

***Forschungsberichte***

---

***iwb***

***Band 178***

***Johann von Pieverling***

***Ein Vorgehensmodell zur  
Auswahl von Konturfertigungs-  
verfahren für das Rapid Tooling***

---

***herausgegeben von  
Prof. Dr.-Ing. M. F. Zäh  
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart***

---

***Herbert Utz Verlag*** 

# Forschungsberichte iwb

Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen  
und Betriebswissenschaften  
der Technischen Universität München

herausgegeben von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Technische Universität München

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation  
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte  
bibliografische Daten sind im Internet über  
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2003

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch  
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des  
Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der  
Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege  
und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben,  
auch bei nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2003

ISBN 3-8316-0230-1

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089/277791-00 - Fax: 089/277791-01

# I Inhaltsverzeichnis

II	Abbildungsverzeichnis .....	iv
III	Tabellenverzeichnis .....	ix
IV	Abkürzungsverzeichnis.....	x
1	Einleitung.....	1
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	3
1.2	Vorgehensweise .....	6
2	Die Herstellung von Prototypen- und Kleinserienwerkzeugen.....	9
2.1	Begriffsdefinitionen .....	9
2.2	Ablauf der Prototypenwerkzeugherstellung.....	13
2.3	Fertigungsverfahren zur Prototypenwerkzeugherstellung .....	14
2.3.1	Indirekte Fertigungsverfahren zur Konturherstellung.....	16
1.1.2	Direkte Fertigungsverfahren zur Konturherstellung .....	27
1.1.3	Konturfertigungsverfahren im Forschungsstadium.....	43
1.1.4	Zusammenfassung .....	45
3	Der Einsatz von Prototypenwerkzeugen in der Produktentwicklung.....	46
3.1	Anwendungsfälle von Prototypen- und Kleinserienwerkzeugen.....	46
3.1.1	Überprüfung der Produkteigenschaften.....	48
3.1.2	Parallele Produkt- und Prozessentwicklung.....	48
3.1.3	Markterprobung.....	49
3.2	Defizite der industriellen Herstellung von Prototypen .....	50
3.2.1	Modellbau.....	50
3.2.2	Werkzeug- und Formenbau .....	54

3.2.3	Virtual Prototyping.....	56
3.3	Unterstützung zur Technologieauswahl .....	56
3.3.1	Benchmarkbewertung generativer und abtragender Fertigungsverfahren .....	57
3.3.2	Technologiekalender .....	57
3.3.3	Strategische Bewertung von generativen und konventionellen Fertigungsverfahren .....	58
3.3.4	Zweistufige Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl von Rapid Tooling-Prozessketten.....	58
3.3.5	Bewertung der Forschungsansätze .....	59
4	Die Strategie Rapid Tooling.....	61
4.1	Leistungsumfang von Rapid Tooling .....	61
4.2	Anforderungen und Vorgehen .....	62
4.3	Methodenbereitstellung .....	63
4.3.1	Organisatorische Maßnahmen.....	64
4.3.2	Modulares Werkzeugkonzept.....	65
4.3.3	Anwendung von CAx-Technologien .....	66
4.3.4	Auswahlmethode zur Konturfertigung.....	67
4.4	Zusammenfassung des Gesamtkonzeptes.....	69
5	Erarbeitung einer Auswahlmethode für Konturfertigungsverfahren .....	71
5.1	Erstellung der Anforderungsliste .....	71
5.1.1	Kritische Anforderungen.....	73
5.1.2	Objektive Anforderungen.....	74
5.1.3	Subjektive Anforderungen .....	77

---

5.2	Vorauswahl geeigneter Konturfertigungsverfahren.....	79
5.2.1	Vorstellung der Vorauswahlmethode.....	79
5.2.2	Gewichtung der Bewertungskriterien.....	82
5.2.3	Wertefunktionen der Anforderungskriterien.....	86
5.2.4	Ergebnis der Verfahrensvorauswahl.....	90
5.3	Erarbeitung der geometriespezifischen Zuordnungsmethode.....	94
5.3.1	Strukturierung der Zuordnungsmethode.....	96
5.3.2	Schritt 1: Analytische Zuordnung der Konturfertigungsverfahren..	98
5.3.3	Schritt 2: Zuordnung von Konturfertigungsverfahren anhand von Kennzahlen.....	102
5.3.4	Zusammenfassung der Methode zur Verfahrenszuordnung.....	116
6	Prototypenwerkzeug für ein Stichsägebauteil.....	121
6.1	Ausgangssituation des Projektes.....	121
6.2	Konstruktiver Aufbau des Prototypenwerkzeuges.....	122
6.3	Separation der Formelemente und Zuordnung zu Fertigungsverfahren	124
6.4	Realisierte Herstellung des Prototypenwerkzeuges.....	129
6.5	Exemplarische Kosten-Nutzen Betrachtung.....	131
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	133
8	Literaturverzeichnis.....	135
9	Anhang.....	154
9.1	Darstellung der untersuchten Bauteilgeometrien.....	154
9.2	Ermittlung der Kennzahlen.....	160

## 1 Einleitung

Die Wettbewerbssituation der industriellen Anbieter ist in den letzten Jahren durch Veränderung des unternehmerischen Umfeldes anspruchsvoller geworden. Die Gründe, die zu diesen beschleunigten Umfeldveränderungen führen, sind vielschichtig. Zum einen ist die zunehmende Globalisierung zu nennen, die Unternehmen einem verstärkten Wettbewerb aussetzt (*Delphi 1998*). Eine weitere Herausforderung ergibt sich aus der rasanten technischen Entwicklung in nahezu allen Bereichen der Industrie. Dieser rasche technologische Fortschritt führt zu kürzeren Produktlebenszyklen, während die Produkte zusätzlich komplexer werden (*Milberg 1998*). Gleichzeitig steigt aufgrund des zunehmenden Individualitätsbewusstseins der Käufer die Variantenvielfalt der Produkte. Infolgedessen nimmt jedoch die für jede Produktvariante produzierte Stückzahl ab, so dass die Erfahrungskurve zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Produktion nicht mehr in gleichem Maße wie in der Vergangenheit durchlaufen werden kann (*Reichwald & Koller 1996, S.242 ff.*). Diese veränderten Randbedingungen treffen vor allem exportorientierte Volkswirtschaften mit technologisch anspruchsvollen Produkten, da hier eine besonders tiefe Wertschöpfung vorliegt. Für den weiteren Erfolg deutscher Industrieunternehmen ist daher ausschlaggebend, ob sie durch die Steigerung ihrer Wandlungsfähigkeit dieses turbulente Umfeld beherrschen lernen und sogar zu ihrem Vorteil ausnutzen können (*Reinhart u.a. 1999*).

*Reinhart 2000* definiert Wandlungsfähigkeit in diesem Zusammenhang als die Kombination aus Flexibilität und Reaktionsfähigkeit. Um Wandlungsfähigkeit zu erreichen, müssen Unternehmen u.a. schnell und kundenorientiert neue Produkte auf dem Markt positionieren. Damit kommt der Innovationsfähigkeit der Unternehmen eine überlebenswichtige Bedeutung zu. Die Produktentwicklung erweist sich als Schlüsselfaktor für den Erfolg eines Unternehmens (*Mack 1997*). Um den steigenden Anforderungen begegnen zu können, werden im Rahmen der Produktentwicklung vermehrt neue Methoden, Prozessketten und Werkzeuge eingesetzt. Dazu zählen u.a. organisatorische Maßnahmen wie z.B. das Simultaneous oder Cooperative Engineering, der Einsatz von Rechnerhilfsmitteln wie die Finite Element Methode oder neuartige Fertigungstechnologien, wie das Rapid Prototyping. Ziel dieser Maßnahmen ist die frühzeitigen Verifikation der Produkteigenschaften durch die Vorverlagerung von Erkenntnisprozessen aus dem beabsichtigten Fertigungsprozess, um kostspielige und zeitintensive Fehlerquellen zu vermeiden.

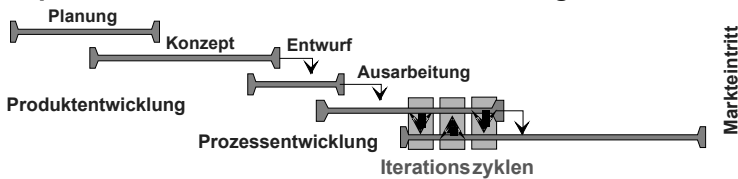
Urformende Fertigungsprozesse wie das Spritz- und Druckgießen bieten ein günstiges Kostenverhalten über die Losgröße sowie großen geometrischen Gestaltungsspielraum, weshalb ein erheblicher Anteil an Produkten durch diese Verfahren erzeugt wird. Zur Effizienzsteigerung der Produktentwicklung werden dabei schon in frühen Phasen verstärkt Teile benötigt, die den späteren Serienprodukten möglichst identisch sind. Verbreitet ist bislang das Vorgehen, diesen Bedarf durch mittels Modellbauverfahren hergestellter Ersatzmodelle abzudecken. Bei Verwendung der späteren Serienfertigungsverfahren bereits während der Herstellung dieser Prototypen sind weitere Potentiale erschließbar. Da diese Prototypen den serienidentischen Werkstoff aufweisen, ist die Hauptanforderung, die Übertragbarkeit der mechanischen Eigenschaften von Prototypen auf Serienbauteile erfüllt. Gleichzeitig können die anvisierten Fertigungsprozesse überprüft werden und damit eine Parallelisierung von Produkt- und Prozessentwicklung erfolgen. Zusätzlich steht aufgrund des Massenfertigungscharakters der eingesetzten Fertigungsprozesse eine viel größere Anzahl an Prototypenteilen zur Verfügung, die für eine Vielzahl an Versuchen sowie zur Adaption von Folgeprozessen eingesetzt werden können. Dies führt zu einer weiteren Verkürzung und Ver-ringering der Iterationsschleifen in der Produktentwicklung.

Der frühzeitige Einsatz von Urformverfahren während der Produktentwicklung setzt jedoch die kurzfristige Verfügbarkeit entsprechender Spritz- und Druckgießwerkzeuge voraus. Nur unter Verwendung dieser Betriebsmittel können die technischen Anforderungen der Zielprozesse erfüllt werden. Die Industriebranche des Werkzeug- und Formenbaus muss zur Durchführung derartiger Projekte als Partner der Produktentwicklung eine veränderte Rolle mit neuen Anforderungen einnehmen. Dazu muss der Werkzeug- und Formenbau durch ein geeignetes Vorgehensmodell in die Lage versetzt werden, insbesondere schneller und flexibler als bisher Werkzeuge anzubieten, die das individuell geforderte Leistungsprofil der entwicklungsbegleitenden Prototypen- und Kleinserienfertigung abdecken.

## 1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Zur Lösung der insbesondere terminlichen Probleme in der Produktentwicklung, die sich durch einen starren, streng sequentiellen Ablauf ergeben (*Horvath u.a. 1994*), wurden in der Vergangenheit verschiedene Methoden vorgeschlagen. Im Kern zielen diese Methoden auf eine Neuordnung und Reduzierung der Entwicklungsphasen unter Integration aller beteiligten Partner ab (*Scholl & Dittmar 1996*).

### Sequentieller Ablauf der Produktentwicklung



### Integrierter Ablauf der Produktentwicklung

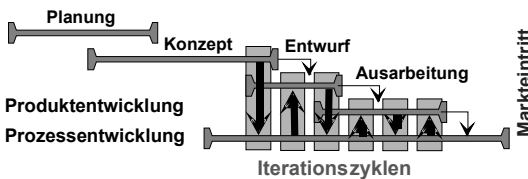


Abbildung 1-1: Steigerung der Effizienz der Produktentwicklung

Als wichtiges Bindeglied zu Zwecken der frühzeitigen Validierung der Konstruktion und der Vorverlagerung von Erkenntnissen wurde dabei die entwicklungsbegleitende Herstellung von Modellen und Prototypen identifiziert (*Clark & Fujimoto 1992*). Unterstützt wurde dieses Vorgehen durch technische Neuentwicklungen auf dem Gebiet sogenannter generativer Fertigungsverfahren oder Rapid Prototyping Technologien, die gegenüber dem konventionellen Modellbau deutlich geringere Prozesszeiten zur Herstellung körperlicher Prototypen ermöglichen. Die technische Weiterentwicklung dieser Prototypenverfahren verbreiterte insbesondere durch die Verwendung metallischer Materialien den Einsatzbereich. Neben der Fertigung von Prototypen konnten nun auch die formgebenden



Konturelemente für urformende Fertigungsprozesse hergestellt werden. Trotz der hohen Stabilitätsanforderungen an Formwerkstoffe sowohl im Kunststoffspritzguss als auch im Leichtmetalldruckguss wurden für den Prototypenbedarf ausreichende Stückzahlen im Serienfertigerungsverfahren mit dem Serienmaterial erzielt (Breitinger & Pieverling 1999).

Parallel zu dieser Entwicklung wurden die im Werkzeug- und Formenbau klassischerweise eingesetzten abtragenden Fertigerungsverfahren, insbesondere das Fräsen weiterentwickelt. Durch kontinuierliche Verbesserung nahezu aller Maschinenkomponenten sowie der Schneidstoffe und Programmiersysteme etablierte sich das zunächst als unwirtschaftlich eingestufte Hochgeschwindigkeitsfräsen (Schulz 1996). Weitere Produktivitätssteigerungen wurden durch die Verwendung von Graphit als Elektrodenmaterial für die Senkerosion erreicht.

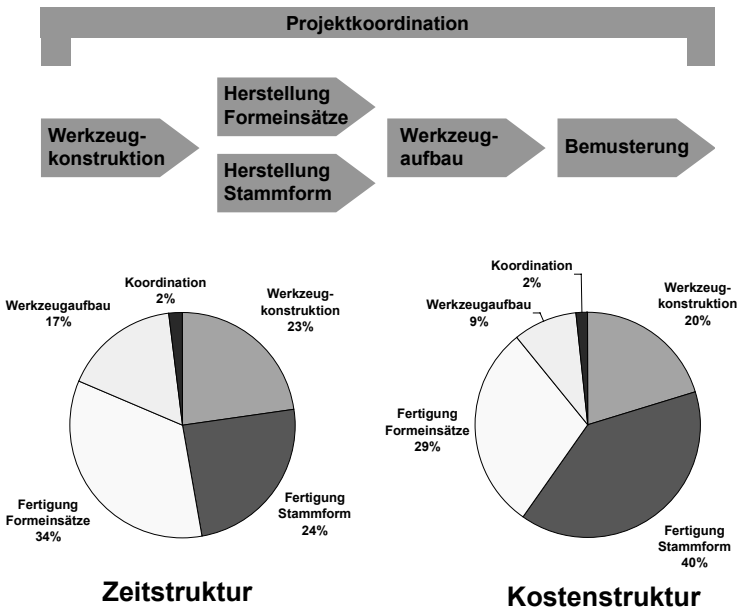


Abbildung 1-2: Ablaufplan sowie Zeit- und Kostenstruktur von Werkzeugbauprojekten (Fährer 1999)

Analog zur Bezeichnung Rapid Prototyping wurde anfänglich in der Literatur für den Einsatz generativer Fertigungsverfahren im Werkzeug- und Formenbau der Begriff Rapid Tooling verwendet (*Gebhardt 1996*). Nach dem heutigen Begriffsverständnis beinhaltet Rapid Tooling im Gegensatz zum Rapid Prototyping jedoch nicht nur einzelne Fertigungsverfahren. Für die Etablierung einer schnellen, entwicklungsbegleitenden Herstellung von Prototypen- und Kleinserienwerkzeugen ist vielmehr ein ganzheitliches Vorgehensmodell, das alle möglichen Fertigungsverfahren einbezieht, erforderlich. Trotz weitgehender Verfügbarkeit einzelner technischer Voraussetzungen sowohl bei Modell-, als auch bei Werkzeug- und Formenbaubetrieben sind sie als potentielle Anbieter von Prototypenwerkzeugen nur unvollständig in der Lage, die parallele Produkt- und Prozessentwicklung mit entsprechenden Betriebsmitteln zu unterstützen (*Breitinger & Pieverling 1997A*).

Die Fertigung der formgebenden Elemente bei urformenden Werkzeugen stellt mit ca. 34% Zeitanteil und 29% Kostenanteil der Wertschöpfung einen erheblichen Faktor hinsichtlich Durchlaufzeit und Erstellungskosten dar. Insbesondere auf diesem Sektor können erhebliche Einsparpotentiale erschlossen werden (*Fährer 1999*). Bei vielen Anwendern ist jedoch das notwendige Technologie Know-how der mittlerweile erheblichen Bandbreite potentieller Prozessketten nicht vorhanden. Um dieses Defizit zu eliminieren, wird im Rahmen dieser Dissertation eine Methode zur Auswahl der zur Verfügung stehenden Konturfertigungsverfahren entwickelt. Aufgrund der beabsichtigten praxisnahen Ausrichtung der Auswahlmethode auf die Randbedingungen des Werkzeug- und Formenbaus werden die Anwender in die Lage versetzt, aus der Vielzahl generativer und abtragender Fertigungsverfahren auf Basis der gestellten Anforderungen das für das jeweilige Konturelement effizienteste Vorgehen auszuwählen.

Eingebettet wird diese Auswahlmethode in das Gesamtkonzept einer Strategie für eine entwicklungsbegleitende Herstellung von Prototypen- und Kleinserienwerkzeugen für die Applikationen Kunststoff-Spritzguss und Leichtmetall-Druckguss. Diese im weiteren Verlauf in Übereinstimmung mit *Reinhart u.a. 1998A* als Rapid Tooling bezeichnete Strategie umfasst die gesamte Prozesskette der Prototypenwerkzeugfertigung. Sie beginnt mit der Konstruktion der Werkzeuge auf Basis fertigungsgerechter CAD-Bauteildaten und beinhaltet weiterhin die Arbeitsvorbereitung bezüglich des Einsatzes innovativer Fertigungsverfahren bis hin zur Bemusterung der Bauteile.

## 1.2 Vorgehensweise

Im ersten Kapitel wurden die derzeitige Problematik zur Verkürzung der Produktentwicklung sowie prinzipielle Ansätze zur Auflösung der Defizite dargestellt. Dabei wurde insbesondere die Notwendigkeit erläutert, die Schlüsselbranche des Werkzeug- und Formenbaus als Nahtstelle zwischen Entwicklung und Produktion durch ein geeignetes Vorgehensmodell zur integrierten Prototypenwerkzeugfertigung als Entwicklungspartner zu etablieren. Dieses Vorgehensmodell soll im Rahmen dieser Arbeit entwickelt werden.

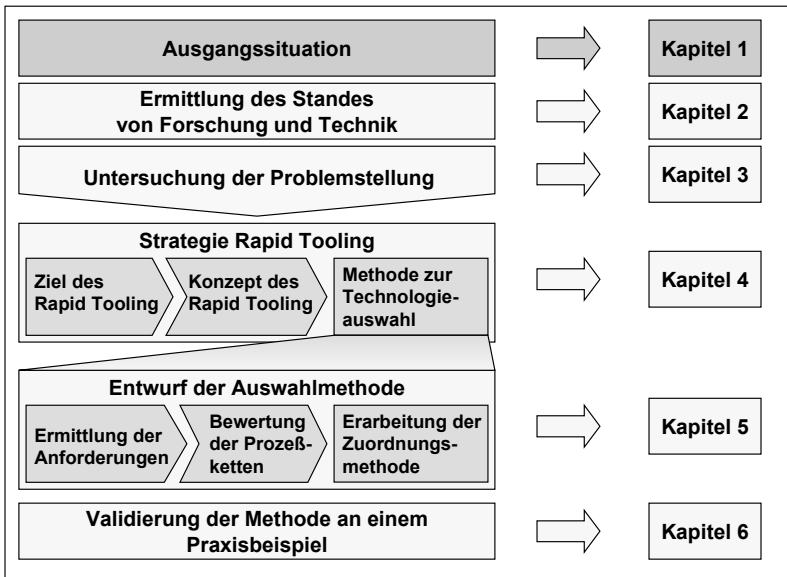


Abbildung 1-3: Aufbau der vorliegenden Dissertation

Im zweiten Kapitel wird der gegenwärtige Stand von Wissenschaft und Technik zur der Fertigung von Prototypen- und Kleinserienwerkzeugen untersucht. Um eine einheitliche Terminologie festzulegen, werden zunächst die für das Verständnis der Arbeit wichtigen Begriffe definiert. Im Anschluss daran wird die gegenwärtig in der Industrie etablierte Herstellung von Prototypenwerkzeugen hinsichtlich der relevanten Abläufe dargestellt. Aufgrund der enormen Bandbreite der möglichen Fertigungsverfahren zur Herstellung der Prototypenwerkzeuge

werden in einem Unterpunkt die einzelnen Fertigungsprozesse sowie ableitbare Prozessketten untersucht. Dabei werden sowohl bereits industriell eingesetzte Verfahren als auch Technologien betrachtet, die sich gegenwärtig noch im Forschungsstadium befinden.

Kapitel drei untersucht den gegenwärtigen Ablauf der Produktentwicklung hinsichtlich des Einsatzpotentials von Prototypenwerkzeugen und leitet den Handlungsbedarf für eine Methode zur Prototypenwerkzeugherstellung ab. Dazu werden zunächst das Einsatzpotenzial von Prototypenwerkzeugen während der Produktentwicklung bis hin zur Markteinführung neuer Produkte aufgezeigt und Anforderungen an die Prototypenfertigung abgeleitet. Da zum gegenwärtigen Zeitpunkt kaum ein geplanter Einsatz von Prototypenwerkzeugen zur Unterstützung der Produktentwicklung erfolgt, werden die praktizierten Ersatzstrategien, sogenannte Surrogatprozesse hinsichtlich ihrer Defizite untersucht. Unter Einbeziehung der geschäftlichen Situation und des gegenwärtigen Know-hows der potentiellen Hersteller von Prototypenwerkzeugen können auf diese Weise die Defizite des zur Zeit in der Industrie vorherrschenden Vorgehens transparent dargestellt werden und Anforderungen an die zu konzipierende Methode ermittelt werden. Abschließend werden bereits durchgeführte wissenschaftliche Untersuchungen bezüglich des Themengebietes der Prototypenwerkzeugherstellung recherchiert und die daraus gewonnenen Erkenntnisse gegenüber der Zielsetzung dieser Dissertation abgegrenzt.

Das Vorgehensmodell Rapid Tooling zur schnellen entwicklungsbegleitenden Fertigung von Prototypenwerkzeugen wird im Kapitel vier anhand der zuvor abgeleiteten Anforderungen konzipiert. Dabei wird zur Vervollständigung auf die einzelnen organisatorischen und technischen Einzelmethoden dieser Strategie eingegangen und ihr Zusammenspiel entsprechend der beabsichtigten industriellen Anwendung beschrieben.

Die Wahl des Konturfertigungsverfahrens hat entscheidenden Einfluss auf die Effizienz und den Zeitvorteil bei der Prototypenwerkzeugherstellung. Da bei den potentiellen Anwendern besonders bei dieser Entscheidungsfindung die größten Defizite zu beobachten sind, wird im fünften Kapitel eine Planungsgrundlage geschaffen. Dazu werden die Anforderungen an die Konturfertigungsverfahren seitens der Zielprozesse, der Fertigungszeiten, der Kosten, der zu erzielenden Qualität sowie aufgrund betrieblicher Abläufe formuliert. In einem ersten Bewertungsschritt erfolgt eine Konzentration auf die erfolgversprechendsten Alternativen.

ven, so dass im Anschluss daran eine Methode zur anforderungsgerechten präventiven Zuordnung der Prozessketten zu Konturelementen erfolgen kann.

Die industrielle Relevanz und Umsetzbarkeit der konzipierten Strategie Rapid Tooling sowie des Auswahlverfahrens für Konturfertigungsverfahren werden anhand realisierter beispielhafter Projekte validiert.

Zum Abschluss werden die ermittelten Ergebnisse im Kapitel sieben zusammengefasst und ein Ausblick für weiterführende Untersuchungen gegeben.