere Werkzeuggestaltung und Werkzeugbauorganisation können durch verschiedene Aspekte erreicht werden, welche nachfolgend erläutert werden. Die lange Bereitstellungszeit von Umformwerkzeugen in der Serienproduktion ist insbesondere mit hohen Prozessanforderungen sowie einer aufwendigen Zerspanbarkeit von Werkzeugstählen zu begründen. Durch einen Wechsel zu Werkstoffen mit besserer Verarbeitbarkeit, wie beispielsweise Polymere, können Bereitstellungszeit und -kosten reduziert werden. Die Werkzeugbereitstellung beinhaltet dabei sämtliche Schritte von der Bestellung bis zur Lieferung [BURG20, S. 142435]. Aufgrund einer hohen Marktdurchdringung des Fused Filament Fabrication (FFF) Verfahrens können Polymere verschiedener Eigenschaften kostengünstig additiv hergestellt werden. Von Vorteil sind dabei u.a. geringe Anlagekosten, eine hohe Designflexibilität sowie Möglichkeiten der Funktionsintegration und die Verkürzung von Produktentwicklungszeiten. Konventionelle Werkzeugmaterialien wie Werkzeugstahl weisen durch Umformprozesse Verformungen im μm -Bereich auf, wohingegen technische Polymere ein teils elastisches und teils plastisches Deformationsverhalten aufweisen. Somit können durch den Einsatz von FFF Vorteile hinsichtlich Reibung, Verarbeitbarkeit sowie Zeit- und Kostenaufwänden in der automobilen Feinblechumformung realisiert werden. Insbesondere bei Anwendungsfällen mit kleinen Stückzahlen birgt AM von konturnahen Elementen von Umformwerkzeugen großes Potential.

Bisher wurden Deformation, Reibung und Verschleiß des Werkzeugs bei der Prozessauslegung der Feinblechumformung mittels kunststoffbasierten Werkzeugeinsätzen allerdings nicht berücksichtigt [SCHM02, S. 3]. Daher ist eine Analyse der Reibungs- und Verschleißmechanismen notwendig. Polymere weisen ebenfalls beispielsweise eine geringere Abrasionsneigung auf als konventionelle Werkzeugwerkstoffe [DOEG98, S. 48]. Des Weiteren reduzieren nachgiebige Werkzeugsysteme die Flächenpressung auf konturnahe Elemente. Dadurch wird der Aufwand für die Werkzeugeinarbeitung reduziert, denn Werkzeugeinsätze aus technischen Polymeren passen sich an lokal differierende

Flächenpressungen an und gewährleisten so eine gleichmäßige Flächenpressung im Flanschbereich [DOEG98, S. 48]. Eine Optimierung hinsichtlich Deformation und Verschleiß findet durch eine gezielte Anpassung der grundsätzlichen Material/AM-Verfahrenskombination sowie der Slicing-Einstellungen statt. Zum anderen reduzieren Geometrien, welche das Werkzeug nur schwach beanspruchen, weiter Belastung sowie Verschleiß und können anhand parametrisierter Referenzgeometrien (RG) auf weitere Anwendungsfälle übertragen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine neue Material-/Verfahrenskombination für die stückzahlflexible, ressourcenarme Bereitstellung von Werkzeugeinsätzen für das Umformen von Karosseriebauteilen aus Feinblech befähigt. Die Umformung fahrzeugtypischer Feinblechgeometrien wie beispielsweise Sicken oder Fügeflansche steht dabei im Fokus und soll als Ausgangspunkt für die Übertragung auf weitere Geometrien dienen. Aufgrund der u.a. guten Steifigkeitseigenschaften, geringen Kosten und hohen Anlagenflexibilität wird ein Ordnungsrahmen für die Kombination FFF und Poly(lactic Acid) (PLA) anhand von parametrisierten RG aufgestellt.

Zur Eingrenzung des Betrachtungsbereichs sowie zur Ausrichtung des Forschungsprozesses empfiehlt KUBICEK die Formulierung einer grundlegenden übergeordneten Forschungsfrage [KUBI77, S. 25]. Angesichts der Definition des globalen Ziels lässt sich für die vorliegende wissenschaftliche Arbeit folgende handlungsleitende Forschungsfrage formulieren:

Übergeordnete Forschungsfrage: Wie müssen additiv gefertigten Werkzeugeinsätze aus Kunststoff für die Umformung fahrzeugtypischer Feinblechgeometrien geometrisch und tribologisch ausgelegt sein?

Zur Präzisierung der Forschungsfrage und weiteren Strukturierung des forschungsmethodischen Ansatzes werden zusätzlich folgende Teilforschungsfragen formuliert:

Teilforschungsfrage 1: Was sind wesentliche Systemkomponenten und Einflussfaktoren aus den prozesstechnologischen Grundlagen? (vgl. Kapitel 2)

Teilforschungsfrage 2: Welche Erkenntnisse lassen sich aus bestehenden Ansätzen additiv gefertigter Umformwerkzeuge aus Kunststoff ziehen? (vgl. Kapitel 3)

Teilforschungsfrage 3: Wie können Einflussfaktoren der Prozess- und Werkzeugauslegung für additiv gefertigte Werkzeugeinsätze aus Kunststoff auf Basis theoretischer Analysen beschrieben werden? (vgl. Kapitel 4)

Teilforschungsfrage 4: Welche Erkenntnisse ergeben ausgewählte Modell- und anwendungsnahe Betriebsversuche zur experimentellen Bestimmung tribologischer und mechanischer Eigenschaften? (vgl. Kapitel 5)

Teilforschungsfrage 5: Wie kann ein Ordnungsrahmen für additiv gefertigte Werkzeugeinsätze aus Kunststoff für fahrzeugtypische Feinblechgeometrien gestaltet sein? (vgl. Kapitel 6)

Teilforschungsfrage 6: Können Karosseriebauteile, Logos und Schriftzüge in Kleinserien mittels additiv gefertigter Werkzeugeinsätze aus Kunststoff hergestellt werden? (vgl. Kapitel 7)

Diese Forschungsfragen beeinflussen maßgeblich die Struktur der grundsätzlichen Forschungskonzeption in der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit, welche im nachfolgenden Kapitel motiviert sowie beschrieben wird.

1.3 Forschungskonzeption und Aufbau der Arbeit

Im Hinblick auf die dargestellte Ausgangssituation und Zielsetzung ist die Raison d'Être der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit, einen Beitrag zur Zukunftsfähigkeit produzierender Unternehmen in der Automobilindustrie zu leisten, indem ein ressourcenschonender Leichtbau gefördert wird. Das übergeordnete Ziel ist dabei die Entwicklung eines Ordnungsrahmens, welche die Umformbarkeit von RG durch kunststoffbasierte additiv gefertigte Werkzeugeinsätze bewertet. Dieser Ordnungsrahmen beinhaltet Informationen über die Güte des Umformprozesses von 21 RG von fahrzeugtypischen Halbrund- sowie Trapezsicken. Diese werden genutzt, um Rückschlüsse auf die Umformbarkeit von weiteren Geometrien mittels kunststoffbasierter additiv gefertigter Umformwerkzeuge schließen zu können.

Die wissenschaftliche Forschung wird als Prozess verstanden, welcher durch die Wahl einer wissenschaftlichen Vorgehensweise beschrieben wird. Es ist dabei notwendig, die verwendeten Denkweisen sowie Methoden im Rahmen der wissenschaftlichen Vorgehensweise darzulegen und zu beschreiben, inwiefern sie zu dem Erkenntnisgewinn beitragen. Zunächst ist dazu die Einordnung in das Wissenschaftsspektrum durchzuführen. Da die Forschungsfrage der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit ein realitätsgetreues praxisorientiertes Problem mit realen Objekten darstellt, kann die Arbeit nach ULRICH UND HILL den Realwissenschaften zugeordnet werden (vgl. Abbildung 1-2), welche die Beschreibung, Erklärung und Gestaltung von Ausschnitten der Realität zum Gegenstand haben [ULRI76, S. 305]. Der interdisziplinäre Ansatz der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit versteht sich nicht als reine Theorie, sondern als realen Problemstellungen nachgehende Forschung [ULRI84, 168; 193]. Im Folgenden wird dazu das Tiefziehen mittels kunststoffbasierter additiv gefertigter Werkzeugeinsätze im Rahmen der Systemtheorie analysiert. Diese lässt sich dabei gemäß ULRICH als formale Wissenschaft zur Bezeichnung eines Systems anhand einer Struktur, Verknüpfungen der Systemelemente und dessen Verhalten definieren. Das System stellt dabei eine geordnete

Gesamtheit an Elementen dar, die sich durch veränderliche gegenseitige Beziehung identifizieren lassen. [ULRI70, S. 105] Dementsprechend wird das System Tiefziehen in die wesentliche Komponenten zerlegt und in einem erweiterten tribotechnischen System dargestellt [ULRI01, S. 243]. Die Bewertung primärer Beanspruchungseinflüsse dieses Systems in Form einer Systemanalyse erlaubt eine technisch sinnvolle sowie wirtschaftliche Werkzeugwerkstoffauswahl für spezielle tribologische Anwendungen [UETZ85, S. 12]. Beispielsweise kann eine geometrische Anpassung der Ziehkantenform Kontaktspannungen und somit Verschleiß am Werkzeug reduzieren, was zu einer längeren Standzeit führt [KUWE07, S. 89].

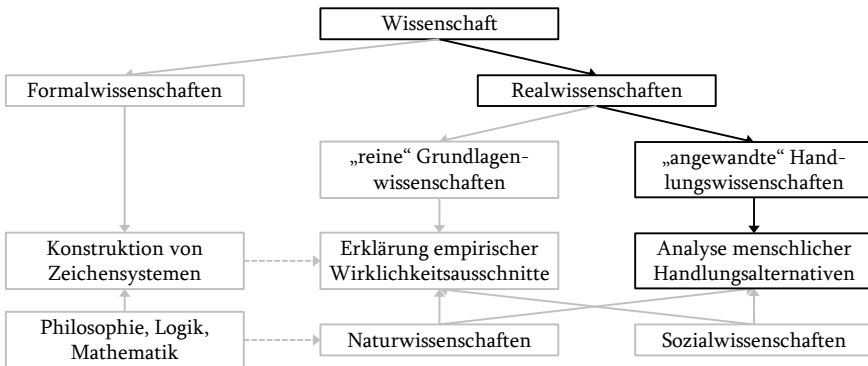


Abbildung 1-2: Wissenschaftssystematik i.A.a. ULRICH UND HILL [ULRI76, S. 305]

Der Aufbau dieser Arbeit orientiert sich zum einen am forschungsmethodologischen Ansatz für Realwissenschaften gemäß ULRICH UND HILL [ULRI76, S. 348].

Forschungsprozess angewandter Wissenschaft gem. ULRICH	Gliederung des Dissertationsvorhabens
A) Erfassen und Typisieren praxisrelevanter Probleme	1) Einleitung Ausgangssituation, Zielsetzung und Forschungskonzeption
B) Erfassen und Interpretieren problemrelevanter Theorien der empirischen Grundlagenwissenschaften	2) Prozesstechnologische Grundlagen Automobiler Karosseriebau, Leichtbau, Umformtechnik, Werkzeugbau, Additive Manufacturing, Tribologie und Simulation
C) Erfassen und Spezifizieren problemrelevanter Verfahren der Formalwissenschaften	3) Bestehende Ansätze Prototyping, Kleinserien, Vorserien, Herstellung von Ersatzteilen und Mass Customization
D) Erfassen und Untersuchen des relevanten Anwendungszusammenhangs	4) Auslegung kunststoffbasierter additiv gefertigter Werkzeugeinsätze Beschreibung der Prozess- und Werkzeugauslegung kunststoffbasierter additiv gefertigter Werkzeugeinsätze
E) Ableiten von Beurteilungskriterien, Gestaltungsregeln und -methoden	5) Experimentelle Bestimmung tribologischer und mechanischer Eigenschaften ▪ Beschreibung des erweiterten tribotechnischen Systems ▪ Auswertung von Modell- und Betriebsversuchen zur Ermittlung tribologischer Eigenschaften, Oberflächeneigenschaften und mechanischer Eigenschaften
	6) Ordnungsrahmen für kunststoffbasierte additiv gefertigte Werkzeugeinsätze ▪ Parametrisierung der Sickengeometrie ▪ Auswertung von Analogieversuchen mit anschließender rechnerischer Validierung ▪ Synthese des Ordnungsrahmens und Ableitung erster Gestaltungsempfehlungen
F) Prüfen der Regeln und Modelle im Anwendungszusammenhang	7) Anwendung und Erprobung kunststoffbasierter additiv gefertigter Werkzeugeinsätze Auswertung von Umformversuchen mit Karosseriebauteilen sowie Logos und Schriftzügen
G) Beraten und Implementieren in der Praxis	8) Schlussbetrachtung Zusammenfassung, Limitation und Ausblick

Abbildung 1-3: Forschungsprozess angewandter Wissenschaft gemäß ULRICH
[ULRI84, 168; 193]

Zum anderen ist das konsekutive Aufeinanderfolgen der Simulationen, Modell- sowie realen Umformversuche erkenntnisgesteuert, d.h. Erkenntnisse eines Versuchs werden unmittelbar in die darauffolgende Versuchsstufe integriert, um nicht zielführende Aufwände präventiv zu vermeiden. Dem Begriff der Empirie entsprechend (griechisch: Erfahrung oder Erfahrungswissen) werden Forschungs- und Versuchsstrategien erfahrungsgestützt aufgestellt und angepasst [KUBI77, S. 12f.], [TOMC92, S. 83–85]. Die Vorgehensweise der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit beginnt und endet in der

Praxis und fokussiert sich auf die Analyse eines konkreten Anwendungszusammenhangs. Infolgedessen eignet sich der systemtheoretische Forschungsansatz für die Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage [ULRI84, 168; 193]. Die Kapitelstruktur ist in Abbildung 1-3 den zugehörigen Schritten des Forschungsprozesses zugeordnet. Mit Schritt A) beginnend wird in Kapitel 1 basierend auf Praxiserfahrungen des Autors aus Entwicklungs- sowie Beratungsprojekten das Defizit an flexiblen Betriebsmittelgestaltungen motiviert und die Relevanz der Problemlösung erläutert. Darauf aufbauend werden in den Schritten B), C) und D) notwendige Grundlagen zum Verständnis problemrelevanter Themengebiete beschrieben. Mithilfe der Beschreibung der theoretischen Auslegung kunststoffbasierter additiv gefertigter Werkzeugeinsätze in Kapitel 4 wird der relevante Anwendungszusammenhang detailliert. In dem folgenden Schritt E) wird anhand der experimentellen Bestimmung tribologischer und mechanischer Eigenschaften in Kapitel 5 ein Ordnungsrahmen für kunststoffbasierte additiv gefertigte Werkzeugeinsätze in Kapitel 6 konzipiert. Dabei wird mithilfe eines erweiterten tribotechnischen Systems ein Rahmen für benötigte Modell-, Betriebs- und Analogieversuche zur Ermittlung mechanischer und tribologischer Charakteristika geschaffen. In Kapitel 6 werden parametrisierte fahrzeugtypische Feinblechgeometrien als Referenz definiert und mittels kunststoffbasierten additiv gefertigten Werkzeugeinsätzen in 1 mm DC04 und Al 5754 angeformt. Die messtechnische Auswertung wird genutzt, um einen Ordnungsrahmen aufzuspannen, in welchem Umformbarkeit sowie Prozessgrenzen hinsichtlich Geometriegestaltung und Ziehtiefe ermittelt werden können. Es werden Zusammenhänge zwischen Variablen sowie der erreichten Bauteilqualität ermittelt, welche anhand von weiteren Umformversuchen in Kapitel 7 validiert werden. Abschließend werden in Kapitel 8 neben einer Zusammenfassung der wesentlichen Inhalte Limitationen aufgezeigt und ein Ausblick auf weitere anknüpfende Forschungsarbeiten gegeben.