

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Das Tiefziehen hat eine lange Historie in der Herstellung von Gebrauchsgütern und zählt zu den bedeutendsten Fertigungsverfahren der Blechumformung. Die Möglichkeit einer hohen Automatisierung und die Produktivität machen den Prozess zu einem wirtschaftlichen Verfahren in der Großserienproduktion. Die Weiterentwicklung des Fertigungssystems ist seit Jahrzehnten ungebrochen und wird von vielfältigen Trends beeinflusst. Das Umformen komplexerer Geometrien oder höherfester Blechwerkstoffe sowie Nachhaltigkeitsaspekte sind beispielhafte Trends, welche die Weiterentwicklung des Fertigungsverfahrens bestimmen. Neben technologischen Trends stehen die Industriezweige, welche das Tiefziehen anwenden, bezüglich wirtschaftlicher Faktoren unter Druck. Insbesondere bei der Entwicklung und der Fertigung von Prototypen ist eine schnelle und kostengünstige Bereitstellung von Tiefziehteilen entscheidend. Als werkzeuggebundenes Verfahren ist das Fertigungssystem maßgeblich von der Werkzeugtechnologie abhängig. Hohe Stückzahlen in der Serienproduktion rechtfertigen die hohen Werkzeugkosten, sodass die Werkzeugkosten bei den Stückkosten weniger stark ins Gewicht fallen. Bei der Herstellung von Prototypen oder kleinen Stückzahlen zeigt sich ein gegenteiliger Effekt. An dieser Stelle sind die Werkzeugkosten der dominierende Faktor. Abbildung 1.1 verdeutlicht diesen Zusammenhang anhand einer typischen Kostenstruktur für das Tiefziehen eines Blechteils für eine Fahrzeugkarosserie. Die hohen initialen Kosten der Tiefziehwerkzeuge relativieren sich mit zunehmender Stückzahl in der Serienproduktion. Die Stückkosten zur Herstellung des Karosserieteils betragen bei einer Produktionsmenge von 80.000 Stück in etwa 5 €. Die anfänglichen Werkzeugkosten von 100.000 € fallen somit weniger stark ins Gewicht. Anders verhalten sich die Kostenanteile bei der Herstellung von kleinen Stückzahlen oder Prototypen, bei denen die Werkzeugkosten den überwiegenden Anteil an den gesamten Fertigungskosten der Blechteile ausmachen.

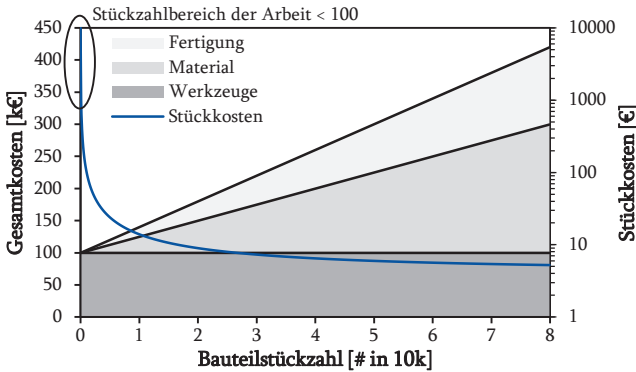


Abbildung 1.1: Typische Kostenstruktur für das Tiefziehen am Beispiel eines Sitzquerträgers einer Fahrzeugkarosserie¹

Um den bestehenden Widerspruch bei Tiefziehteilen von geringen Bauteilkosten bei geringen Stückzahlen aufzulösen, werden verschiedene Ansätze verfolgt. Ein vielversprechender, bislang noch wenig erforschter Ansatz ist die direkte Herstellung von Werkzeugen mittels der kunststoffbasierten additiven Fertigung. Bestehende Arbeiten zeigen bereits eine grundsätzliche Machbarkeit der Technologie für Umformprozesse im Allgemeinen und legen das große Potential zur Kostenreduktion dar. Hingegen ist die Anwendung von additiv gefertigten Kunststoffwerkzeugen für das Tiefziehen, insbesondere mit größerem Umformgrad und der Verwendung eines Niederhalters, noch wenig erforscht. Um Bauteile auch als technische Prototypen einsetzen zu können fehlen insbesondere Lösungsansätze, welche die Bauteilgenauigkeit verbessern oder vorhersagen. Die vorliegende Dissertation adressiert diese Problemstellung und hat zum Ziel das Verhalten additiv gefertigter Kunststoffwerkzeuge für das Tiefziehen von Feinblech systematisch zu analysieren.

1.2 Zielsetzung und Definition der Forschungsfrage

Ziel der vorliegenden Dissertation besteht darin den Einsatz von additiv gefertigten Kunststoffwerkzeugen für das Tiefziehen von Feinblech zu befähigen, um so signifi-

¹ Markus Werner, „STABIFÜ - Wirtschaftlich und flexibel Blechteile fertigen - bei sinkenden Stückzahlen“ (Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, 2015), S. 2.

kante Kosteneinsparungen in der Werkzeugherstellung für den kleinen Stückzahlbereich zu schaffen. Die entwickelten Lösungsbausteine sollen explizit die Voraussetzung für eine industrielle Nutzung der Werkzeugtechnologie schaffen. Das Forschungsziel lässt sich ferner in eine Forschungsfrage überführen, welche wie folgt definiert ist:

Wie müssen additiv gefertigte Kunststoffwerkzeuge gestaltet werden, damit sie für das Tiefziehen von Feinblech wirtschaftlich im Prototypenbau eingesetzt werden können?

Zentraler Gegenstand der Forschungsfrage ist die „Gestaltung“ der Werkzeuge, welche unter anderem die Materialauswahl, die Druckparametereinstellung und die geometrische Gestaltung bzw. die Konstruktion der Werkzeuge miteinschließt. Der Nebensatz der Forschungsfrage beschreibt vielmehr die Randbedingungen, unter denen die Entwicklung der Werkzeuggestaltung erfolgen soll. Als Umformverfahren wird das „Tiefziehen von Feinblech“ untersucht. Der Zusatz „Prototypenbau“ definiert den Stückzahlbereich sowie die Qualitätsanforderungen, welche an die Blechbauteile insbesondere in Bezug auf die Maßhaltigkeit gestellt werden. Mit der Ergänzung der „Wirtschaftlichkeit“ soll die Motivation der Kostenreduktion im Vergleich zur konventionellen Fertigung in den Fokus gerückt werden.

Ausgehend von der handlungsgeleiteten Forschungsfrage lässt sich diese in Teilforschungsfragen gliedern, um die Komplexität zu reduzieren und lösbare Teilprobleme zu schaffen. Insgesamt lassen sich fünf Teilforschungsfragen ableiten, welche in der vorliegenden Arbeit adressiert und wie folgt definiert werden:

1. Welche FLM²-Druckparameter und -materialien eignen sich zur Herstellung von Tiefziehwerkzeugen?
2. Welche Tiefziehaufgaben können mittels der untersuchten Werkzeugtechnologie umgesetzt werden?
3. Welcher Stückzahlbereich kann durch die Werkzeugtechnologie abgebildet werden bzw. wie hoch ist der Werkzeugverschleiß?
4. Welche Bauteilgenauigkeit kann durch den Einsatz additiv gefertigter Kunststoffwerkzeuge erreicht werden?
5. Wie können die Qualitätsanforderungen durch die Optimierung der Bauteilgenauigkeiten erfüllt werden?

² Fused Layer Modeling (FLM) ist ein kunststoffbasiertes additives Fertigungsverfahren (vgl. Kapitel 2.2.2).

1.3 Forschungsmethodik

Die vorliegende Dissertationsschrift stellt die Dokumentation der Ergebnisse eines Forschungsprozesses dar. Da wissenschaftliche Forschung nie ohne Wertung erfolgt, ist es notwendig die Erkenntnisperspektive des Forschenden sowie das methodologische Vorgehen im Vorhinein zu definieren, um den Forschungsprozess nachvollziehbar zu machen³. Bereits die in Abschnitt 1.2 definierten Forschungs- bzw. Teilforschungsfragen stellen eine Grundannahme und somit eine Subjektivität des Autors dar, die weder wahr noch unwahr sein kann. ULRICH schreibt hierzu: „Jeder Ansatz stellt ja ein Vor-Urteil dar, mit dem der wissenschaftliche Erkenntnisprozess in Angriff genommen wird, und er begrenzt zwangsläufig die möglichen Erkenntnisse, die man durch diesen Prozess gewinnen wird“⁴.

Als Grundlage zur Bestimmung der Erkenntnisperspektive dient die Einordnung der vorliegenden Arbeit in die Wissenschaftssystematik nach ULRICH UND HILL⁵. Die Aufgliederung der Wissenschaft in die einzelnen Kategorien ist in Abbildung 1.2 abgebildet. Demnach lässt sich die Wissenschaft in die Teilbereiche der Formal- und Realwissenschaften gliedern.

³ Volker A. Binder und Jan Kantowsky, *Technologiepotentiale* (Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1996). doi:10.1007/978-3-663-09032-8, S. 3–4.

⁴ Hans Ulrich, Hrsg., *Management*, Schriftenreihe Unternehmung und Unternehmensführung 13 (Bern, Stuttgart: Haupt, 1984), S. 31.

⁵ Peter Ulrich und Wilhelm Hill, „Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I).“ *WiSt - Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, Nr. 7 (1976).

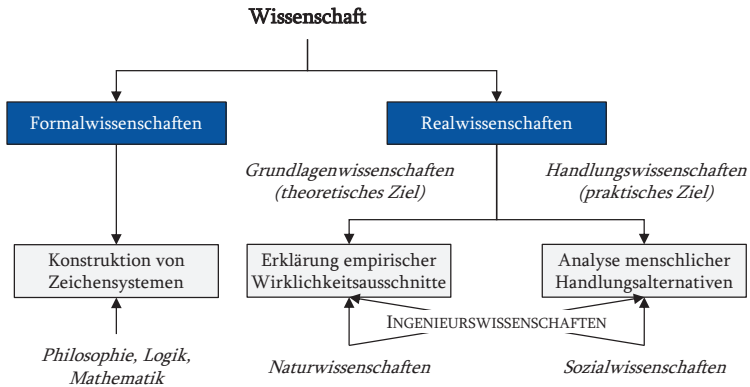


Abbildung 1.2: Wissenschaftssystematik in Anlehnung an ULRICH UND HILL⁶

Die Formalwissenschaften, zu deren Vertretern die Philosophie, Logik und Mathematik zählen, beschäftigen sich mit der Konstruktion von Zeichensystemen und weisen keinen Realitätsbezug auf. Die Überprüfung der *logischen Wahrheit* steht dabei im Zentrum ihrer Tätigkeiten⁷. Demgegenüber befassen die Realwissenschaften sich zusätzlich mit der *faktischen Wahrheit* und dem Ziel die „[...] subjektiv wahrgenommene Wirklichkeitsausschnitte zu explizieren, zu generalisieren und [...]“ zu gestalten⁸. Ist die Zielperspektive theoretischer oder praktischer Natur, lassen sich die Realwissenschaften entsprechend in die Grundlagenwissenschaften (Naturwissenschaften) und die Handlungswissenschaften (Sozialwissenschaften) einteilen⁹. Die Ingenieurwissenschaften, zu denen die vorliegende Arbeit zählt, sind Teil der Realwissenschaften. Sie lassen sich jedoch nicht eindeutig in die Grundlagen- und Handlungswissenschaften einordnen, da die Ingenieurwissenschaften Aspekte beider Bereiche umfassen kann. Während ULRICH UND HILL die Ingenieurwissenschaften dem technischen Bereich der Handlungswissenschaften zuordnen¹⁰, zählen SCHUH UND WARSCHAT die Ingenieurwissenschaften zu den Naturwissenschaften¹¹. Aus diesem Grund lassen sich

⁶ Ulrich und Hill, „ULRI76,“ S. 305.

⁷ Ebd.

⁸ Ebd., S. 306.

⁹ Ebd., S. 305.

¹⁰ Ebd.

¹¹ Günther Schuh und Joachim Warschat, Hrsg., *Potenziale einer Forschungsdisziplin Wirtschaftsingenieurwesen*, Acatech-Diskussion (München: Utz, 2013), S. 36.

die Ingenieurwissenschaften auch als Bindeglied beider Teilbereiche verstehen. Übereinstimmend rücken viele Wissenschaftstheorien die betriebliche Praxis in das Zentrum wissenschaftlicher Forschung im Bereich der Ingenieurwissenschaften. Das wesentliche Ziel besteht darin, Lösungen zu praktischen Problemen zu entwickeln¹². Die Interaktion mit der Praxis wird als wünschenswert angesehen, damit sich die entwickelten Lösungsansätze auch auf ihre Realisierbarkeit überprüfen lassen¹³. Nach ULRICH soll der Forschungsprozess in der Praxis beginnen und durch die Übertragung der entwickelten Lösungen in der Praxis enden¹⁴.

Auch diese Arbeit weist einen ausgeprägten praktischen Anwendungsbezug auf, da der Ursprung zur Idee der Arbeit innerhalb praxisnaher Forschungsprojekten sowie Industrieprojekten bei produzierenden Unternehmen entstand. Die definierten Forschungsfragen aus Kapitel 1.2 adressieren die Problemstellung aus der Praxis hinsichtlich der Entwicklung einer wirtschaftlichen Werkzeugtechnologie bei geringen Stückzahlen. Aufgrund des Praxisbezugs der Arbeit sowie der Problemlösungsorientiertheit eignet sich die *Strategie angewandter Forschung* nach ULRICH als Forschungsprozess der Arbeit und wird als methodisches Rahmenwerk genutzt¹⁵. Auch SCHUH UND WARSCHAT messen diesem Forschungsprozess eine hohe Bedeutung bei, da dieser die Forschung sowohl aus dem praxisorientierten als auch aus dem wissenschaftsorientierten Blickwinkel betrachtet¹⁶. Die *Strategie angewandter Forschung* nach ULRICH sowie der hieraus abgeleitete Forschungsprozess der Arbeit ist in der nachstehenden Abbildung 1.3 dargestellt.

¹² Joan Ernst van Aken und Hans Berends, *Problem Solving in Organizations* (Cambridge University Press, 2018). doi:10.1017/9781108236164, S. 224.

¹³ Schuh und Warschat, *SCHUI3*, S. 29.

¹⁴ Ulrich, *ULRI84*, S. 192.

¹⁵ Ebd., S. 192–95.

¹⁶ Schuh und Warschat, *SCHUI3*, S. 43.

Strategie angewandter Forschung nach ULRICH		Forschungsprozess der vorliegenden Arbeit
Praxis	1 Erfassung und Typisierung praxisrelevanter Probleme	Formulierung des Praxisdefizits auf Basis praxisnahe Forschungs- und Industrieprojekten
	2 Erfassung und Interpretation problemrelevanter Theorien und Hypothesen der empirischen Grundlagenwissenschaften	Erfassung und Auswertung bestehender Ansätze zum additiven Werkzeugbau
	3 Erfassung und Spezifizierung problemrelevanter Verfahren der Formalwissenschaften	Nutzung bestehender Verfahren zur Lösung des Praxis- und Theoriedefizits
	4 Erfassung und Untersuchung des relevanten Anwendungszusammenhangs	Untersuchung der Eignung additiv gefertigter Kunststoffwerkzeuge für das Tiefziehen
	5 Ableitung von Beurteilungskriterien, Gestaltungsregeln und -modellen	Entwicklung eines Modells zur Vorhersage & Optimierung von Bauteilgenauigkeiten
	6 Prüfung der Regeln und Modelle im Anwendungszusammenhang	Prüfung des entwickelten Modells anhand von praxisrelevanten Fallbeispielen
	7 Beratung der Praxis	Übertragung der gewonnen Erkenntnisse durch bilaterale Industrieprojekte und Seminare

Abbildung 1.3: Forschungsprozess der vorliegenden Arbeit nach ULRICH¹⁷

Der Forschungsprozess beginnt mit der Erfassung und Typisierung praxisrelevanter Probleme (1), die in dieser Arbeit auch Praxisdefizit genannt werden und auf Fallbeispielen aus praxisnahen Forschungs- und Industrieprojekten beruhen. Hieraus lässt sich bereits das Ziel der Arbeit bzw. der Bedarf der industriellen Praxis nach einer wirtschaftlichen Werkzeugtechnologie für das Tiefziehen von Feinblech für kleine Stückzahlen ableiten. Ausgehend von dem definierten Praxisdefizit, werden problemrelevante Theorien (2) und Verfahren (3) der Grundlagen- und Formalwissenschaften untersucht. Dies erfolgt durch eine systematische Literaturrecherche von bestehenden Ansätzen, die zur Lösung des Praxisproblems beitragen können.

Im Anschluss an die Analyse bestehender Ansätze wird die Forschungslücke bzw. das Theoriedefizit hergeleitet. Zur Untersuchung des Anwendungszusammenhangs (4) sowie der Entwicklung von Modellen (5), die den wesentlichen Erkenntnisgewinn der Arbeit darstellen, werden Methoden der explorativen Forschung in Anlehnung an KUBICEK verwendet. Dieser Prozess ist im Wesentlichen durch eine iterative Vorgehensweise sowie die Orientierung an handlungsgeleiteten Forschungsfragen geprägt¹⁸. In der *Explorationsstrategie* nach KUBICEK wird die Forschung als ein Lernprozess verstanden, bei dem die Erfahrungsgewinnung durch theoretisch geleitete Fragen erzielt wird¹⁹. Dabei müssen die Fragen nicht direkt zu gesicherten Aussagen über die Realität

¹⁷ Ulrich, *ULRI84*, S. 193.

¹⁸ Richard Köhler, *Empirische und handlungstheoretische Forschungskonzeptionen in der Betriebswirtschaftslehre: Bericht über d. Tagung in Aachen, März 1976*, 1. Aufl. (Stuttgart: Poeschel, 1977), S. 28.

¹⁹ Köhler, *KÖHL77*, S. 13–14.

führen, sondern können erneut zu „[...] weiterführenden Fragen leiten, die ihrerseits wiederum die Gewinnung von neuem Erfahrungswissen fordern“²⁰. Die in Abschnitt 1.2 beschriebenen Forschungsfragen stellen dabei die letzte Iteration sämtlicher im Verlauf des Forschungsprozess aufgestellter Fragen da. Die ersten Iterationen, die unter anderem die Klärung der grundsätzlichen Machbarkeit der Werkzeugtechnologie oder die Vermeidung der Faltenbildung zum Ziel haben, stehen nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit und werden daher nicht näher dokumentiert.

Der Forschungsprozess schließt mit der Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse (6) sowie mit der Beratung der Praxis (7) ab. Hierzu werden die Erkenntnisse der Arbeit sowie das entwickelte Modell anhand von Fallbeispielen aus der Praxis geprüft. Anhand von bilateralen Projekten mit Industrieunternehmen sowie Seminaren werden die zentralen Erkenntnisse der Arbeit in die Praxis überführt. Nach ULRICH soll die letzte Phase des Forschungsprozesses keinen zeitlichen Schlusspunkt darstellen, sondern muss vielmehr fortlaufend wiederholt werden²¹. Hierdurch lassen sich weiterführende Forschungsthemen und -arbeiten ableiten, die wiederum die Lösung weiterer praxisrelevanter Probleme zum Ziel haben.

1.4 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit orientiert sich an dem zuvor beschriebenen Forschungsprozess nach ULRICH. Demnach beginnt der Forschungsprozess mit der Erfassung und Typisierung praxisrelevanter Probleme und endet mit der Prüfung der gewonnenen Erkenntnisse im Anwendungszusammenhang sowie der Beratung der Praxis. Im Anschluss an die Erfassung relevanter Grundlagen und nach der Analyse bestehender Ansätze erfolgt die anwendungsorientierte Lösungsfindung in Anlehnung an den explorativen Forschungsprozess nach KUBICEK. Die *Strategie angewandter Forschung* nach ULRICH sowie die hieraus abgeleitete Gliederung der Arbeit ist in Abbildung 1.4 dargestellt.

²⁰ Ebd., S. 28.

²¹ Ulrich, *ULRI84*, S. 194.

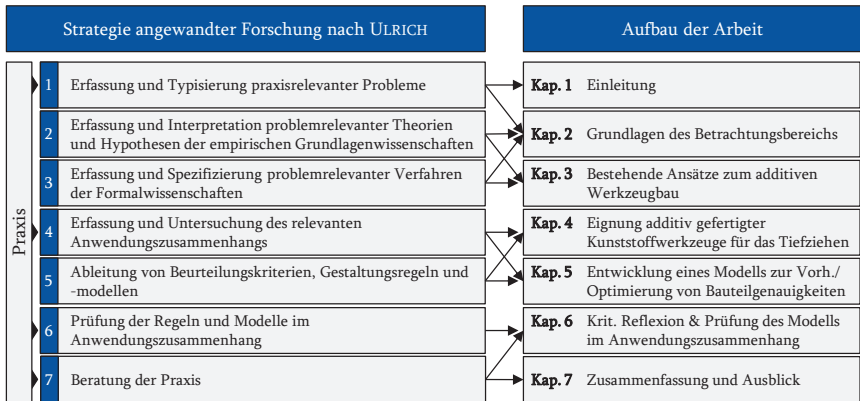


Abbildung 1.4: Gliederung der Arbeit nach ULRICH²²

Die Einleitung umfasst die Motivation sowie die Zielsetzung der Arbeit und legt die Ausgangssituation für den Themenbereich der Arbeit dar. Des Weiteren wird der forschungsmethodische Rahmen bzw. die wissenschaftliche Vorgehensweise hergeleitet und erläutert sowie die Gliederung der Arbeit dargestellt.

In Kapitel 2 werden die Grundlagen des Betrachtungsbereichs, bestehend aus den relevanten Grundlagen- und Formalwissenschaften, zum besseren Verständnis der Arbeit und als Ausgangspunkt zur Lösungsfindung beschrieben. Diese setzen sich aus den technologischen Grundlagen des Tiefziehens, der additiven Fertigung von Kunststoffkomponenten sowie den Werkzeugsystemen für das Tiefziehen zusammen. Das zweite Kapitel konkretisiert die in der Einleitung beschriebene Problemstellung und fasst abschließend den Handlungsbedarf aus der Praxis zusammen.

Im dritten Kapitel werden mit Hilfe einer strukturierten Literaturrecherche bestehende Ansätze zum additiven Werkzeugbau analysiert und bewertet. Es werden die relevanten Forschungsaktivitäten beschrieben, welche zur Lösungsfindung beitragen. Neben der Beschreibung von Arbeiten, welche konventionell verarbeitete Kunststoffe als Werkzeugwerkstoff für das Tiefziehen untersuchen, werden auch aktuelle Ansätze beschrieben, welche die additive Fertigung zur Herstellung der Kunststoffwerkzeuge heranziehen. Ausgehend von den analysierten Forschungsaktivitäten wird zum Abschluss des dritten Kapitels der Forschungsbedarf der vorliegenden Arbeit hergeleitet.

²² Ulrich, *ULRI84*, S. 193.

Kapitel 4 bildet die Grundlage für die Anwendung additiv gefertigter Kunststoffwerkzeuge für das Tiefziehen von Feinblech. Anhand von Normversuchen erfolgt in Kapitel 4.1 zunächst die Charakterisierung verschiedener FLM-Materialien hinsichtlich ihrer Eignung als Werkzeugwerkstoff. Basierend auf der Ermittlung geeigneter 3D-Druckparameter zur Werkzeugherstellung (Kapitel 4.1.2) erfolgt anschließend die Untersuchung weiterer 3D-Druckmaterialien, insbesondere auch faserverstärkter Materialien unter Berücksichtigung der Anisotropie der hergestellten Probekörper (Kapitel 4.1.3). Aus den Erkenntnissen der Normversuche wird eine Empfehlung geeigneter 3D-Druckmaterialien und -parametern zur Werkzeugherstellung hergeleitet, welche in Kapitel 4.1.4 zusammengefasst sind. Im Anschluss an die Materialcharakterisierung wird anhand einer Simulationsstudie untersucht, welchen Einfluss verschiedene Tiefziehparameter auf die Werkzeugbelastung haben, um den Anwendungsbereich der untersuchten Werkzeugtechnologie abzuschätzen und die nachfolgenden Tiefziehversuche zu definieren (Kapitel 4.2). Die praktischen Tiefziehversuche gliedern sich in die Kapitel 4.3 – Variation der Werkzeugmaterialien und 4.4 – Variation der Blechmaterialien und haben zum Ziel die Leistungsfähigkeit der untersuchten Werkzeugtechnologie hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeiten sowie dem auftretenden Werkzeugverschleiß zu bestimmen.

Um den Anwendungsbereich der Werkzeugtechnologie zu erweitern, erfolgt im fünften Kapitel die Entwicklung eines Kompensationsmodells zur Optimierung von Bauteilgenauigkeiten. Die simulierte elasto-plastische Werkzeugverformung wird anhand einer Vektorrechnung in eine kompensierte Geometrie umgewandelt. Die Leistungsfähigkeit des entwickelten Kompensationsmodells wird abschließend durch einen praktischen Tiefziehversuch aufgezeigt.

Kapitel 6 hat zum Ziel den Erkenntnisgewinn der Arbeit anhand realer Praxisbeispiele aus der produzierenden Industrie anzuwenden. Die Leistungsfähigkeit der Werkzeugtechnologie einschließlich des entwickelten Kompensationsmodells wird an zwei Fallbeispielen, einem Blechteil einer Fahrzeugkarosserie (Kapitel 6.1) sowie einer Gehäusekomponente für einen Luftkühler (Kapitel 6.2) bestimmt. Neben der Darstellung der technischen Leistungsfähigkeit, verdeutlicht eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung das Potential zur Kostenreduktion der Werkzeugtechnologie.

Die vorliegende Arbeit schließt im siebten Kapitel mit einer Zusammenfassung sowie einem Ausblick für weiterführende Forschungsaktivitäten ab.