





**Lehrstuhl für Montagesystemtechnik und Betriebswissenschaften**

# **Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling**

Dipl.-Ing. Univ. Johann-Christoph v. Pieverling

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen  
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Joachim Heinzl

Die Dissertation wurde am 06.08.02 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen  
am 16.12.02 angenommen.



***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

# Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des iwv ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen.

Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des iwv. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den iwv-Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des iwv veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Gunther Reinhart     Michael Zäh





## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der Technischen Universität München

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, dem Leiter des Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Heinzl, dem Leiter des Lehrstuhls für Feingerätebau und Mikrotechnik der Technischen Universität München, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit bedanken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann, dem Leiter des Lehrstuhls für Umformtechnik und Giessereiwesen der technischen Universität München danke ich für die Übernahme des Vorsitzes.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts, den Kollegen der appex GmbH sowie allen Studenten, die an der Erstellung meiner Arbeit beteiligt waren.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie und Freunden, die mir die notwendige Unterstützung und Geduld entgegengebracht haben, um mir die Arbeit zu ermöglichen.



# 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

## II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Steigerung der Effizienz der Produktentwicklung .....	3
Abbildung 1-2: Ablaufplan sowie Zeit- und Kostenstruktur von Werkzeugbau-Projekten (Fährer 1999) .....	4
Abbildung 1-3: Aufbau der vorliegenden Dissertation .....	6
Abbildung 2-1: Ablaufdiagramm der derzeitigen Prototypenwerkzeugherstellung (nach Tönshoff 1997) .....	13
Abbildung 2-2: Kategorisierung von Konturfertigungsverfahren .....	15
Abbildung 2-3: Alternative Prozesskonfigurationen der Kombination generativer Fertigungsverfahren und Feinguss .....	17
Abbildung 2-4: Herstellung von Formkonturen mittels generativ erzeugter Gusschalen .....	19
Abbildung 2-5: Ablauf des Spray-Metall Tooling bzw. der galvanischen Konturerzeugung .....	21
Abbildung 2-6: Der Prozess des Sand-Lasersinterns (EOS 2000) .....	22
Abbildung 2-7: Prozessablauf des Direct Shell Production Casting (Solingen 2000) .....	23
Abbildung 2-8: Herstellung eines Metallteiles mittels eines Grünlings (Kegelman 1999) .....	25
Abbildung 2-9: Funktionsweise der Senkerosion .....	26
Abbildung 2-10: Aufbau und Varianten des Bridge Tooling .....	28
Abbildung 2-11: Prozessablauf des Three Dimensional Printing (Extrude Hone 2000) .....	30
Abbildung 2-12: Der direkte Metall-Lasersinterprozess (Shellabear 1999) .....	31
Abbildung 2-13: Prozessablauf des indirekten Metall-Lasersinterns (Breitinger & Lorenzen 1997) .....	34
Abbildung 2-14: Verfahrensprinzip des Fräsens .....	35

Abbildung 2-15: Gegenüberstellung der Zeilung des 3-Achs- und des 5-Achs-Fräsens.....	38
Abbildung 2-16: Unterschied der konventionellen zur Hochgeschwindigkeitszerspanung.....	39
Abbildung 2-17: Einsparpotentiale der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung gegenüber konventioneller spanender Bearbeitung .....	40
Abbildung 2-18: Verfahrensprinzip des Drehens .....	42
Abbildung 2-19: Verfahrensprinzip der Drahterosion .....	43
Abbildung 3-1: Anwendungsgebiete des Rapid Tooling.....	47
Abbildung 3-2: Einsatzbereich des Modellbaus im Produktentstehungs- prozess.....	51
Abbildung 3-3: Einsatzbereich des Werkzeug- und Formenbaus in der Produktentstehung.....	55
Abbildung 3-4: Bewertung der Forschungsansätze .....	59
Abbildung 4-1: Ziele und Anforderungen an das Rapid Tooling .....	62
Abbildung 4-2: Parallelisierte, projekthafte Abwicklung des Prototypenwerkzeugbaus .....	64
Abbildung 4-3: Vorgehen zur Modularisierung des Stammformaufbaus.....	65
Abbildung 4-4: Integrierte CAX-Anwendung ermöglicht Rapid Tooling .....	66
Abbildung 4-5: Prinzip der Auswahlmethode zur Konturfertigung .....	68
Abbildung 4-6: Gesamtkonzept der Strategie Rapid Tooling.....	69
Abbildung 5-1: Mehrstufiges Vorgehen zur Entwicklung der Auswahlmethode.....	71
Abbildung 5-2: Anforderungsliste für Konturfertigungsverfahren.....	72
Abbildung 5-3: Bewertung und Vorauswahl der Konturfertigungsverfahren .....	79
Abbildung 5-4: Zuordnung von Erfüllungsgraden zu Maßzahlen durch Wertefunktionen.....	81

Abbildung 5-5: Ermittlung der Rangfolge der objektiven Anforderungen .....	83
Abbildung 5-6: Ermittlung der Rangfolge der subjektiven Anforderungen.....	85
Abbildung 5-7: Wertefunktion des Kriteriums Herstelldauer .....	87
Abbildung 5-8: Wertefunktion des Kriteriums industrielle Verfügbarkeit .....	87
Abbildung 5-9: Wertefunktion der Standmenge.....	88
Abbildung 5-10: Wertefunktion der Maßgenauigkeit .....	89
Abbildung 5-11: Wertefunktion der Oberflächenqualität.....	89
Abbildung 5-12: Wertefunktion der herstellbaren Formeinsatzgröße.....	90
Abbildung 5-13: Erfüllungsgrade aller Konturfertigungsverfahren .....	92
Abbildung 5-14: Konturgeometrie als Steuerelement für die Verfahrenszuordnung.....	94
Abbildung 5-15: Beispielhafte Segmentierung von Formelementen .....	95
Abbildung 5-16: Strukturdiagramm der Zuordnungsmethode .....	97
Abbildung 5-17: Rotatorischer Geometrietyp (Hornig 1998) .....	98
Abbildung 5-18: Schalenförmiger Geometrietyp (Hornig 1998) .....	99
Abbildung 5-19: Kastenförmiger Geometrietyp (Hornig 1998).....	99
Abbildung 5-20: Komplex gedrungener Geometrietyp (Hornig 1998).....	100
Abbildung 5-21: Kennzahlen der Bauteile .....	104
Abbildung 5-22: Gegenüberstellung der Fertigungszeiten.....	105
Abbildung 5-23: Gegenüberstellung der Fertigungskosten.....	106
Abbildung 5-24: Gegenüberstellung der Kennzahlen Elektrodenanzahl und Aspektverhältnis .....	107
Abbildung 5-25: Vergleich reale und errechnete Fertigungszeiten aus Kennzahl STL-Dreiecke .....	111
Abbildung 5-26: Vergleich der prognostizierten Fertigungszeiten mit den realen Werten.....	113



Abbildung 5-27: Vergleich der prognostizierten Fertigungskosten mit den realen Werten .....	114
Abbildung 5-28: Ablaufdiagramm des Auswahlverfahrens zur Konturfertigung.....	117
Abbildung 6-1: Beispielbauteil „Tisch“ .....	122
Abbildung 6-2: Konstruktiver Aufbau des Prototypenwerkzeuges .....	123
Abbildung 6-3: Formeinsätze und Schieber .....	124
Abbildung 6-4: Schieber und geeignete Bearbeitung .....	125
Abbildung 6-5: Düsenseitiger Formeinsatz .....	126
Abbildung 6-6: Auswerferseitiger Formeinsatz.....	127
Abbildung 6-7: Übersicht Herstellzeiten der Verfahrensalternativen für Auswerferseite.....	129
Abbildung 6-8: Projektplan zur Herstellung des Prototypenwerkzeuges Tisch.....	129
Abbildung 9-1: Bauteil 1 mit Geometriedaten.....	154
Abbildung 9-2: Bauteil 2 mit Geometriedaten.....	154
Abbildung 9-3: Bauteil 3 mit Geometriedaten.....	154
Abbildung 9-4: Bauteil 4 mit Geometriedaten.....	155
Abbildung 9-5: Bauteil 5 mit Geometriedaten.....	155
Abbildung 9-6: Bauteil 6 mit Geometriedaten.....	155
Abbildung 9-7: Bauteil 7 mit Geometriedaten.....	156
Abbildung 9-8: Bauteil 8 mit Geometriedaten.....	156
Abbildung 9-9: Bauteil 9 mit Geometriedaten.....	156
Abbildung 9-10: Bauteil 10 mit Geometriedaten.....	157
Abbildung 9-11: Bauteil 11 mit Geometriedaten.....	157
Abbildung 9-12: Bauteil 12 mit Geometriedaten.....	157

Abbildung 9-13: Bauteil 13 mit Geometriedaten .....	158
Abbildung 9-14: Bauteil 14 mit Geometriedaten .....	158
Abbildung 9-15: Bauteil 15 mit Geometriedaten .....	158
Abbildung 9-16: Bauteil 16 mit Geometriedaten .....	159
Abbildung 9-17: Bauteil 17 mit Geometriedaten .....	159
Abbildung 9-18: Bauteil 18 mit Geometriedaten .....	159
Abbildung 9-19: STL-Dreiecke über Fertigungszeit .....	161
Abbildung 9-20: STL-Dreiecke über Fertigungskosten .....	162

### III Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1: Maßzahlen der subjektiven Kriterien .....	82
Tabelle 5-2: Gewichtungsmatrix der objektiven Anforderungen .....	84
Tabelle 5-3: Errechnung der Gewichtungsfaktoren.....	84
Tabelle 5-4: Berechnung der normierten Gewichtungsfaktoren.....	85
Tabelle 5-5: Gewichtungsmatrix der subjektiven Anforderungen.....	86
Tabelle 5-6: Berechnung der normierten Gewichtungsfaktoren.....	86
Tabelle 5-7: Systematische Vorauswahl der Konturfertigungsverfahren .....	91
Tabelle 5-8: Analytische Zuordnung von Geometrietypen zu Fertigungsverfahren .....	102
Tabelle 5-9: Werte zur Ermittlung der Fertigungszeit .....	112
Tabelle 5-10: Werte zur Ermittlung der Fertigungskosten .....	113
Tabelle 6-1: Vergleich der aufsummierten Kostenwerte .....	131
Tabelle 9-1: Bestimmtheitsgrade der Kennzahlen bzgl. Fertigungszeit .....	161
Tabelle 9-2: Bestimmtheitsgrade der Kennzahlen bzgl. Fertigungszeit .....	162

## IV Abkürzungsverzeichnis

™	Trademark
®	Rechtsschutz
°C	Grad Celsius
µm	Mikrometer
3D	Dreidimensional
3DP	Three dimensional Printing
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminiumoxid
CAD	Computer aided Design
CAM	Computer aided Manufacturing
CAX	Computer aided (unspezifiziert)
CMB	Controlled Metal Build Up
CNC	Computerized numerical control
d.h.	das heißt
DCP	Direct Croning Prozess
DIN	Deutsches Institut für Normung
DM	Deutsche Mark
DSPC	Direct Shell Production Casting
DTM	Desktop Manufacturing
DV	Datenverarbeitung
EDV	elektronische Datenverarbeitung
EOS	Electro-Optical-Systems
f.	folgende
FEM	Finite Elemente Methode
ff.	weitere folgende
GF	Glasfaser
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
HSC	High Speed Cutting
i.a.	im allgemeinen
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
IMLS	Indirektes Metall-Lasersintern
ISO	International Standards Organisation
LENS	Laser Engineered Net Shape
MIT	Massachusets Institut of Technology
mm	Millimeter
mm <sup>2</sup>	Quadratmillimeter
mm <sup>3</sup>	Kubikmillimeter

N.N.	nomen nominandum
NC	numeric controlled
NDM	New Design Models
o.a.	oben angegeben
$R_a$	Mittenrauhwert
RP	Rapid Prototyping
RP-ML	Rapid Prototyping Mailing List
S.	Seite
SALD	Selective Area Laser Deposition
SDM	Shape Deposition Manufacturing
SLRS	Selective Laser Reaction Sintering
SLS	Selektives Lasersintern
STEP	Standard for the Exchange of Product model data
STL	Surface triangulation language
u.a.	und andere
u.U.	unter Umständen
$V_c$	Schnittgeschwindigkeit
VDAFS	Flächenschnittstelle des Verbandes der deutschen Automobilindustrie
$V_f$	Vorschubgeschwindigkeit
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil



## 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 Elemente 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 Verringerung der Iterationsschleifen in der Produktentwicklung.

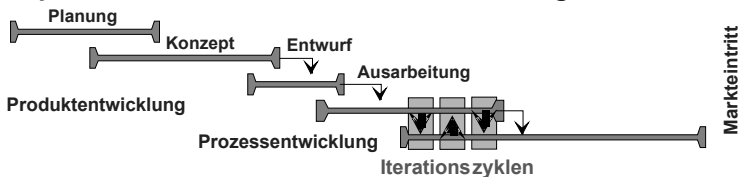
Der frühzeitige Einsatz von Urformverfahren während der Produktentwicklung setzt jedoch die kurzfristige Verfügbarkeit entsprechender Spritz- und Druckgießwerkzeuge voraus. Nur unter Verwendung dieser Betriebsmittel können die technischen Anforderungen der Zielprozesse erfüllt werden. Die Industriebranche 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

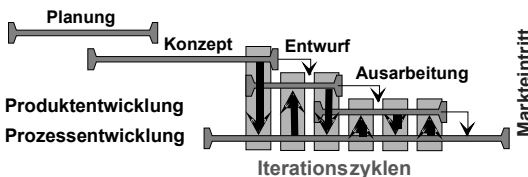


Abbildung 1-1: Steigerung der Effizienz der Produktentwicklung

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 Serienfertigungsverfahren mit dem Serienmaterial erzielt (*Breitinger & Pieverling 1999*).

Parallel zu dieser Entwicklung wurden die im Werkzeug- und Formenbau klassischerweise eingesetzten abtragenden Fertigungsverfahren, 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.

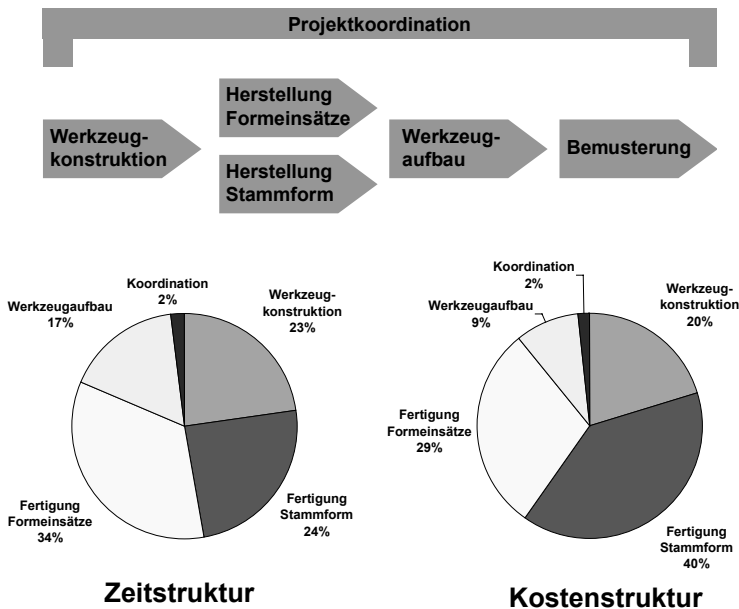


Abbildung 1-2: Ablaufplan sowie Zeit- und Kostenstruktur von Werkzeugbauprojekten (*Fährer 1999*)

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.

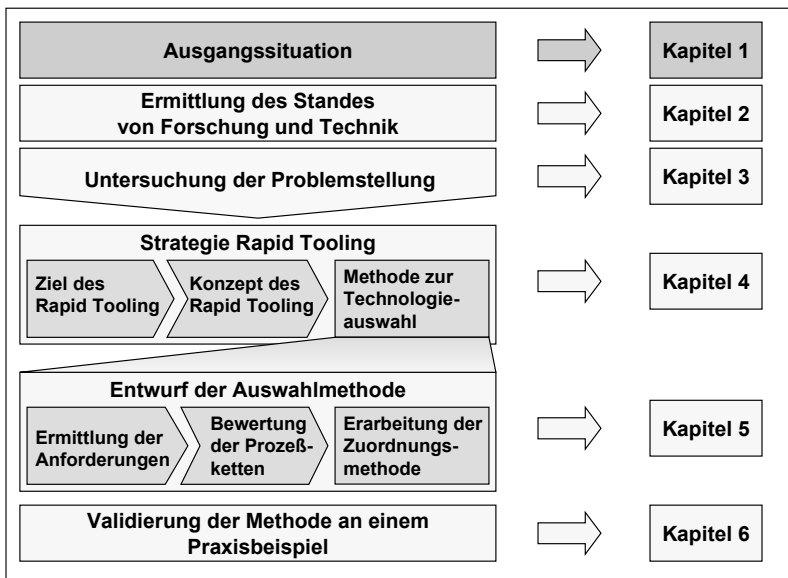


Abbildung 1-3: Aufbau der vorliegenden Dissertation

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 Einzelmethode 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 Prototypenwerkzeugfertigung. 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 Alternati-

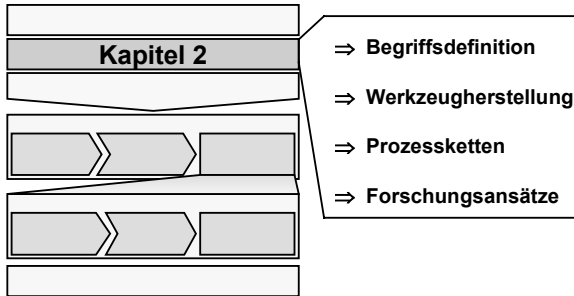
ven, so dass im Anschluss daran eine Methode zur anforderungsgerechten präventiven Zuordnung der Prozessketten zu Konturelementen erfolgen kann.

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.

## 2 Die Herstellung von Prototypen- und Kleinserienwerkzeugen

In diesem Kapitel wird der Stand von Wissenschaft und Technik bei der Fertigung von Prototypenwerkzeugen vorgestellt. Dazu werden zentrale Begriffe des Themengebietes



definiert und der prinzipielle Ablauf der notwendigen wertschöpfenden Tätigkeiten beschrieben. Anschließend werden die zur Konturfertigung industriell eingesetzten Fertigungsprozesse beschrieben sowie wissenschaftliche Forschungsansätze vorgestellt.

### 2.1 Begriffsdefinitionen

#### Modell

Im Zusammenhang mit technischen Fragestellungen wird der Begriff Modell zunächst sehr weit gefasst. Die zutreffende Norm definiert diesen Begriff als „die Abbildung eines Systems oder Prozesses in ein anderes begriffliches oder gegenständliches System, das aufgrund der Anwendung bekannter Gesetzmäßigkeiten, einer Identifikation oder auch getroffener Annahmen gewonnen wird und das System oder den Prozess bezüglich ausgewählter Fragestellungen ausreichend genau abbildet“ (*DIN 19226*). Während der Produktentwicklung ist das primäre Ziel, eine körperliche dreidimensionale Abbildung des späteren Produktes zur Vorhersage und Überprüfung der Produkteigenschaften zu erstellen. (*Lindemann & Reichwald 1998*). Dabei wird je nach Entwicklungsfortschritt zur Verringerung der Komplexität der Herstellung des Modells bewusst nur ein Teil der späteren Produkteigenschaften abgebildet. Um diese unterschiedlichen Abstraktionsniveaus differenzieren zu können, wird im Rahmen dieser Arbeit der Begriff Modell als dreidimensionales, körperliches Abbild des späteren Produk-

tes definiert. Insbesondere hinsichtlich der physikalischen Eigenschaften und der produktionstechnischen Herstellung wird keine Übereinstimmung zwischen Modell und Produkt gefordert.

### **Prototyp**

Seit mehr als einem Jahrzehnt findet man in der Literatur Berichte über Entwicklungsprojekte, in denen Prototypen zur Klärung von Produkteigenschaften eingesetzt werden (z.B. *Gebhardt 1996; Geuer 1996*). Eine Analyse der Publikationen zeigt, dass durchaus keine Einigkeit darüber besteht, was unter dem Begriff „Prototyp“ zu verstehen ist. Folgende Anforderungen müssen an Prototypen gestellt werden (*Herzwurm 1999*):

- Prototypen dienen dazu, relevante Anforderungen oder Entwicklungsprobleme frühzeitig zu klären.
- Sie bieten eine Basis für Diskussionen mit dem Auftraggeber oder Endnutzer.
- Prototypen schaffen eine Grundlage für Entscheidungen über das beste Vorgehen.
- Prototypen dienen der experimentellen Verwendung und Sammlung praktischer Erfahrung mit den beabsichtigten Prozessen.

In Übereinstimmung mit *Boar (1984)* und *Connell (1989)* wird im Rahmen dieser Arbeit der Begriff Prototyp durch folgende Definition gegenüber dem Begriff Modell abgegrenzt: Ein Prototyp ist ein mit geringerem Aufwand als das geplante Produkt hergestelltes Abbild des Produktes, das nicht notwendigerweise alle Eigenschaften insbesondere den gleichen Detaillierungsgrad des Zielsystems aufweisen muss. Voraussetzung ist jedoch, dass vor der eigentlichen Systemimplementierung der Anwender die wesentlichen Systemeigenschaften erproben kann.

Da ein wichtiger Aspekt der vorliegenden Arbeit darin besteht, Produkt- und Prozessentwicklung parallelisiert durchzuführen, werden nur Musterteile, die mit den selben Fertigungsverfahren wie das Produkt produziert werden und dessen Materialeigenschaften aufweisen, als Prototypen bezeichnet.

### **Rapid Prototyping**

Seit Entwicklung der ersten generativ, d.h. aufbauend arbeitenden Verfahren hat sich der Begriff Rapid Prototyping als Sammelbezeichnung aller Fertigungsverfahren etabliert, deren Prinzip das schichtweise Auftragen von Material zu drei-



dimensionalen Körpern ist. Im deutschsprachigen Raum entsteht durch die Nähe zum Begriff Prototyp eine gewisse Irreführung, da die entstehenden Bauteile nicht notwendigerweise obiger Definition für Prototypen entsprechen. Besser beschrieben wird diese Gruppe von Fertigungsverfahren durch den englischen Ausdruck Layer Manufacturing bzw. seinen analogen deutschen Begriff generative Fertigungsverfahren (*Macht 1997*). Im folgenden werden daher diese Bezeichnungen als Äquivalent für den Begriff Rapid Prototyping verwendet.

### **Rapid Tooling**

Die technische Weiterentwicklung der generativen Fertigungsverfahren ermöglichte neben der Anwendung dieser Technologien für den Modellbau die Herstellung von provisorischen Ur- und Umformwerkzeugen (*Lorenzen & Breitingner 1996*). In Analogie zum Begriff Rapid Prototyping wurde für dieses Vorgehen anfänglich der Begriff Rapid Tooling verwendet. Die Herstellung eines derartigen Betriebsmittels ist im Vergleich zur Fertigung von Modellteilen jedoch wesentlich komplexer. Sie verlangt neben der konstruktiven Auslegung des Betriebsmittels die Fertigung verschiedener Teile mit z.T. sehr unterschiedlichen Prozessen (*Lorenzen u.a. 1998*), wobei aufgrund der unterschiedlichen Charakteristik nicht nur generative Verfahren zum Einsatz kommen. Die Verwendung prinzipiell unterschiedlicher Verfahren erfordert zudem mehrere spezifische arbeitsvorbereitende Vorgänge. Die Aufgabenstellung, möglichst schnell zu Gießwerkzeugen zu gelangen, ist also nicht durch singuläre Betrachtung einzelner Verfahren zu lösen. Der Begriff Rapid Tooling wird daher in dieser Arbeit als ein integriertes Vorgehensmodell definiert, das eine flexible, kurzfristige, und entwicklungsbegleitende Herstellung von Prototypen- und Kleinserienwerkzeugen ermöglicht (*Reinhart u.a. 1998A*).

### **Prototypenwerkzeug**

Zur urformtechnischen Herstellung im Spritz- und Druckguss müssen entsprechende Betriebsmittel erstellt werden. Die geforderten Qualitäts- und Stückzahlanforderungen an derartige Produktionswerkzeuge sowie die erzeugten Formteile sind in einschlägigen Normen (*DIN 16750, DIN 16901, DIN 1688-4*) definiert. Für den Bereich der Prototypenherstellung sind keine derartigen Richtlinien verfügbar. Analog zum Begriff Prototyp ist auch zur Bezeichnung Prototypenwerkzeug keine eindeutige Definition in der Literatur zu ermitteln (*Lindner & Unger 1998*). Im Rahmen dieser Arbeit wird an Prototypenwerkzeuge die Anforderung gestellt, dass sie zur Erzeugung von Prototypen entsprechend obiger Definition geeignet sind. Die Stückzahlerwartung für derartige Werkzeuge lässt sich mit

100 bis zu 1000 Teilen abschätzen (*Kruth u.a. 1997*). Darüber hinaus sollen sie eine aussagekräftige Abbildung der Prozesseigenschaften des Serienfertigungsverfahrens liefern. Daher wird auch bei Prototypenwerkzeugen von der Verwendung der unter Serienbedingungen üblichen Prozessparameter ausgegangen (*Breitinger & Pieverling 1997B*).

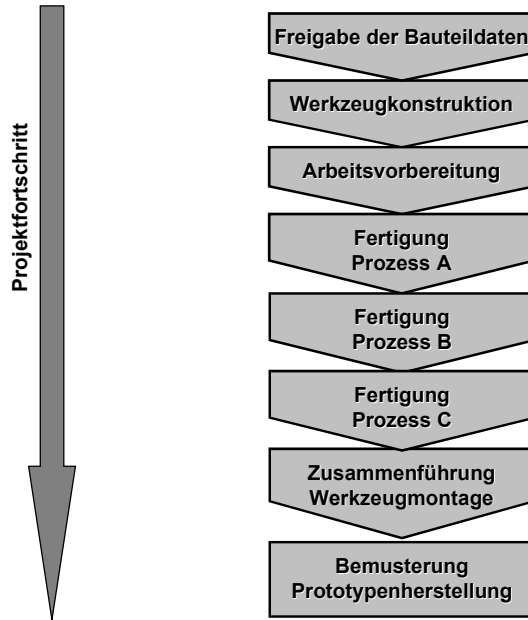
### **Vorserienwerkzeug und Kleinserienwerkzeug**

Da Bauteile, die im Bereich der Null-, Vor- oder Kleinserie erzeugt werden, im Unterschied zu Prototypen bereits mit der Absicht produziert werden, sie auf dem Markt zu platzieren, steigen die Anforderungen an die zu ihrer Herstellung notwendigen Betriebsmittel. Dabei müssen bezüglich Qualität die gleichen Ergebnisse wie bei einem Serienwerkzeug erzielt werden. Lediglich die zu produzierende Stückzahl erreicht nicht das gleiche Niveau. Da das Spektrum der anvisierten Stückzahlen für Serienprodukte extrem variiert, kann hier nur eine numerische Abgrenzung nach unten vorgenommen werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden Vor- und Kleinserienwerkzeuge gegenüber den Prototypenwerkzeugen durch höhere Qualitätsanforderungen sowie Standmengen von mindestens 1000 Stück abgegrenzt.

### **Prozesskette Rapid Tooling**

Die Herstellung von urformenden Betriebsmitteln beinhaltet wie bereits angesprochen eine Vielzahl unterschiedlicher Aktivitäten. Diese einzelnen Schritte lassen sich zusammenfassen. Dabei gestaltet sich die Konfiguration der beteiligten Einzelprozesse je nach zu erzielendem Arbeitsergebnis jeweils unterschiedlich. Der Begriff der Prozesskette wird im Hinblick auf das in dieser Arbeit behandelte Thema Rapid Tooling für geschlossene Fertigungsabläufe zur Erzeugung von Werkzeugbauteilen verwendet. Die Ausgangssituation stellen dabei die Daten der im Rahmen der in jedem Fall auszuführenden Werkzeugkonstruktion generierten Einzelbauteile dar.

## 2.2 Ablauf der Prototypenwerkzeugherstellung



*Abbildung 2-1: Ablaufdiagramm der derzeitigen Prototypenwerkzeugherstellung (nach Tönshoff 1997)*

Den derzeit von der Industrie im allgemeinen durchgeführten Ablauf während der Prototypenwerkzeugherstellung zeigt Abbildung 2-1. Die einzelnen Schritte, die ausgehend vom Empfang der Bauteildaten durchlaufen werden müssen sind dabei folgende:

- Fertigungsgerechte Aufbereitung der Bauteildaten hinsichtlich Entformungskonzept und Trennflächenverlauf.
- Werkzeugkonstruktion zur Gestaltung sowohl der formgebenden als auch der peripheren Einzelteile des Betriebsmittels.
- Arbeitsvorbereitung zur Auswahl des geeigneten Verfahrens und der Erstellung notwendiger Arbeitsunterlagen.

- Fertigung aller Einzelteile.
- Montage und Tuschieren des Werkzeuges zur Sicherstellung der einwandfreien Funktionserfüllung.
- Bemusterung des Werkzeuges auf einer Druck- bzw. Spritzgießmaschine sowie Herstellung der benötigten Anzahl an Prototypenteilen.

### **2.3 Fertigungsverfahren zur Prototypenwerkzeugherstellung**

Bereits unter Abschnitt 2.1 wurde dargestellt, dass zur Herstellung insbesondere der konturgebenden Elemente von urformenden Werkzeugen unterschiedliche Verfahren und Prozessketten eingesetzt werden können. Im Zuge der technologischen Entwicklung sowohl der als klassisch zu bezeichnenden spanenden Fertigungsverfahren, als auch der seit weniger als einem Jahrzehnt industriell verfügbaren generativen Prozesse, steht inzwischen eine erhebliche Anzahl an technologischen Alternativen für die Konturfertigung zur Verfügung. Die unterschiedlichen Prozessketten und Verfahren werden zunächst in unterschiedliche Cluster gegliedert und hinsichtlich des erforderlichen Ablaufs der Einzelprozesse sowie ihrer Eigenschaften beschrieben.

Dabei wird an dieser Stelle der Schwerpunkt auf die rein beschreibende Darstellung des Ablaufes und der Eigenschaften der verschiedenen Verfahren gelegt. Die Bewertung der Prozessketten insbesondere hinsichtlich ihrer Eignung im Gesamtkonzept Rapid Tooling erfolgt innerhalb der Erarbeitung der Auswahlmethode für die Verfahren zur Konturfertigung im 5. Kapitel. Dabei werden detailliert und vergleichend die Stärken und Schwächen der einzelnen Verfahren untersucht und anhand von Tabelle 5-7 (siehe Seite 91) sowie Abbildung 5-13 (siehe Seite 92) illustriert.

	Indirekte Fertigungsverfahren	Direkte Fertigungsverfahren
Generative Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Generative Verfahren und Feinguss</b> RP-Modell, Vakuumabformen von Wachs, Feinguss RP-Modell, direktes Ausbrennen, Feinguss</li> <li>• <b>Gusschale über generative Verfahren</b> Sand-Lasersintern, DSPC, Gießharzwerkzeuge, Spray-Metall-Tooling</li> <li>• <b>Green Body Fabrikation</b> Keltool®, Phast, NDM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Bridge Tooling</b> Stereolithografie, Kunststoff-Lasersintern</li> <li>• <b>Three dimensional Printing</b></li> <li>• <b>Direktes Metall-Lasersintern</b> Einphasensystem, Mehrphasensystem</li> <li>• <b>Indirektes Metall-Lasersintern</b></li> </ul>
Spanende Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Senkerodieren</b> Kupfer Elektroden, Graphit Elektroden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>CNC-Fräsen</b> Konventionelles Fräsen, HSC-Fräsen, 5-Achs Fräsen</li> <li>• <b>Drehen</b></li> <li>• <b>Drahterodieren</b> 3-Achs Drahterodieren, 4-Achs Drahterodieren</li> </ul>

Abbildung 2-2: Kategorisierung von Konturfertigungsverfahren

Abbildung 2-2 zeigt eine prinzipielle Kategorisierung der Fertigungsverfahren zur Konturfertigung in vier Cluster anhand ihrer technologischen Eigenschaften. Das spaltenweise verteilte Kriterium unterscheidet zwischen Fertigungsverfahren, die eine indirekte Fertigung der Konturelemente ermöglichen und solchen, die auf direktem Wege dieses Ziel erreichen. Im ersten Fall wird nicht das physikalische Objekt des späteren Konturelementes bearbeitet, sondern zunächst ein Mastermodell hergestellt. Im weiteren Verlauf wird über verschiedene Kopier- bzw. Abformprozesse das später einzusetzende Werkstück erzeugt. Bei den direkten Fertigungsverfahren wird demgegenüber jeder Fertigungsschritt am späteren Konturelement durchgeführt.

Das zweite nach Zeilen angeordnete Unterscheidungskriterium der Matrix orientiert sich anhand der derzeit gültigen Normung (*DIN 8580*) zur Einteilung von Fertigungsverfahren. Während die generativen Verfahren durchwegs dem Urformen zuzuordnen sind und nach dem Prinzip der additiven Materialanhäufung arbeiten, sind abtragende und spanende Verfahren dem Trennen zuzuordnen. Bei

diesen Verfahren entsteht das Werkstück aus einem in allen Dimensionen größeren Rohteil durch geeignete Subtraktion des Materials.

### **2.3.1 Indirekte Fertigungsverfahren zur Konturherstellung**

Allen Verfahren zur indirekten Konturherstellung ist gemeinsam, dass die geometrische Beschaffenheit des Konturelementes zunächst in einem für den Einbau in einem Urformwerkzeug ungeeigneten Ersatzwerkstoff erstellt wird. Dieses Modell fungiert in folgenden Abformprozessen als Master, wobei es teilweise erhalten bleibt, teilweise aber auch prozessbedingt zerstört wird und dadurch verloren geht. Der Einsatz der Abformprozesse ist notwendig, um die Gestalt des Mastermodells in ein für urformende Verfahren wie Druck- oder Spritzguss ausreichend widerstandsfähiges Material zu überführen.

#### **2.3.1.1 Generative Verfahren und Feinguss**

Bei dieser Verfahrensgruppe werden generative Fertigungsverfahren wie die Stereolithografie oder das selektive Lasersintern in Kombination mit dem Feingießprozess eingesetzt. Dadurch können als Formbauwerkstoffe Stahl- und Aluminiumlegierungen eingesetzt werden, so dass Betriebsmittel für die Fertigungsprozesse Druck- und Spritzguss erzeugt werden können. Wie in Abbildung 2-3 auf Seite 17 zu erkennen stehen zur Durchführung dieser Prozesskette zwei Alternativen zur Verfügung. Beiden Varianten gemeinsam ist die relativ hohe Ungenauigkeit der Prozessketten aufgrund wiederholtem Kopieren innerhalb der Abformprozesse. In Benchmarkprojekten wurde eine mittlere Maßgenauigkeit von  $\pm 0,5\%$  erzielt (*Fährer 1999*).

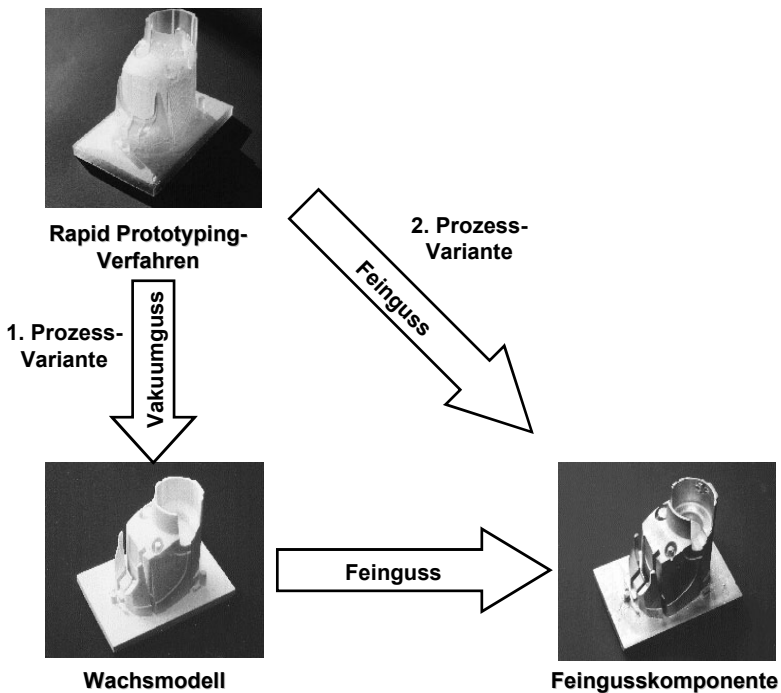


Abbildung 2-3: Alternative Prozesskonfigurationen der Kombination generativer Fertigungsverfahren und Feinguss

### 1. Prozessvariante:

Als erster Schritt dieser Prozesskette wird das konturgebende Element des herzustellenden Urformwerkzeuges durch ein generatives Fertigungsverfahren erzeugt. Der so entstandene dreidimensionale Körper dient als Urmodell für den folgenden zweiten Prozessschritt, den Vakuummuss. Dabei wird das Modell zur Vermeidung von Lufteinschlüssen unter Vakuum mit Silikon umgossen. Nach dem Aushärten und Trennen des Silikonblockes wird das generativ erzeugte Mastermodell entnommen. Die entstandene Silikonform wird im nächsten Prozessschritt ebenfalls unter Vakuum mit Wachs befüllt, um die Geometrie des Werkzeugformeinsetzes als verlorenes Wachsmodell für den beabsichtigten Feingießprozess zu erhalten. Im anschließenden Feingießverfahren kann nun der Formeinsetz

aus metallischen Werkstoffen hergestellt werden ( Abbildung 2-3, *Geuer 1995, Sayki 1995*).

### 2. Prozessvariante:

Im Gegensatz zur ersten Prozessvariante wird bei der zweiten auf den Zwischenschritt der Wachsabformung verzichtet. Dabei wird die herzustellende Konturkomponente in einem Rapid Prototyping Verfahren erzeugt und direkt dem Feingießprozess zugeführt. Möglich ist dies aus zwei Gründen. Zum einen handelt sich bei konturgebenden Formeinsätzen im Werkzeugbau i.a. um Einzelstücke, so dass der kostendegressive Effekt durch Abformen mehrerer Wachslinge aus der gleichen Silikonform nicht genutzt werden kann. Zweitens wurde durch die Entwicklung sogenannter Hohlbaustrategien der Effekt des Ausdehnens des Rapid Prototyping Modells beim Ausschmelzen in der Feingusschale eliminiert oder Rapid Prototyping Materialsysteme eingeführt, die ohne Ausdehnen aus der Keramikschale entfernt werden können. Die Eignung dieser Prozessketten wurde in wissenschaftlichen Forschungsprojekten mehrfach nachgewiesen und dokumentiert, wobei unterschiedliche Rapid Prototyping-Verfahren wie die Stereolithografie (*Geuer 1996*), Kunststoff-Lasersintern (*Nöken 1997*), Fused Deposition Modelling (*Rapid Prototyping Report 1994*) oder Laminated Object Manufacturing (*Almond 1996*) genutzt wurden.

### 2.3.1.2 Gusschale über generative Verfahren

Die Eigenschaft der generativen Fertigungsverfahren in sehr kurzen Bearbeitungszeiten komplexe geometrische Modelle herzustellen wird auch für die in diesem Unterpunkt zusammengefassten Prozessketten verwendet. Das prinzipielle Vorgehen beruht wie in Abbildung 2-4 dargestellt darauf, ein Negativmodell der gewünschten Konturkomponente, die sogenannte Gusschale mittels Rapid Prototyping-Technologien zu erzeugen und in einem oder mehreren Abformprozessen in einen Formeinsatz aus ausreichend stabilen Formbaustoff zu überführen. Da die Bandbreite der nach dieser Strategie arbeitenden Prozessketten durch Variation der Materialien und Prozessschritte sehr groß ist, sollen im folgenden nur die Varianten mit industrieller Einsatzreife und dementsprechender Verbreitung beschrieben werden:



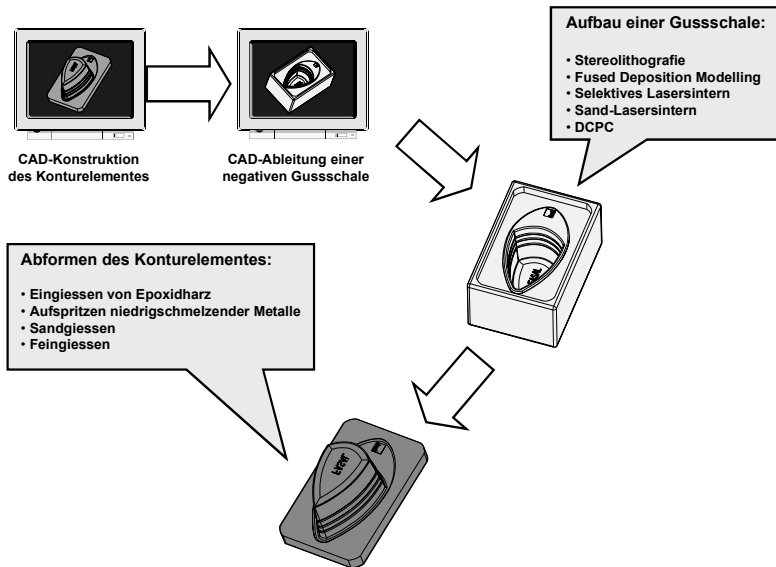


Abbildung 2-4: Herstellung von Formkonturen mittels generativ erzeugter Gusschalen

### Gießharzwerkzeuge

Nur für den Bereich des Spritzgussformenbaus ist die Möglichkeit nutzbar, Formeinsätze aus vergießbaren Harzen herzustellen. Dabei wird eine generativ erzeugte Gusschale, die ein negatives Abbild der zu erzeugenden Formkontur darstellt, in einem Gießrahmen fixiert. Gleichzeitig wird die spätere Formtrennung modellbautechnisch mittels Wachs oder Plastilin anmodelliert. In diesen Rahmen wird im nächsten Schritt reines oder mittels Metallpulver verstärktes Epoxydharz vergossen. Der Anteil an metallischen Additiven kann dabei bis zu 90% betragen, um das mechanische und thermische Verhalten des Epoxidform-einsatzes günstig zu beeinflussen. Zusätzlich können bereits beim Vergießen des Harzes Losteile wie z.B. Temperierrohre eingelegt werden. Nach dem Aushärten wird der jetzt aus Gießharz bestehende Formeinsatz aus dem Rahmen genommen und in ein konventionelles Spritzgießwerkzeug eingebaut (Kurenbach 1998).

Dieses Verfahren ist industriell weit verbreitet und in zahlreichen Veröffentlichungen beschrieben (Dusel & Eyrer 1996, Greenwood & Grimm 1995, Keller

*u.a. 1995, Lück u.a. 1995, Schilling 1996, Tait 1995, Wilmsen 1997*). Aufgrund der physikalischen Eigenschaften des Gießharzes ist eine Anwendung im Druckguss allerdings ausgeschlossen und selbst für die Anwendung im Spritzguss ist aufgrund der großen Unterschiede des thermischen Haushaltes des Gießharzwerkzeuges gegenüber einer konventionellen Stahlform die Übertragbarkeit der erzielten Bauteileigenschaften der Prototypenteilen auf die Serie problematisch (*Michaeli u.a. 1996*).

### **Spray-Metall Tooling**

Analog zur Herstellung von Gießharzwerkzeugen wird auch beim Metallspritzen ein generativ hergestelltes Negativmodell der Formkontur als Master eingesetzt. Auf dieses Modell wird eine ca. 2 mm dicke Schale aus der niedrigschmelzenden Zinklegierung Zamak mittels einer Lichtbogenpistole aufgesprüht (vgl. Abbildung 2-5). Dabei ist die Gefahr der Beschädigung des Modells infolge der im allgemeinen niedrigen Temperaturbeständigkeit aller generativ erzeugter Materialien sehr hoch.

Alternativ kann die metallische Schale jedoch auch durch galvanoechemisches Beschichten erzeugt werden, wobei die für ein gleichmäßiges Beschichten größerer Bereiche verfahrenstechnisch schwierige Prozessführung die Verfügbarkeit stark einschränkt. Die fertige dünne metallische Schale wird zur Steigerung der Stabilität mit geeigneten Materialien wie z.B. Epoxidharz z.T. mit Metallpulver vermischt hinterfüllt. Auch diese Prozesskette wurde bereits vielfach erfolgreich für Spritzgießwerkzeuge eingesetzt (*Dunlop 1995, Lück u.a. 1995, Roche & Jordan 1995*). Der Einsatz für das Leichtmetall-Druckgießen ist jedoch auch für diese Prozesskette aufgrund des niedrigen Schmelzpunktes der verwendeten metallischen Formbaumaterialien nicht möglich.

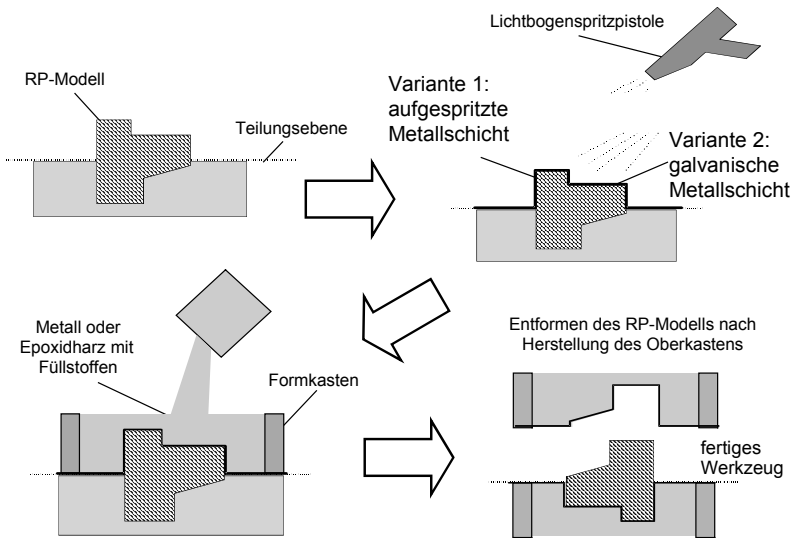


Abbildung 2-5: Ablauf des Spray-Metall Tooling bzw. der galvanischen Konturerzeugung

### Selektives Lasersintern von Sand

Mittels diesem Verfahren können ohne Verwendung von Modelleinrichtungen Sandformen für den üblichen Sandgussprozess erzeugt werden. Wie in Abbildung 2-6 zu erkennen entspricht das verwendete Prinzip dem Rapid Prototyping-Verfahren des selektiven Lasersinterns, wobei als Baustoff Standard Croning<sup>TM</sup>-Sand eingesetzt wird. Aus diesem Zusammenhang heraus wird das Verfahren in der Literatur auch als DCP<sup>®</sup> (Direct Croning Prozess) bezeichnet (EOS 2000). Während des Prozessablaufes werden die Sandpartikel schichtweise entsprechend dem vorliegenden CAD-Datensatz durch die thermische Energie des Laserstrahls über die Bindersubstanz Phenolharz zusammengefügt.

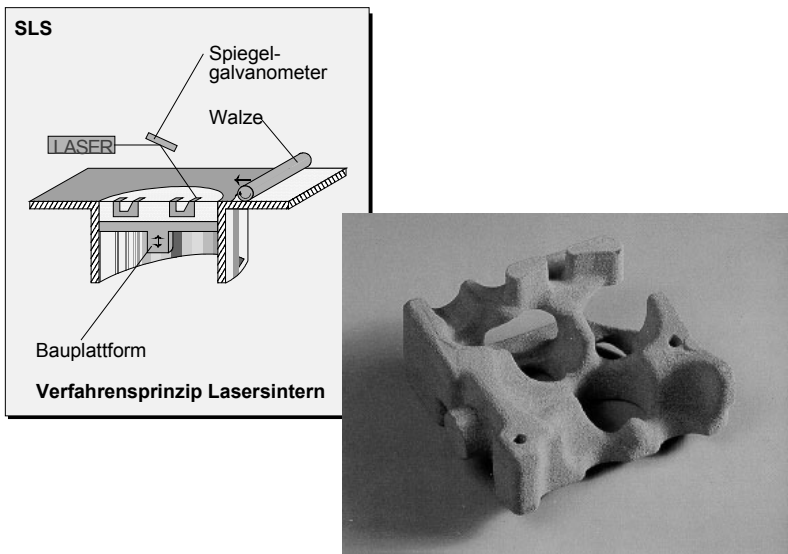


Abbildung 2-6: Der Prozess des Sand-Lasersinterns (EOS 2000)

Zur Herstellung von konturgebenden Formeinsätzen können mit diesem Verfahren Sandgusschalen beliebiger Geometrie hergestellt werden. Dabei entspricht die Sandform dem Negativ des späteren Formelementes. Da aufgrund der generativen und modelllosen Fertigung auch Hinterschnitte hergestellt werden können, muss die Gusschale nicht geteilt aufgebaut werden. Nach Erzeugung der Geometrie in der Lasersinteranlage werden die überschüssigen Sandpartikel entfernt und der Sinterling bei ca. 450°C ausgehärtet. Gegebenenfalls kann die Oberflächenqualität durch das Tauchen in Schlichtmaterialien verbessert werden. Anschließend kann die formgebende Kontur je nach beabsichtigtem Einsatzfall Spritz- oder Druckguss in Aluminium oder Stahl abgegossen werden (Hoffmann 2000). Entscheidende Nachteile dieses Verfahrens bestehen in der Bindung an das relativ große Toleranzfeld des Sandgussprozesses sowie in der beschränkten Darstellbarkeit filigraner Geometrieelemente (DIN ISO 8062).

### Direct Shell Production Casting (DSPC)

Grundlegendes Herstellungsprinzips des Fertigungsverfahrens Direct Shell Production Casting (DSPC) ist ebenfalls der schichtweise generative Aufbau einer

Gusschale für die gewünschte Kontur. Dazu wird unter Verwendung des am Massachusetts Institute of Technology entwickelten Verfahren des „Three Dimensional Printing“ (3DPT<sup>TM</sup>) eine Feingusschale ohne den Einsatz von verlorenen Modellen aufgebaut. Der Zusammenhalt zwischen den Keramikpartikeln wird zunächst durch eine Bindersubstanz gewährleistet. Durch selektiven Auftrag dieser Substanz entsprechend der Vorgabe des CAD-Datensatzes und erneutes Beschichten wird die Zielgeometrie erzeugt. Anschließend können die unverbundenen Partikel nach Beendigung des Herstellungsprozesses entfernt werden.

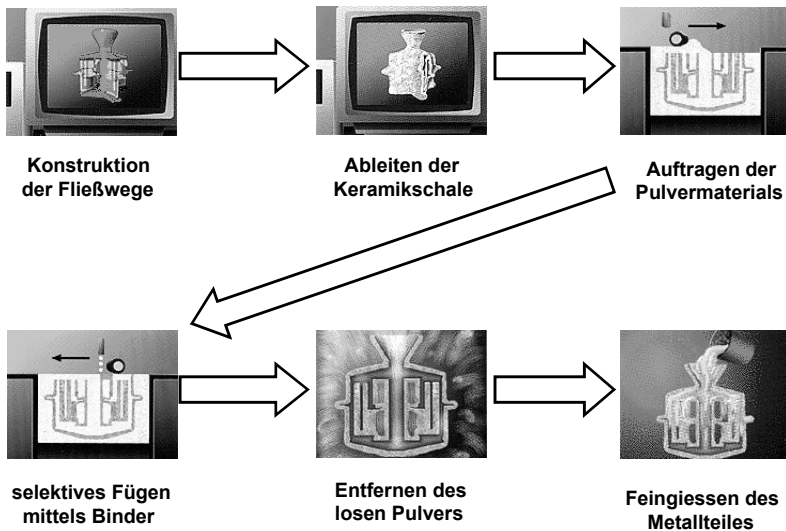


Abbildung 2-7: Prozessablauf des Direct Shell Production Casting (Solingen 2000)

Durch Brennen entsteht schließlich eine den normalen Feingussqualitäten entsprechende Keramikform, in der die formgebende Komponente mit Stahl oder Aluminium abgegossen werden kann (Sachs u.a. 1992, Smith 1997). Die Limitierungen dieses Verfahrens hinsichtlich Qualität und Zeitablauf sind im wesentlichen durch die Verwendung des Abformverfahrens Feinguss determiniert. Gegenwärtig ist die Verfügbarkeit des Verfahrens dadurch eingeschränkt, da es nach Lizenzerwerb exklusiv durch die amerikanische Firma Solingen als Dienstleistung angeboten wird (Uziel 1995, Solingen 2000).

### 2.3.1.3 Green Body Fabrication

Der Begriff Green Body Fabrication fasst alle Verfahren zusammen, die zur Überführung der Konturgeometrie von einem Mastermodell aus einem Ersatzwerkstoff in ein Metallteil den Umweg über die Herstellung eines sogenannten Grünteiles (Green Body) nehmen. Dieses Grünteil wird durch anschließende Versinterung in einen stabilen metallischen Werkstoff umgewandelt. Gegenwärtig werden drei Verfahren industriell eingesetzt, die wie beschrieben vorgehen. Sie sind unter den Bezeichnungen Keltool™, PHAST™ und NDM™ in der Literatur beschrieben (*Neumann 1997, Smith 1997, RP-ML 1997*). Das Keltool™-Verfahren ist ein Abformverfahren, das bereits vor ca. 25 Jahren von der Firma 3M erfunden wurde und unter dem Namen Tartan-Tooling kommerziell mit jedoch geringem Markterfolg angeboten wurde (*RP-ML 1997*). Ein wesentliches Problem war zum damaligen Zeitpunkt die verglichen mit der direkten konventionellen Fertigung von Werkzeugkonturen, unwirtschaftliche und zeitaufwendige Fertigung geometrisch komplexer Modelle. Mit industrieller Einführung der Stereolithografie als Modellherstellungsverfahren Ende der achtziger und Anfang der neunziger Jahre konnte dieser Nachteil eliminiert werden.

Das PHAST™-Verfahren ist eine Entwicklung der Firma Proctor & Gamble (*Smith 1997, S. 58f*), die exklusiv von Plynetics Express als Dienstleistung angeboten wurde. Bei NDM handelt es sich um ein von New Design Models Inc. entwickeltes und angebotenes Verfahren (*RP-ML 1997*).

Die drei Verfahren unterscheiden sich nur in Details wie den Technologien zur Herstellung der Mastermodelle sowie der chemischen Zusammensetzung der Bindersubstanzen und Pulvermetalle. Deshalb wird exemplarisch anhand des Keltool™-Verfahrens der prinzipielle Ablauf in Abbildung 2-8 auf Seite 25 dargestellt und erläutert. Grundsätzliche Voraussetzung für dieses Vorgehen ist das Vorhandensein eines Mastermodells des zu erzeugenden Metallkörpers oder seines Negativs, das entsprechend der späteren Prozessschwindungen vorskaliert wurde. Aufgrund der Fähigkeit, komplexe Geometrien schnell darzustellen, eignen sich dazu insbesondere die Rapid Prototyping-Verfahren wie z.B. die Stereolithografie.

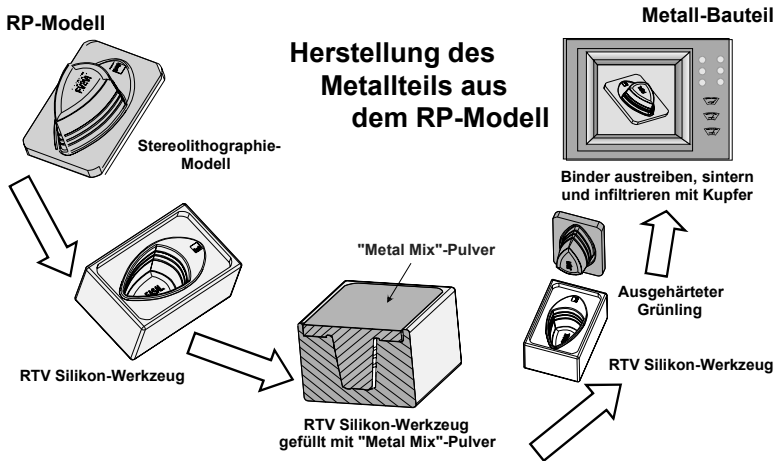


Abbildung 2-8: Herstellung eines Metallteils mittels eines Grünlings (Kegelman 1999)

Zunächst wird über Abformtechniken eine Silikonform des Formeinsatzes hergestellt. Je nachdem, ob als Modell die Geometrie des Formeinsatzes oder seines Negatives vorlag, sind dazu ein oder zwei Abformschritte notwendig. In diese Silikonform des zu erzeugenden Körpers wird ein spezieller pulverförmiger Werkstoff eingefüllt, der sowohl Metallpartikel als auch Bindersubstanzen enthält. Durch die inhomogene Korngröße zwischen  $1\mu\text{m}$  und  $20\mu\text{m}$  lagert sich das Gemisch sehr gut an der Innenwand der Silikonform an, so dass eine gute Oberflächenqualität entsteht. Unter ca.  $100^\circ\text{C}$  wird der enthaltene Binder in der Form ausgehärtet und die Geometrie des Körpers fixiert. Der so entstandene Grünling kann nun der Silikonform entnommen werden. Anschließend wird dieser Grünling in einem Ofen unter chemischer Reduktion der Bindersubstanz drucklos versintert und zur Schließung von Restporositäten über die Kapillarwirkung mit Kupfer infiltriert. Man erhält damit ein vollständig dichtes metallisches Bauteil, das zu 70% aus Werkzeugstahl und 30% aus Kupfer besteht. Aufgrund der beteiligten Abformprozesse und der thermischen Beaufschlagung des Grünlings bei der Versinterung und Infiltration sind mit diesen Verfahren im Vergleich mit konventionellen Fertigungsverfahren nur eingeschränkte Maßtoleranzen zu erreichen. Sie liegen derzeit bei ca.  $\pm 0,05\%$ . Zusätzlich ist die Durchlaufzeit für ein

einzelnes Bauteil aufgrund der zahlreichen Einzelschritte von der Modellherstellung bis hin zur Versinterung relativ lang (*Jacobs 1997, Neumann 1997, Schilling 1998, Kegelmann 1999*).

### 2.3.1.4 Senkerodieren

Das Erodieren ist ein thermisch abtragendes Fertigungsverfahren (*DIN 8580*). Dabei werden zwischen den beiden elektrisch leitenden Materialien des Werkstückes und der Erosionselektrode zeitlich getrennte, instationäre Entladungen erzeugt. Durch die hohe thermische Belastung der Materialien im Auftreffpunkt der elektrischen Ladungen können Partikel aus dem Werkstoffverbund herausgelöst werden. Um den Verschleiß der Elektrode in Grenzen zu halten wird für diese ein Werkstoff mit sehr guter elektrischer Leitfähigkeit wie beispielsweise Graphit oder Kupfer gewählt. Zur Verbesserung der Entladungsfähigkeit innerhalb des Funkenspaltes und zum Ausspülen der entstehenden Partikel findet der Prozess in einem flüssigen dielektrischen Medium statt (*Spur 1987*).

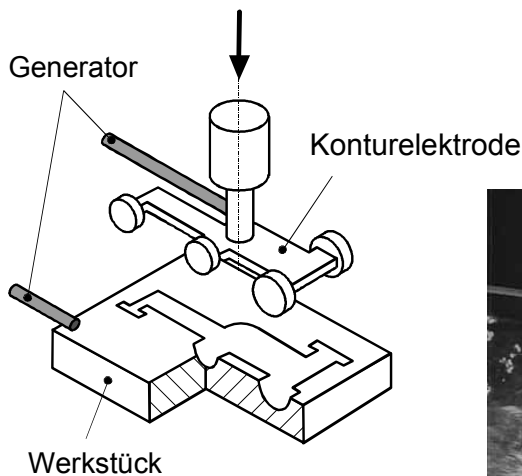


Abbildung 2-9: Funktionsweise der Senkerosion



Bei der Senkerosion wird dieses Verfahrensprinzip ausgenutzt, um eine Konturelektrode in ein Werkstück einzusenken. Es entsteht dabei eine inverse Geometrie der Elektrodenform (vgl. Abbildung 2-9). Daher können komplexe Geometrielemente wie tiefe Rippen oder scharfkantige Innenkonturen dargestellt werden, die mittels direkter spanender Bearbeitung nicht herstellbar wären. Da die Senkerosion nur auf die Leitfähigkeit des Werkstückes angewiesen ist, können alle metallischen Werkstoffe unabhängig von ihrer Festigkeit oder Härte bearbeitet werden. Beim Erodieren werden sehr hohe Maßgenauigkeiten im Bereich von 10 µm erzielt, wobei der Prozess weitgehend automatisiert ablaufen kann (*König 1990, Maidagan 1989*).

Diesen Vorteilen stehen bei der Senkerosion einige Nachteile gegenüber. Die Form der Elektrode muss zunächst am CAD-System entsprechend dem Negativ der Konturgeometrie abgeleitet werden. Anschließend muss der Elektrodenkörper z.B. durch Fräsen erzeugt werden. Erst im Anschluss an die Elektrodenfertigung kann mit der eigentlichen Senkerosion begonnen werden. Im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren ist die Materialabtragsrate des Senkerodierens als gering zu bezeichnen. Dementsprechend lange Bearbeitungszeiten sind für diesen Prozess vorzusehen (*Weckerle 1989*).

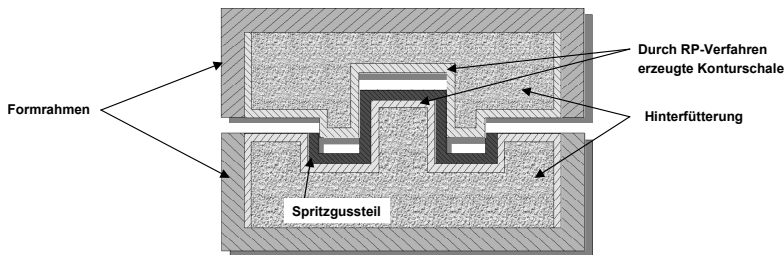
### 2.3.2 Direkte Fertigungsverfahren zur Konturerstellung

Im Gegensatz zu den unter Abschnitt 2.3.1 beschriebenen indirekten Konturfertigungsverfahren kann unter Verwendung der folgenden direkten Fertigungsverfahren der gewünschte Konturkörper ohne Umwege erzeugt werden. Alle im folgenden beschriebenen Fertigungsverfahren sind in der Lage, ohne folgende Abformtechnologie Kontureinsätze zu erzeugen, deren Material für den Einbau in ein Urformwerkzeug ausreichende mechanische Stabilität besitzt. Dadurch können unter Verwendung dieser Verfahren im allgemeinen kürzere Produktionszeiten realisiert werden. Aufgrund der z.T. jedoch sehr spezifischen Werkstoffe ist das Einsatzspektrum des hergestellten Kontureinsätze unter Umständen eingeschränkt.

#### 2.3.2.1 Bridge Tooling

Unter Verwendung der Rapid Prototyping-Technologien Stereolithografie sowie selektives Lasersintern können körperliche Elemente aus Kunststoffwerkstoffen

hergestellt werden. Trotz der vergleichsweise geringen mechanischen Stabilität können diese Bauteile bei geringer Stückzahlerwartung als konturgebende Formeinsätze in Spritzgießwerkzeugen eingesetzt werden. Eine Verwendung im Druckguss scheidet allerdings aus. Bei einem derartigen Vorgehen kann zwischen Massivbauweise und Schalenbauweise unterschieden werden. Im ersten Fall wird der Kontureinsatz massiv mit Hilfe eines Rapid Prototyping-Verfahrens aufgebaut und in das Spritzgießwerkzeug integriert. Bei der Schalenbauweise dagegen wird nur eine dünne Schale der Formkontur erzeugt und mit geeigneten Füllstoffen hinterfüllt. Hierbei kommt z.B. durch Aluminiumpulver verstärktes Epoxidharz zum Einsatz (Kochan 1999).



Stereolithographisch erzeugte Formeinsätze in Massivbauweise



Selektiv-lasergesinterte Formeinsätze aus Polyamid-Kupfer Gemisch

Abbildung 2-10: Aufbau und Varianten des Bridge Tooling

Je nach Einsatz der unterschiedlichen Rapid Prototyping Technologien ergeben sich folgende spezifischen Verfahrensvarianten:

### Stereolithografie

Das Funktionsprinzip der Stereolithografie ist nur unter Verwendung photopolymerisierbarer Werkstoffe möglich. Obwohl die Glasübergangstemperatur dieser stereolithografischen Werkstoffe bei ca. 70-150°C liegt, können mit massiven

Formeinsätzen aus diesen Materialien seriennahe Prototypenteile gegossen werden. Je nach Geometrie variiert die Stückzahl dabei zwischen 10 und 100 Teilen (*Jacobs 1997*). Aufgrund der stark thermisch isolierenden Eigenschaften des Werkstoffes müssen bei diesem Vorgehen allerdings deutlich verlängerte Zykluszeiten im Spritzgießprozess in Kauf genommen werden. Als Bezeichnung für dieses Vorgehen hat sich der Begriff „Direct AIM™“ etabliert (*3D-Systems 1998*). Zur Verkürzung der Bauzeit und Verringerung der Kosten kann neben der massiven Herstellung des Formelementes auch nur eine Stereolithografieschale hergestellt werden. Durch Hintergießen dieser Schale mit metallpulvergefüllten Harzen können der Wärmehaushalt der Prototypenform verbessert und die Zykluszeiten verringert werden. Die damit zusätzlich erzielte höhere mechanische Festigkeit des Formbaustoffes erhöht die Standmenge des Werkzeuges auf ca. 200 Teile (*Kruth u.a. 1997*).

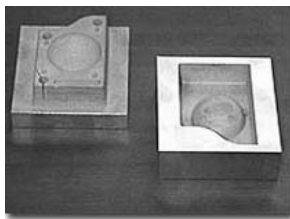
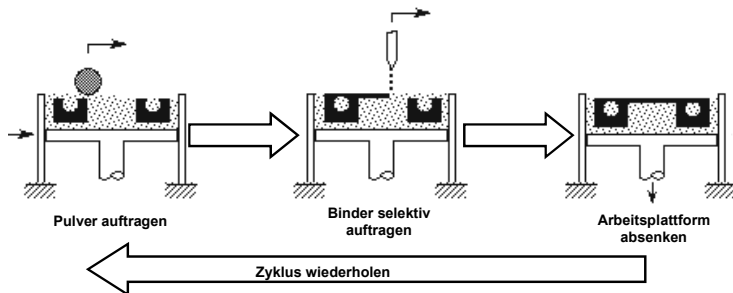
### **Selektives Lasersintern**

In Analogie zur Vorgehensweise bei der Herstellung von stereolithografischen Formeinsätzen können auch mit dem Rapid Prototyping-Verfahren des selektiven Lasersinterns urformtechnisch verwendbare Formeinsätze hergestellt werden. Aufgrund des thermischen Wirkprinzips des selektiven Lasersinterns ist die Materialpalette dieses Verfahrens wesentlich größer, wodurch mechanisch und thermisch stabilere Formeinsätze aufgebaut werden können. Ein Basiswerkstoff dieser Technologie ist z.B. Polyamid, dessen Glasübergangstemperatur bei ca. 180°C liegt (*Gornet 1997*). Dadurch können mit derartigen Formeinsätzen leicht höhere Stückzahlen erzielt werden, als bei der Verwendung stereolithografischer Komponenten. Weiterhin besteht die Möglichkeit, Polyamid bereits vor dem Bauprozess mit Kupferpulver zu vermischen und so das Verhalten des Formeinsatzes weiter zu verbessern (*Reinhart u.a. 1998B*).

### **2.3.2.2 Three Dimensional Printing (3DP™)**

Das grundlegende Bauprinzip des am MIT entwickelten Three Dimensional Printing (3DP™) wurde bereits unter Abschnitt 2.3.1.2 bei der Beschreibung des Direct Shell Production Casting erwähnt. Zusätzlich zeigt Abbildung 2-11 eine Zusammenfassung des Ablaufes. Zur direkten Herstellung von metallischen Konturformeinsätzen wird jedoch kein keramisches Pulver eingesetzt sondern Stahlpulver. Dieses Pulver wird zunächst selektiv durch schichtweises partielles Aufbrin-

gen eines Bindersubstanz zu einem Grünteil verbunden (*Rapid Prototyping Report 1997*).



**Beispiel Formeinsatz**



*Abbildung 2-11: Prozessablauf des Three Dimensional Printing (Extrude Hone 2000)*

Anschließend wird dieser Körper in einem Ofenprozess thermisch unter Extraktion der Bindersubstanz drucklos versintert. Es entsteht eine metallische Matrix, die jedoch aufgrund der entfernten Bindersubstanz noch Porositäten aufweist. In einem weiteren Ofenprozess werden diese Porositäten durch kapillare Infiltration mit dem niedrig schmelzenderen Metall Bronze aufgefüllt (*Extrude Hone 2000*). Das entstandene Metallteil besteht aus 60% Stahl sowie 40% Bronze und kann als Formeinsatz für Druck- und Spritzguss verwendet werden. Aufgrund der thermischen Beaufschlagung des Körpers im Rahmen der Versinterung und Infiltration können gegenwärtig nur Maßtoleranzen von  $\pm 0,3\%$  eingehalten werden (*RP-ML 1999*).

### 2.3.2.3 Direktes Metall-Lasersintern

Das Verfahrensprinzip des selektiven Lasersinterns eignet sich aufgrund der bereits unter Punkt 2.3.2.1 beschriebenen Bindung an den physikalischen Effekt des thermischen Schmelzens von pulverförmigen Ausgangsmaterial für eine Vielzahl von Werkstoffen. Neben der Verarbeitung von thermoplastischen und keramischen Werkstoffen beinhaltet insbesondere auch die Versinterung metallischer Werkstoffe für Anwendungen im Werkzeug- und Formenbau erhebliches Potential. Dabei können zwei unterschiedliche Strategien festgestellt werden:

Beim direkten Metall-Lasersintern wird die Matrix des metallischen Basiswerkstoffes allein mittels der durch den Laserstrahl bereitgestellten Energie zusammengefügt. Im Gegensatz dazu wird beim im folgenden Gliederungspunkt 2.3.2.4 dargestellten indirekten Metall-Lasersintern die Bauteilgeometrie zunächst nur durch die Versinterung einer Bindersubstanz dargestellt. Die eigentliche Materialfestigkeit wird durch anschließende thermischen Behandlung erzielt.

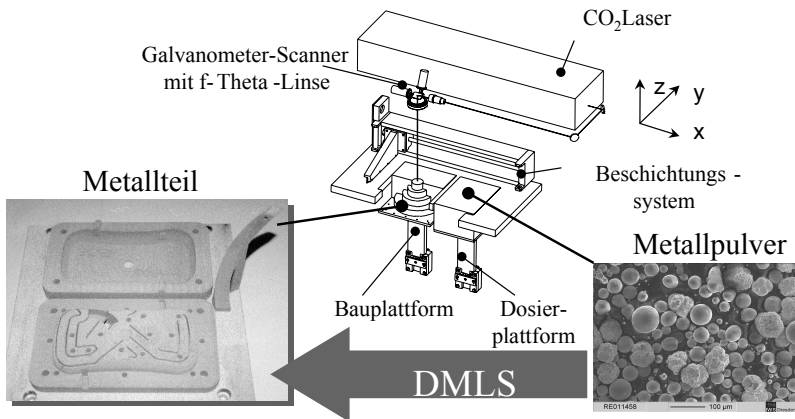


Abbildung 2-12: Der direkte Metall-Lasersinterprozess (Shellbear 1999)

Die direkte selektive Versinterung von homogenen metallischen Werkstoffen stellt einen sehr schwer beherrschbaren Prozess dar. Die physikalische Grundlage dieses Prozesses stellt das Flüssigphasensintern eines einzelnen Werkstoffes dar (Wieters u.a. 1996). Aufgrund der hohen punktuellen Energieeinbringung und der starken Oberflächenspannung der metallischen Schmelze ist die Gefahr, er-

hebliche thermische Spannungen in den Bauteilen zu induzieren, sehr groß (*Song 1996*). Derzeit ist es daher lediglich möglich, Werkstoffe wie Edelstahl oder Werkzeugstahl aus pulverförmigen Zustand in geometrisch definierte Objekte mit nahezu vollständiger Dichte und Materialfestigkeit zu überführen. Hinsichtlich Bauteilverzug und Oberflächenqualität können mit diesen einphasigen Werkstoffen keine für den Werkzeugbau ausreichenden Eigenschaften erreicht werden (*Klocke u.a. 1996*).

Bei der Verwendung mehrkomponentiger Materialsysteme können die schwierigen Problemfelder der einphasigen Versinterung vermieden werden. In diesem Fall wird nur die Komponente des Materialsystems mit dem geringsten Schmelzpunkt versintert, während die anderen Bestandteile lediglich Aufgaben zur Armierung oder zur Volumenkompensation des Materialverbundes erfüllen. Aufgrund des dadurch deutlich geringeren Temperaturniveaus werden Schwindung und Verzug beherrschbar. Das einzige derzeit kommerziell verfügbare Verfahren zum direkten Metall-Lasersintern der Firma EOS arbeitet daher mit mehrphasigen Werkstoffsystemen. Es stehen dabei zwei unterschiedliche Materialsysteme und Prozessführungen zur Verfügung:

### **DirectMetal**

Als Ausgangsmaterial dieses Metall-Lasersinterverfahrens wird ein Mehrphasen-Materialsystem aus Bronze, Nickel, sowie Kupferphosphid mit einer mittleren Partikelgröße von 50  $\mu\text{m}$  verwendet. Die prozentuale Mischung dieser Bestandteile erlaubt aufgrund von Volumenkompensation eine weitgehend schwindungs- und verzugsfreie direkte Versinterung zu einer Materialdichte von etwa 70%. Daher können relativ hohe geometrische Genauigkeiten von  $\pm 0,05\%$  erzielt werden (*Lohner 1996*). Um derartige Bauteile in urformenden Prozessen als Werkzeugkomponenten einzusetzen, muss die Porosität durch anschließende Infiltration mit Epoxydharz oder Weichlot beseitigt werden. Die Infiltration des Epoxydharzes findet unter Vakuum und einer Temperatur von lediglich 160 °C statt. Gegenüber der Infiltration mit Weichlot, die aufgrund der höheren Prozesstemperatur von ca. 400 °C erneut thermische Spannungen induziert, hat sie den Vorteil der besseren geometrischen Genauigkeit. Beide Infiltrate weisen allerdings eine für die Anwendung Druckguss ungenügende Temperaturstabilität auf. Daher sind nach dem System DirectMetal hergestellte Formelemente lediglich für den Spritzguss geeignet (*Geiger 1997*).

### **DirectSteel**

Auch der von der Herstellerfirma EOS GmbH sogenannte DirectSteel Prozess verwendet ein Mehrphasensystem. Dabei liegen innerhalb des pulverigen Ausgangswerkstoffes unterschiedliche Stahllegierungen vor. Diese Legierungen zeigen sich durch unterschiedliche Schmelzpunkte sowie in geeigneter Mischung durch nahezu volumenkonstantes Verhalten unter thermischer Beaufschlagung aus (*Rapid Prototyping Report 1998*). Die mittlere Partikelgröße liegt auch bei dieser Prozessvariante bei ca. 50  $\mu\text{m}$ . Der Ausgangswerkstoff wird in der Lasersinteranlage ohne folgenden Ofenprozess vollständig versintert. Dabei wird der Sinterling auf eine Bauplattform aufgebaut, die für folgende spanende Bearbeitungsschritte als Spannvorrichtung sowie als Aufnahme im Urformwerkzeug verwendet werden kann. Aufgrund der höheren Schmelzpunkte der Stahllegierungen gegenüber der Nichteisenmetalle des DirectMetal-Prozesses ist jedoch mit deutlich höheren Prozesslaufzeiten zu rechnen. Allerdings erscheint dieses Materialsystem im Gegensatz zum DirectMetal auch für Druckgussanwendungen geeignet zu sein. In ersten Anwendungen konnten wenn auch sehr geringe Stückzahlen in urformenden Werkzeugen erreicht werden, die mit DirectSteel Formeinsätzen bestückt waren (*Shellabear 1999*).

### **2.3.2.4 Indirektes Metall-Lasersintern**

Der indirekte Metall-Lasersinterprozess ist bereits seit ca. 5 Jahren kommerziell verfügbar. Im Verlauf dieser Zeit wurden von der Herstellerfirma DTM Corporation verschiedene Evolutionsstufen des Materialsystems unter den Markenbezeichnungen RapidSteel 1.0, RapidSteel 2.0 und LaserForm ST vertrieben. Einher gingen leichte Modifikationen in der Prozessführung, allerdings werden bei allen Prozessvarianten die selben physikalischen Wirkmechanismen eingesetzt.

Auch bei diesem Prozess beruht die Herstellung der Bauteilgeometrie auf dem grundsätzlichen Prinzip des selektiven Lasersinterns. Den prinzipiellen Prozessablauf zeigt Abbildung 2-13. Als Ausgangsmaterial liegt eine Pulvermischung aus einer Edelstahllegierung und einem thermoplastischen Polystyrolerivat der mittleren Korngröße 50  $\mu\text{m}$  vor. Im Vergleich zum direkten Metall-Lasersintern (siehe Abschnitt 2.3.2.3) wird jedoch zunächst nicht der metallische Matrixwerkstoff versintert sondern die Bindersubstanz versintert. Es entsteht ein Grünteil der gewünschten Geometrie der Werkzeugkomponente mit nur geringer mechanischer Festigkeit. Im weiteren Verlauf wird der Grünling in einem Graphittiegel

platziert und komplett mit Aluminiumoxidpulver bedeckt. Dieser Tiegel wird in einen gasdichten Retortenofen gestellt.

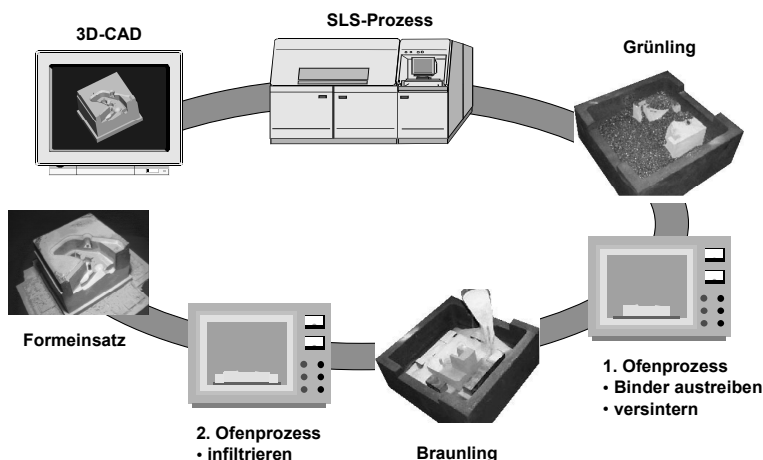


Abbildung 2-13: Prozessablauf des indirekten Metall-Lasersinterns (Breitinger & Lorenzen 1997)

In einem ersten Ofenprozess wird unter Steigerung der Temperatur zunächst aufgrund der Beaufschlagung der Ofenkammer mit einer Wasserstoff-Stickstoff Atmosphäre der thermoplastische Binder durch chemische Reduktion extrahiert. Während dieser Phase werden die Metallpartikel nur durch die Reibung untereinander und die Stützwirkung des Aluminiumoxidpulvers aufeinander gehalten. Bei weiterer Steigerung der Prozesstemperatur bis auf ca. 600 °C beginnt durch Diffusion der Korngrenzen der drucklose Sinterprozess zur Herstellung der Materialfestigkeit. Nach Beendigung des ersten Ofenprozesses liegt ein sogenannter Braunling vor. Dieses Bauteil weist bereits aufgrund der versinterten Edelstahlmatrix eine erhebliche mechanische Festigkeit auf, ist jedoch durch die Extraktion des Polymerbinders mit ca. 40% Porosität behaftet. Um das Bauteil als Formeinsatz in einem Urformverfahren einzusetzen, werden daher in einem zweiten Ofenprozess die Fehlstellen durch kapillare Infiltration mit Bronze beseitigt. Im Endzustand weist der entstandene Körper aus Stahl-Bronze Infiltrationsmetall eine Festigkeit auf, die mit der Aluminiumlegierung Al7075 vergleichbar ist.



(Seitz 1996). Da der Schmelzpunkt dieses Kompositmetalles bei ca. 900 °C liegt, können mit derartig hergestellten Werkzeugkomponenten sowohl Druckgieß- als auch Spritzgießwerkzeuge bestückt werden (Pieverling u. a 1998). Der größte Nachteil dieses Prozesses liegt in der Schwindungsproblematik aufgrund der hohen thermischen Belastung während des Sinterprozesses. Daher ist die erreichbare Maßgenauigkeit auf ca. 0,15% beschränkt (Breitinger 2001).

### 2.3.2.5 Fräsen

Das Fräsen wird in den entsprechenden Normen innerhalb der trennenden Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide klassifiziert (DIN 8589). Das Verfahren ist gekennzeichnet durch eine kreisförmige Schnittbewegung mit meist mehrschneidigen Werkzeugen, wobei die Vorschubbewegung senkrecht oder schräg zur Rotationsachse des Schnittwerkzeuges verläuft.

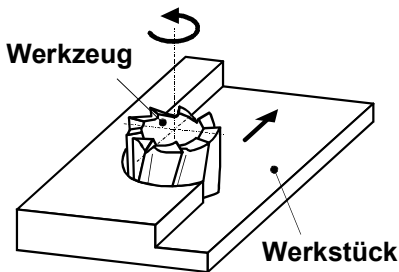


Abbildung 2-14: Verfahrensprinzip des Fräsens

Bei der allgemeinen mechanischen Bearbeitung werden zur Erzeugung regelgeometrischer Elemente die Verfahrensarten Umfang-, Stirn- oder Stirn-

Umfangfräsen bevorzugt. Demgegenüber müssen bei der Konturfertigung im Werkzeug- und Formenbau vielfach freigeformte Geometriefeatures erzeugt werden (*Weck 1991*). Da sie nicht direkt über entsprechende Werkzeugkonturen ausgearbeitet werden können, werden sie durch zeilenweises Formfräsen mit Kugel- oder Torusfräsern angenähert. In der Vergangenheit wurde die Führungsbahn von einem körperlichen Modell abgetastet und auf sogenannten Kopierfräsmaschinen mechanisch auf die Arbeitsspindel umgesetzt. Seit Einführung der Datenverarbeitung in der Produktionstechnik werden die im CAD-System erzeugten Geometriedaten von einem CAM-System zu Fräsbahnen verarbeitet (*Dietz & Frank 1989*). Diese Führungsgröße wird von der CNC-Steuerung der Fräsmaschine in Achsbewegungen umgesetzt. Das Fräsen zeichnet sich durch hohe Zerspanungsleistung, ausgezeichnete erzielbare Oberflächengüte bis  $R_a 0,3 \mu\text{m}$  sowie hohe Genauigkeit von bis zu  $\pm 0,01 \text{ mm}$  aus (*König 1984*). Zudem kann nahezu jeder Werkstoff verarbeitet werden. Lediglich die geometrische Flexibilität ist durch das Wirkprinzip der rotatorischen Schnittbewegung eingeschränkt. So können beispielsweise keine rechtwinkligen Innenecken erzeugt werden (*Sandvik 1996*).

Für die Fertigung von Konturelementen für urformende Betriebsmittel haben sich im wesentlichen zwei kinematische Konzepte als geeignet herausgestellt. Diese beiden Verfahrensarten werden anhand der Anzahl der jeweils vorliegenden Freiheitsgrade der Vorschubantriebe charakterisiert:

### 3-Achs Fräsen

Beim 3-Achs-Fräsen spiegelt die Kinematik der Maschine die Anordnung der kartesischen Koordinaten wieder. Aufgrund des Maschinenaufbaus ist die Lage der Vorschubachsen und der Bearbeitungsspindel immer senkrecht zueinander. Schräge Flächen können nur durch geneigtes Fixieren des Werkstückes auf dem Arbeitstisch realisiert werden. Diese Einschränkungen spielen für die Bearbeitung von freigeformten Konturelementen nur eine untergeordnete Rolle, da sie ohnehin mit einem kalottenförmigen Werkzeug zeilenweise angenähert werden (*Hock & Janovsky 1992*). Weitere Vorteile dieses Konzeptes liegen in der übersichtlichen Aufspannsituation mit relativ geringem Kollisionsrisiko sowie der einfachen Generierung von Führungsgrößen mittels moderner CAM-Systeme. Allerdings bringt diese relativ unflexible Bearbeitungssituation Nachteile mit sich. Je nach Neigungswinkel der zu bearbeitenden Oberfläche wandert der Kontaktpunkt zum Werkstück auf der Oberfläche des Werkzeuges. Dadurch verändert sich der wirksame Radius zur Drehachse, so dass sich bei konstanter Bear-

beitungsdrehzahl jeweils unterschiedliche Schnittgeschwindigkeiten ergeben. Im ungünstigsten Fall einer horizontalen Fläche fallen Kontaktpunkt und Drehachse zusammen, so dass in diesem Punkt der sogenannte Nullschnitt herrscht. Das bedeutet, es findet keine Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeugschneide mehr statt. Diese Situation wirkt sich ungünstig auf die Oberflächenqualität und das Standzeitverhalten der Werkzeuge aus. Durch Einsatz eines Torus- anstelle eines Kugelfräasers kann diese Situation jedoch sehr leicht vermieden werden (*Camacho 1991*). Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass bei sehr hohen und steilen Teilen aus Gründen der Zugänglichkeit im Grund der Konturelemente nur sehr lang auskragenden Werkzeugen gearbeitet werden muss. Dies wirkt sich negativ auf die Prozesssicherheit, Oberflächenqualität und die Zerspanungsleistung aus (*Werner 1993*).

### 5-Achs Fräsen

Besitzt die Bearbeitungsmaschine im Vergleich zur kartesischen Kinematik der dreiachsigen Fräsmaschine zwei weitere Freiheitsgrade, so wird von einer fünfachsignen Bearbeitung gesprochen. Die zusätzlichen Freiheitsgrade werden technisch mittels der Installation von zwei Drehachsen realisiert. Je nach Maschinenkonzept können diese Drehachsen sowohl beide auf die Maschinenspindel, beide auf den Aufspanntisch oder verteilt auf das Maschinengestell einwirken.

Die größere kinematischen Freiheit der fünfachsignen Bearbeitung eröffnet verschiedene Vorteile. Durch die in Abbildung 2-15 rechts dargestellte Möglichkeit jeweils in Richtung der Flächennormalen zu arbeiten, können bei Verwendung großer torischer Werkzeuge bessere Oberflächen bei zugleich geringeren Hauptzeiten realisiert werden (*Eversheim u.a. 1989*). Durch das Anstellen der Bearbeitungsachsen können zudem unzugängliche Stellen mit vergleichsweise kurzen Werkzeugen abgearbeitet werden. Dadurch kann die Prozesssicherheit gesteigert werden (*Brunotte 1992*).

Auf der anderen Seite beinhaltet die 5-Achs-Bearbeitung auch einige Nachteile, die ihre weite industrielle Verbreitung bislang verhindert haben. Die beiden zusätzlichen Freiheitsgrade der Bearbeitungsmaschine wirken sich negativ auf die Stabilität des Maschinengestelles aus. Die Dynamik der rotatorischen Zustellachsen fällt deutlich gegenüber den translatorischen Achsen ab. Durch die Bearbeitung auf der Flächennormalen sind jedoch gerade bei komplexen Urformkonturen größere Umorientierungen der Bearbeitungsachsen notwendig, die sich insbesondere im Hinblick auf den allgemeinen Trend zur Hochgeschwindigkeitsbearbeitung nicht in geeigneter Zeit realisieren lassen (*Eversheim & Pollack 1994*).

Weiterhin erfordert die Programmierung der simultanen fünfachsigigen Fräsbearbeitung einen erheblichen zusätzlichen Aufwand. Insbesondere die Kollisionskontrolle ist wesentlich komplexer und ohne den Einsatz von 3D-Simulationssystemen nicht effizient durchführbar (*Dietz und Frank 1989*). Als letzter entscheidender Punkt ist der theoretische Vorteil der Verwendung größerer torischer Werkzeuge aufgrund des Nachschnittes im Grund von Kavitäten nicht nutzbar. Der Einsatzbereich beschränkt sich damit auf konvexe Formkonturen. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Anteil an simultanen fünfachsigigen Bearbeitungen im Werkzeug- und Formenbau bei lediglich 5% liegt (*Hock & Janovsky 1992*).

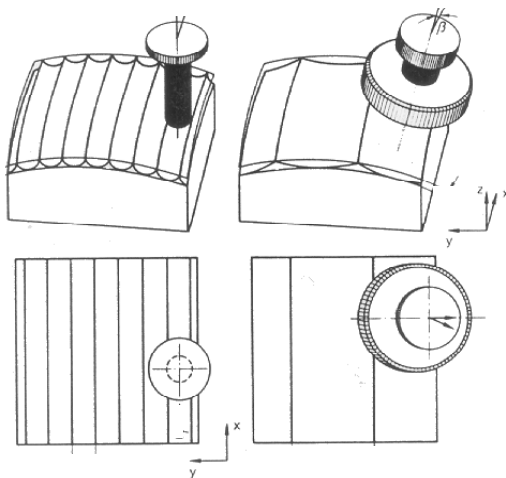


Abbildung 2-15: Gegenüberstellung der Zeilung des 3-Achs- und des 5-Achs-Fräsens

Um den genannten Problemen aus dem Weg zu gehen und dennoch die Vorteile ausnutzen zu können, wird im Werkzeug- und Formenbau gegenwärtig bei geeigneten Geometriebereichen folgender Kompromiss eingesetzt. Um das Nullschnittproblem in flachen Bereichen auszuschalten sowie an steilen, hohen Wänden mit kürzeren Werkzeugen arbeiten zu können, wird mit ca.  $10^\circ$ - $30^\circ$  gegen-

über der Senkrechten angestellter und fixierter Bearbeitungsachse gefräst. Auf diese Weise wird der Programmier- und Simulationsaufwand gering gehalten.

### 2.3.2.6 Hochgeschwindigkeitsbearbeitung

Innerhalb der Gruppe der spanenden Fertigungsverfahren führten Entwicklungsfortschritte auf den Gebieten der Maschinenkomponenten und der Schneidstoffe in den letzten Jahren zu einer verstärkten Fokussierung auf die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. Gerade zur Herstellung von Konturgeometrien für den Werkzeugbau ist das universell einsetzbare HSC-Fräsen bereits heute den konventionellen Verfahrensvarianten bezüglich Wirtschaftlichkeit, Flexibilität und Reaktionsfähigkeit überlegen (Hock 1996).

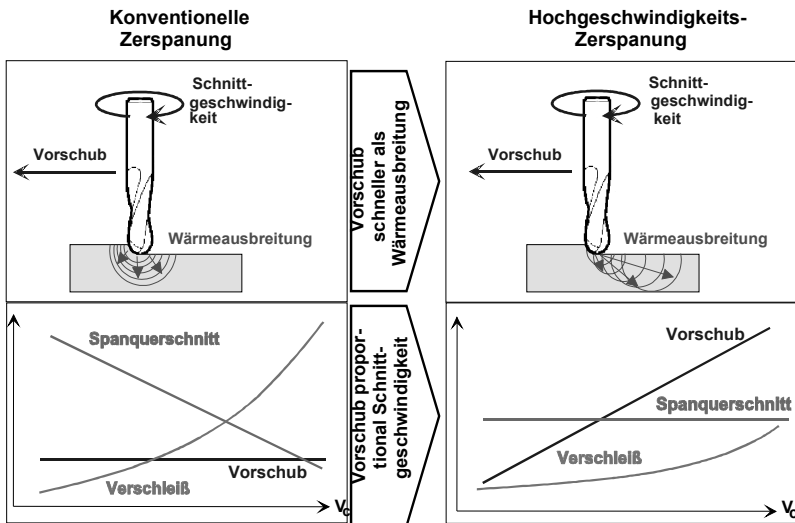


Abbildung 2-16: Unterschied der konventionellen zur Hochgeschwindigkeitszerspanung

Beim Hochgeschwindigkeitsfräsen handelt es sich um ein eigenständiges Fertigungsverfahren mit sehr spezifischen Anforderungen und Leistungsdaten und nicht nur um eine beschleunigte Variante des bisher bekannten FräSENS. Entgegen der ursprünglichen Annahme nimmt die Span-, Schneiden- und Werkstücktempe-

ratur bei steigender Schnittgeschwindigkeit und abnehmenden Spanungsdicken immer weiter zu. Der damit verbundene prinzipiell höhere Werkzeugverschleiß kann jedoch durch verschiedene Maßnahmen so weit minimiert werden, dass wirtschaftliche Betriebsstundensätze bei höherer Produktivität erzielt werden (*Friedhoff & Enselmann 1998*).

Wird zur Einhaltung konstanter Spanquerschnitte die Vorschubgeschwindigkeit proportional zur Schnittgeschwindigkeit gesteigert, nimmt die Temperatur an der Schneide nicht mehr proportional zu, da die Vorschubgeschwindigkeit die Wärmeleitgeschwindigkeit des Werkstoffes übersteigt (vgl. Abbildung 2-16). Die Wärmeausbreitung von der Kontaktstelle in den Grundwerkstoff wird reduziert und größtenteils über die Späne abgegeben, so dass der Bearbeitungszustand langfristig stabil und der Verschleiß wirtschaftlich bleibt (*Schulz 1996*).

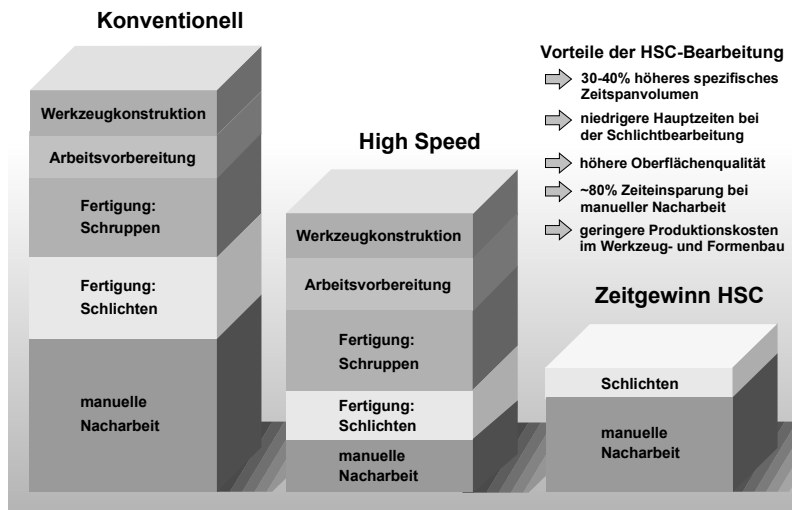


Abbildung 2-17: Einsparpotentiale der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung gegenüber konventioneller spanender Bearbeitung

Die typische Bearbeitungsfolge gliedert sich bei der spanenden Fertigung im Konturbereich nach der datentechnischen Vorbereitung in Schruppen zur Materialentfernung, Schlichten zur zeilenweisen Annäherung der Kontur und die manuelle Nacharbeit zum Finish der Oberfläche. Im Bereich der Schruppbearbeitung

sind große Zeitspanvolumina gefordert, die durch die Verwendung größerer Werkzeuge und höherer Zustellungen erzielt werden. Aufgrund der beschränkten Querkraftaufnahmefähigkeit und Antriebsleistung der verwendeten Hochfrequenz-Motorspindeln können die Zerspanungskräfte für HSC nicht beliebig hoch sein. Ein Vorteil gegenüber der konventionellen Bearbeitung ist an dieser Stelle nicht generell zu erzielen (*Pieverling 1998*).

Die Schlichtbearbeitung und das manuelle Polieren beinhalten dagegen das größte Zeit- und Kosteneinsparungspotential. Sowohl der Zeitaufwand der Schlichtbearbeitung als auch der Aufwand der manuellen Handarbeit stehen beim Werkzeug- und Formenbau im Zusammenhang mit der Rauhtiefe. Je geringer die bei der Schlichtbearbeitung hergestellte Rauhtiefe, desto geringer der Aufwand für nachträgliche Polier- und Tuchierarbeiten. Aufgrund der Festlegung des Fräserdurchmessers durch vorhandene Formelemente kann die Oberflächenqualität i.a. nur durch eine engere Zeilung verbessert werden, die bei konventioneller Fräsbearbeitung mit einer enormen Hauptzeitenverlängerung erkaufte wird. Unter Einsatz des HSC-FräSENS kann die Zeilendichte und so die Oberflächenqualität gesteigert werden, ohne längere Hauptzeiten für die Schlicht und Vorschlichtbearbeitung aufzuwenden. Damit wird die Nacharbeit beträchtlich verringert oder u.U. sogar ganz eliminiert (*Schock 1996*).

### 2.3.2.7 Drehen und Drehfräsen

Wie das unter Abschnitt 2.3.2.5 beschriebene Fräsen stellt auch das Drehen eine Verfahren aus der Gruppe „Trennen mit geometrisch bestimmter Schneide“ dar (*DIN 8589*). Wie Abbildung 2-18 zeigt, können allerdings bei diesem Verfahren aufgrund der Kinematik, rotatorische Schnittbewegung mit Vorschubbewegung quer zur Drehachse, im Normalfall lediglich rotationssymmetrische Geometrien erzeugt werden. Konturelemente die diesen Voraussetzungen genügen, treten im Prototypenwerkzeugbau selten auf, wobei das Verfahren Drehen jedoch aufgrund seines Alleinstellungsmerkmals bei derartigen Konturgeometrien nahezu ausschließlich zum Einsatz kommt. Mit Drehen können hinsichtlich Genauigkeit ( $\pm 0.005 \text{ mm}$ ) und Oberflächenqualität ( $R_a \geq 0.2 \text{ }\mu\text{m}$ ) sehr niedrig tolerierte Geometrieelemente erzeugt werden (*Storf 1987*).

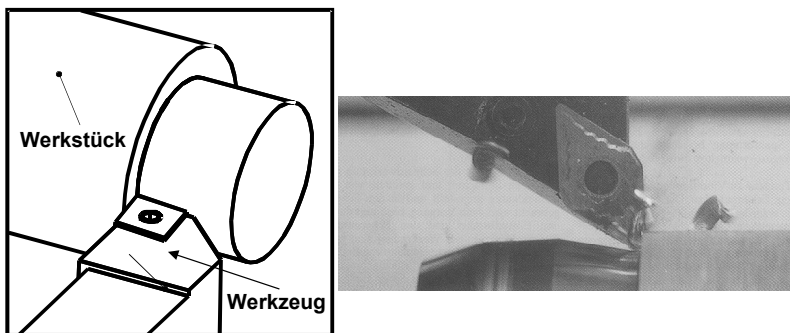


Abbildung 2-18: Verfahrensprinzip des Drehens

Eine weitere Verfahrensvariante des Drehens, die zur Vervollständigung erwähnt werden muss, ist das Drehfräsen. Dabei wird das feststehende Drehwerkzeug durch ein rotierendes Fräswerkzeug ersetzt.

### 2.3.2.8 Drahterodieren

Das Drahterodieren wird oft auch als funkenerosives Schneiden bezeichnet. Das dabei eingesetzte Funktionsprinzip des thermischen Abtrages aufgrund instationärer elektrischer Entladung wurde bereits beim Fertigungsverfahren Senkerodieren unter Abschnitt 2.3.1.4 erläutert. Im Gegensatz zur Senkerosion wird jedoch kein entsprechend der zu erzeugenden Kontur ausgearbeitete Formelektrode benötigt. Bei diesem Verfahren besteht die Werkzeugelektrode aus einem kontinuierlich durchlaufenden Draht dessen mittels einer numerischen Steuerung kontrollierten laterale Bewegungen relativ zum Werkstück die Bauteilkontur erzeugen (Feurer 1983). Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 2-19 auf Seite 43 eine schematische Darstellung des Prozesses.

Je nach Durchtrittswinkel des Drahtes gegenüber der Werkstückoberfläche sowie den Freiheitsgraden der Drahtaufhängungspunkte relativ zueinander wird zwischen zweiachsigen oder vierachsigen Drahterodieren unterschieden. Während beim zweiachsigen Drahtschneiden oberer und unterer Drahtführungspunkt gekoppelt sind und so nur einfache 2D Konturen ausgearbeitet werden können, sind



durch Verschränkung der Drahtelektrode und voneinander unabhängige Programmierung und Bewegung der Aufhängungspunkte beim vierachsigen Draht-erodieren komplexe Konturschnitte möglich. Die Verfahrensdaten hinsichtlich Genauigkeit liegen im Bereich von  $\pm 0,01$  mm. Gleichzeitig können Oberflächenqualitäten von bis zu  $R_a 0,4 \mu\text{m}$  erzeugt werden (Birzer 1990).

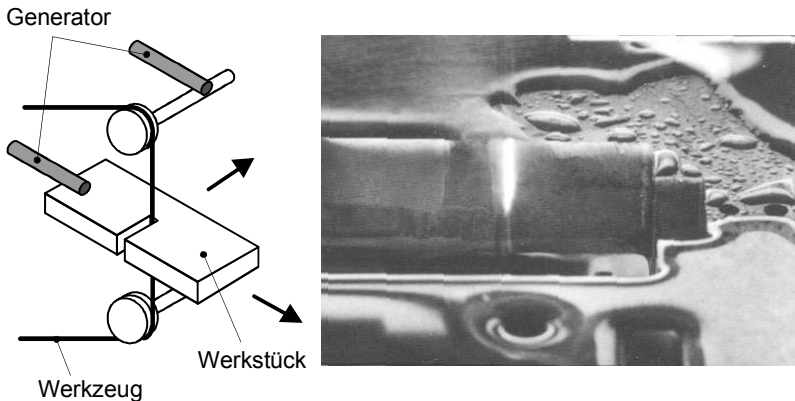


Abbildung 2-19: Verfahrensprinzip der Drahterosion

### 2.3.3 Konturfertigungsverfahren im Forschungsstadium

Aufgrund der industriellen Umsetzbarkeit der Strategie Rapid Tooling wurden in den vorangegangenen Abschnitten nur Konturfertigungsverfahren beschrieben, die kommerziell verfügbar sind. Als Abschluss und zur Vervollständigung des Punktes 2.3 Fertigungsverfahren zur Prototypenwerkzeugherstellung werden unter diesem Punkt einige Verfahren vorgestellt, die sich noch im Forschungsstadium befinden, jedoch Potential für die Konturfertigung beinhalten.

#### Laminated Objekt Manufacturing

Das Rapid Prototyping Verfahren Laminated Objekt Manufacturing, bei dem durch das Aufeinanderfügen und lasergestütztes Beschneiden von Papierschichten dreidimensionale Objekte hergestellt werden, wird bereits industriell als Formbauverfahren für die Tiefziehtechnik genutzt (Geiger 1997). Im Forschungsbereich wurden bereits Versuche unternommen, diese Technologie auch

für das Spritzgießen zu verwenden (*Kochan & Müller 1997*). Darüber hinaus erscheint bei der Verwendung metallischer Lamine auch die Anwendung im Druckgießwerkzeugbau als möglich (*Dickens 1996*).

### **Lasergenerieren**

Unter dem Begriff des Lasergenerierens werden unterschiedliche Ansätze zusammengefasst, die sich alle auf ein ähnliches Verfahrensprinzip stützen. Dabei wird durch gezielte Zuführung von pulver- oder drahtförmigen Ausgangsmaterial in den Fokus eines Laserstrahls ein schichtweiser Materialaufbau entsprechend dem CAD-Datensatz durchgeführt. Alle drei derzeit bekannten Verfahrensvarianten verwenden Stahllegierungen als Werkstoffe, so dass Formeinsätze für alle urformenden Zielprozesse hergestellt werden können.

Die Forschungsarbeiten der Sandia National Laboratories aus Albuquerque auf diesem Gebiet wurden unter dem Begriff Laser Engineered Net Shaping (LENS™) publiziert (*Griffith u.a. 1996*). Das Verfahren wird derzeit kommerziell von der Firma Optomec für die direkte Herstellung metallischer Prototypen und als Reparaturverfahren angeboten. Eine Anwendung im Spritzguss ist nur unter besonderen Voraussetzungen wirtschaftlich (*Optomec 2000*).

Die entsprechenden Arbeiten des an der Stanford University entwickelten Prozesses wurden als Shape Deposition Manufacturing (SDM) bezeichnet (*Cooper u.a. 1998*). Als Besonderheit weist dieser Prozess sowie die am Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie in Zusammenarbeit mit der Firma Röders entwickelte Verfahrensvariante Controlled Metal Build Up (CMB) nach der Generierung jeder Schicht einen frästechnischen Bearbeitungsschritt auf (*Klocke & Clemens 1996*). Dies erhöht die Genauigkeit des Prozesses erheblich, verlängert allerdings auch die Prozesszeiten. Derzeit wird das CMB-Verfahren als Reparaturtechnologie für Werkzeuge industriell genutzt (*N.N. 1999*).

### **Generative Fertigung von Erosionselektroden**

Zur Vermeidung der aufwendigen frästechnischen Herstellung von Konturelektroden für die Senkerosion wurden Untersuchungen angestellt, die Elektrodenkontur mit Hilfe des Lasersinterns herzustellen. Ausgangsprozess war das indirekte Metall-Lasersintern, wobei jedoch mit einer speziellen Werkstoffvariante gearbeitet wurde. Als Matrixwerkstoff wurde Zirkoniumbaborid über einen Polymerbinder zu einer Dichte von ca. 70% gefügt und nach der anschließenden Versinterung im Retortenofen mit Kupfer infiltriert. Zum gegenwärtigen Entwicklungsstand konnte die prinzipielle Machbarkeit nachgewiesen werden. Probleme wie

der gegenüber konventionell gefertigten Kupferelektroden deutlich höhere Elektrodenverschleiß sowie Genauigkeitseinbußen sind noch zu optimieren (*Stucker u.a. 1995*).

### **Weiterentwickelte Lasersinterverfahren**

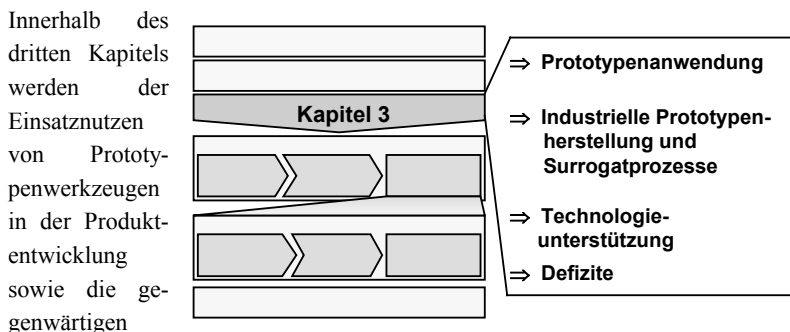
Das als Selective Laser Reaction Sintering (SLRS) bezeichnete Verfahren ist auf dem Lasersinter-Verfahren aufgebaut. Beim Gas/Pulver-SLRS treten im Laserstrahl Reaktionen zwischen dem Pulver und einer reaktiven Atmosphäre auf. Das bekannteste Beispiel ist die Reaktion von hochreinem Aluminiumpulver mit Sauerstoff aus einer Luftatmosphäre. Durch die partielle Wärmeerbringung mit Hilfe eines Lasers erreicht das Aluminiumpulver die Schmelztemperatur von 660 °C und verbindet sich mit dem Sauerstoff zum keramischen Werkstoff  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (*Birmingham & Marcus 1995*).

Bei dem als Selective Area Laser Deposition (SALD) genannten Verfahren wird mit Hilfe eines Laserstrahls eine Gasatmosphäre in ihre Bestandteile zerlegt, die sich schichtweise ablagern und auf diese Weise ein Bauteil bilden. Die bekanntesten Untersuchungen sind Arbeiten mit Siliziumkarbiden und Siliziumnitriden (*Jakubenas & Marcus 1995*). Das Einsatzgebiet des SLRS- und des SALD-Verfahrens ist in erster Linie die Herstellung von keramischen Prototypen, jedoch sind auch Werkzeugkomponenten denkbar.

### **2.3.4 Zusammenfassung**

Wie in den vorangegangenen Abschnitten bereits beschrieben, steht eine sehr große Anzahl an Verfahrensalternativen zur Herstellung von formgebenden Geometrieelementen zur Verfügung. Aufgabe des im weiteren Verlauf dieser Arbeit folgenden Abschnittes 5.2 ist es, die Eigenschaften der verschiedenen Prozesse auszuwerten und mittels einer Vorauswahl die Anzahl der möglichen Fertigungsverfahren auf die potentiell besten Alternativen einzugrenzen.

### 3 Der Einsatz von Prototypenwerkzeugen in der Produktentwicklung



Defizite ermittelt. Insbesondere die vielfältigen Vorteile beim Einsatz von seriennahen Prototypen werden untersucht. Weiterhin wird die industrielle Umsetzung dieser Anforderung betrachtet. Diese besteht insbesondere aus Ausweichstrategien, den sogenannten Surrogattechniken. Eine wichtige Rolle für das Rapid Tooling spielen weiterhin die Potentiale der ausführenden Industriebetriebe des Modell-, Werkzeug- und Formenbaus. Im Anschluss daran werden die bislang vorhandenen wissenschaftlichen Konzepte zur Technologieunterstützung bei der Prototypenherstellung ausgewertet. Aus den ermittelten Defiziten des gegenwärtigen Vorgehens und der bisherigen wissenschaftlichen Untersuchungen wird anschließend der Handlungsbedarf für die Konzeption der Strategie Rapid Tooling abgeleitet.

#### 3.1 Anwendungsfälle von Prototypen- und Kleinserienwerkzeugen

Modelle und Prototypen dienen im Rahmen der Produktentwicklung zu verschiedenen Einsatzzwecken. Diese umfassen zum einen die einfache körperliche Darstellung der Geometrie zu Kommunikationszwecken, zur Konstruktionsvalidierung, zur haptischen Überprüfung oder für Montageuntersuchungen. Für diese Einsatzfälle ist die derzeit industriell etablierte Anwendung von mittels Rapid Prototyping-Technologien hergestellten Modellen ausreichend (*Macht 1999*).

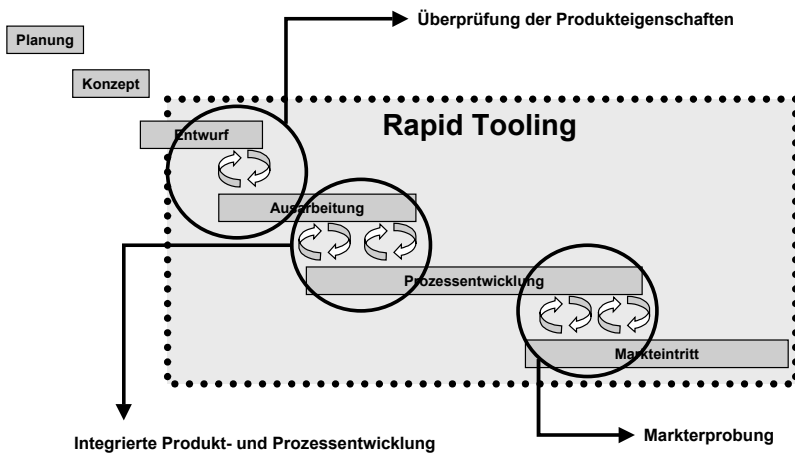


Abbildung 3-1: Anwendungsgebiete des Rapid Tooling

Aufgrund der eingangs beschriebenen Veränderungen der Rahmenbedingungen steigt jedoch in immer schnelleren Zyklen die Komplexität der Produkte. Dies bevorzugt insbesondere die technisch anspruchsvollen, urformenden Fertigungsverfahren wie Spritz- oder Druckgießen, da sie eine weitreichende Funktionsintegration in einzelne Bauteile erlauben. Allerdings steigen beim konventionellen, sequentiellen Produktentwicklungsprozess parallel zur Komplexität aus mehreren Gründen die Produktentwicklungszeiträume für derartige Bauteile an:

- Die mechanische Stabilität der Bauteile kann nur an Prototypen entsprechend der Definition aus Punkt 2.1 untersucht werden. Dies bedeutet die Verfügbarkeit von Bauteilen aus serienidentischen Werkstoffen.
- Die technische Komplexität der urformenden Fertigungsverfahren erlaubt derzeit nur eine ungenügende Simulation des Fertigungsverfahrens. Daher ist das Fertigungsrisiko erheblich.
- Die Durchführung urformender Fertigungsverfahren bedingt die Notwendigkeit zur zeit- und kostenintensiven Herstellung zahlreicher z.T. sehr komplexer Betriebsmittel. Diese zusätzlichen Aufwendungen bedeuten neben höheren Projektlaufzeiten und –kosten ein erhöhtes Risiko bei fehlendem Markterfolg des Produktes.

Durch die Integration des Werkzeug- und Formenbaus in den Produktentwicklungsprozess sowie den Einsatz entwicklungsbegleitender Prototypen- und

Kleinserienwerkzeuge können die genannten Probleme minimiert und die Produktentwicklungszyklen gestrafft werden, da unterschiedliche Erkenntnisse über die anvisierten Eigenschaften der Produkte und ihrer Produktionsprozesse vorverlagert werden können (vgl. Abbildung 3-1).

#### 3.1.1 Überprüfung der Produkteigenschaften

Während einfache körperliche Modelle in den meisten Fällen aus Ersatzwerkstoffen hergestellt werden, zeichnen sich Prototypen, die mittels Prototypenwerkzeugen erzeugt wurden, durch die Verwendung des identischen Werkstoffes wie beim späteren Serienbauteil aus. Daher ergeben Untersuchungen der mechanischen Stabilität sowie weiterer Eigenschaften wie der elektrischen, akustischen und thermischen Leitfähigkeit sowie des Alterungsverhaltens aussagekräftige, direkt auf die spätere Serie übertragbare Ergebnisse. In diversen Branchen wie z.B. der Medizintechnik, der Automobilindustrie, der Luftfahrtindustrie, der Elektrotechnik bis hin zur Spielzeugindustrie ist eine Voraussetzung zur Platzierung der Produkte auf dem Markt die Erfüllung von Prüfvorschriften und Zulassungszertifikaten. In derartigen Fällen werden i.a. von den zuständigen Prüfstellen nur Testmuster angenommen, die identische Eigenschaften wie das Serienprodukt aufweisen. Darüber hinaus entsteht durch den Einsatz der Urformtechnik verglichen mit dem Modellbau bei geringen Zusatzkosten eine relativ hohe Anzahl an Prototypen. Dadurch entsteht die Möglichkeit, alle beteiligten Unternehmensbereiche mit einer größeren Anzahl von Prototypen zu versorgen, was sich positiv auf den Lerneffekt der gesamten Organisation im Zusammenspiel mit dem neuen Produkt auswirkt (*Clark & Fujimoto 1992*).

#### 3.1.2 Parallele Produkt- und Prozessentwicklung

Zusätzlich zum Nutzen auf Basis der körperlichen Eigenschaften der Prototypenteile können durch den frühzeitigen Einsatz der Betriebsmittel für die serienidentischen Fertigungsprozesse weitere Vorteile erzielt werden. Die urformenden Fertigungsverfahren Spritz- und Druckgießen zeichnen sich durch sehr spezifische Anforderungen an die Produktgestaltung aus, ohne die weder eine sichere Prozessführung noch ein qualitativ einwandfreies Produkt gewährleistet werden kann. Im Rahmen der funktionsmotivierten Produktentwicklung findet ohne die spezielle Prozesskenntnis des Werkzeugbaus und der Gießerei eine präventive analytische Bewertung der Bauteilkonstruktion hinsichtlich Fertigungseignung

selten und nur ungenügend statt. Zusätzlich ist in vielen Fällen keine ausreichend genaue Prognose des Prozessverhaltens selbst unter Zuhilfenahme numerischer Simulationen möglich (*Wheelwright u.a. 1992*). Infolgedessen müssen in den meisten Fällen zeit- und kostenintensive Iterationsschleifen zur fertigungsgerechten Optimierung der Produktgestalt durchgeführt werden. Diese Iterationsschleifen können nur unmittelbar vor bzw. sogar bei Serienanlauf durchgeführt werden. Dadurch verzögern sie den Markteintritt des Produktes entscheidend und zehren einen erheblichen Anteil der Rendite auf (*Wheelwright u.a. 1992*).

Durch die frühzeitige Integration des Werkzeugbaus im Sinne einer entwicklungsbegleitenden Herstellung von Prototypenwerkzeugen können verfahrensspezifische Probleme der urformtechnischen Herstellung sowie nachfolgender Fertigungsprozesse der beteiligten Wertschöpfungskette frühzeitig aufgedeckt und beseitigt werden. Das Prototypenwerkzeug dient dabei als Versuchsträger und bewirkt in hohem Maße eine Parallelisierung der Produkt- und Prozessentwicklung. Dadurch kann zum einen wertvolle Entwicklungszeit eingespart werden bzw. mit wesentlich besser abgesicherten Produktdaten die Serienproduktion begonnen werden (*Leonard-Barton u.a. 1994*).

#### 3.1.3 Markterprobung

Urformende Fertigungsprozesse ermöglichen die wirtschaftliche Herstellung komplexer Bauteile erst bei großen Stückzahlen. Gleichzeitig bedeutet die hohe Kapitalbindung der notwendigen Betriebsmittel aber auch ein hohes finanzielles Risiko bei Nichtannahme der Produkte durch den Markt. Auch in der sensiblen Phase des unmittelbaren Markteintrittes kann der Einsatz von Prototypenwerkzeugen einen wichtigen Beitrag zum Projekterfolg leisten. Da sich die in großer Anzahl nach Herstellung eines Prototypenwerkzeuges verfügbaren Prototypen nicht oder nur unwesentlich von den späteren Serienteilen unterscheiden, können sie für den Aufbau einer sogenannten Vorserie eingesetzt werden. Mittels dieser Nullserie kann bei unsicherem Markterfolg die Kundenresonanz ermittelt werden, ohne die hohe Kapitalbindung eines Serienwerkzeuges einzugehen. Darüber hinaus kann aber auch bei verzögerter Fertigstellung des Serienwerkzeuges diese Vorserie zur Überbrückung des Serienanlaufes verwendet werden. Im Gegensatz zum vielfach praktizierten Vorgehen, diese Vorserie mittels Surrogatechnologien herzustellen, wird dadurch vermieden, qualitativ unzureichende Produkte auf den Märkten zu platzieren (*Wildemann 1993a*).

## 3.2 Defizite der industriellen Herstellung von Prototypen

Die unter dem vorherigen Punkt dargestellten Vorteile eines Einsatzes von Prototypen und Prototypenwerkzeugen sind unmittelbar einleuchtend und unbestritten. Dennoch ist in der industriellen Praxis der Einsatz von Prototypenwerkzeugen derzeit keineswegs von planvollem Vorgehen gekennzeichnet. Vielmehr werden Prototypen- und Vorserienwerkzeuge vielfach nur in absoluten Notfällen nachgefragt, z.B. wenn bei Lieferverzug eines Serienwerkzeuges aus qualitativen oder quantitativen Gründen Ersatzstrategien und Surrogattechnologien zur Problemabwendung ausscheiden (*Wagner 1998*).

Im folgenden soll daher dargestellt werden, warum die Bedürfnisse nach schneller Verfügbarkeit und iterativer Evolution der prototypischen Betriebsmittel derzeit nicht befriedigt werden können. Eine wichtige Rolle spielen dabei die als Ausführende in Frage kommenden Branchen sowie deren derzeitiges Angebot zur Bewältigung der Aufgabe.

### 3.2.1 Modellbau

Der Modellbau ist ursprünglich als Handwerk entstanden mit dem Ziel, frühzeitig erste körperliche Modelle bereitzustellen, um anhand dieser Modelle die Konstruktion nicht nur zu visualisieren sondern auch zu validieren und ggf. Änderungspotentiale aufzudecken. Aufgrund dieser Anforderungen ist der Modellbau schon von je her entwicklungsbegleitend tätig gewesen (vgl. Abbildung 3-2 auf Seite 51). Durch den Entwicklungsfortschritt und anschließenden industriellen Einsatz der generativen Fertigungsverfahren Anfang der neunziger Jahre konnten qualitativ bessere Modelle bei zugleich kürzerer Fertigungszeit hergestellt werden. Zudem konnte durch den Einsatz weiterer Folgetechniken, den sogenannten Surrogattechnologien die wirtschaftliche Losgröße von der reinen Einzelfertigung auf 10 bis 50 Stück ausgeweitet werden. Dadurch wurde die Position des Modellbaus als unverzichtbarer Entwicklungspartner weiter gestärkt. Dennoch ist für den Modellbau charakteristisch, dass nur Modelle aus Ersatzwerkstoffen erstellt werden können und keine echten Prototypen. Das werkzeugbauliche Know-how zum Aufbau urformtechnischer Betriebsmittel und zur Durchführung der serienidentischen, urformtechnischen Fertigungsverfahren ist i.a. nicht vorhanden. Dadurch können keine Erfahrungen mit den Serienmaterialien sowie prozessspezifische Erkenntnisse durch Einbindung des Modellbaus während der Produktentwicklung erworben werden.



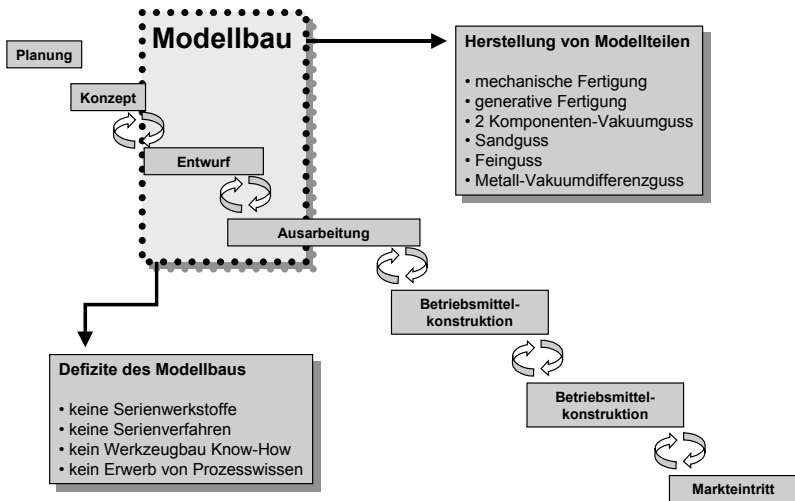


Abbildung 3-2: Einsatzbereich des Modellbaus im Produktentstehungsprozess

Die wichtigsten Technologien zur Herstellung von Modellen als Ersatz für formtechnische Serienbauteile sollen im folgenden kurz charakterisiert werden.

### 3.2.1.1 Mechanische Modellherstellung

In Anlehnung an die ursprüngliche konventionelle Modellherstellung werden vielfach mechanische spanende Herstellungsverfahren und Fügetechnologien kombiniert, um Modellbauteile zu erzeugen. Da die sonst im Modellbau inzwischen stark verbreiteten generativen Fertigungsverfahren ausnahmslos mit Ersatzwerkstoffen arbeiten, wird zur Darstellung des Materialverhaltens von metallischen und thermoplastischen Konstruktionswerkstoffen oftmals die Geometrie des Bauteils zunächst stark abstrahiert. Anschließend werden die geometrischen Elemente der Integralbauteile separiert und mittels CNC-Fräsen oder Drehen erzeugt. Bei Bedarf werden sie durch geeignete Fügeverfahren wie Schweißen oder Kleben erneut zusammengefügt. Dieses Vorgehen ist bei komplexen Modellen hinsichtlich der Arbeitsplanung, Datenaufbereitung und Durchführung sehr zeitintensiv und die mechanischen Eigenschaften der Serienwerkstoffe können nur beschränkt angenähert werden. Da die Kapitalbindung bei Beschränkung auf sehr

wenige Prototypenteile vergleichsweise gering und die Stabilitätsaussage besser als bei der Verwendung von Ersatzwerkstoffen ist, wird dieses Vorgehen trotz der Defizite angewendet (*Bernard & Stetter 1997*).

#### **3.2.1.2 Modellherstellung durch Zweikomponenten Vakuumguss**

Sehr weit verbreitet ist für die Darstellung spritzgießtechnisch herzustellender Produkte die Surrogattechnologie des Zweikomponenten-Vakuumgusses. Dabei wird nach der generativen Fertigung des Bauteilmodells beispielsweise mittels Stereolithografie eine Silikonform von diesem Mastermodell abgeformt. In diese Silikonform wird unter Beaufschlagung mit einem Vakuum ein geeigneter Zweikomponentenwerkstoff eingegossen. Da mittlerweile eine erhebliche Anzahl zweikomponentiger Materialien zur Verfügung steht, können die mechanischen Eigenschaften vieler gängiger konstruktiv eingesetzter Kunststoffe imitiert werden (*Weihbrecht 1998*). Trotz ihrer weiten Verbreitung weist diese Methode gegenüber der Verwendung von Prototypenwerkzeugen einige entscheidende Defizite auf:

- Das Mastermodell wird bei der Herstellung der Silikonform prinzipiell zerstört, so dass für jede neue Silikonform ein neues Modell erzeugt werden muss. Die Haltbarkeit der Silikonform ist verschleißbedingt auf ca. 25 Abformvorgänge beschränkt. Zudem sind die zweikomponentigen Werkstoffe als sehr teuer einzustufen. Die Kosten für dieses Verfahren erreichen ab einer Stückzahl von ca. 50-100 Bauteilen die Kosten für die Herstellung eines Prototypenwerkzeuges (*Heller 1998*).
- Durch wiederholte Abformvorgänge und die Verwendung von Ersatzwerkstoffen ist die Qualität der Modellteile deutlich schlechter als bei der Verwendung von Prototypenwerkzeugen (*Heller 1998*).
- Da der Serienfertigungsprozess Spritzgießen nicht durchgeführt wird, können keine prozessspezifischen Probleme aufgedeckt werden.

#### **3.2.1.3 Modellherstellung durch Schwerkraft Metallguss**

Analog zur in der Industrie etablierten Modellherstellung mittels Vakuumguss für den Bereich der Kunststoffe (siehe obigen Punkt 3.2.1.2) haben sich zur Dar-

stellung metallischer Modelle von Druckgussprodukten drei Gießverfahren etabliert. Diese sind der Sandguss, der Feinguss sowie der Vakuumdifferenzguss.

### **Sandguss**

Das prinzipielle Vorgehen wurde bereits im Rahmen des Unterpunktes 2.3.1.1 erläutert. Im Unterschied zur dort beschriebenen Herstellung von Konturform-einsätzen werden nach der Herstellung einer geeigneten Abformeinrichtung in diesem Fall die Bauteile selbst mittels dem Sandgussverfahren erzeugt (*Gebhardt 1996*).

### **Feinguss**

Da auch dieses Verfahren für die Formeinsatzherstellung verwendet werden kann, wurde das Vorgehen bereits unter Gliederungspunkt 2.3.1.1 Generative Verfahren und Feinguss auf Seite 16 erläutert. Allerdings wird auch in diesem Fall das Verfahren mit dem Ziel eingesetzt, direkt Feingussbauteile zu erzeugen (*Dusel 1997*).

### **Vakuumdifferenzguss**

Dieses Verfahren stellt eine Übertragung der aus dem Kunststoffbereich bekannten Vakuumgießtechnik auf den Metallbereich dar. Vervollständigt wird die Technologie dabei durch das aus dem Feinguss bekannte Prinzip von verlorenem Modell und verllorener Form. Im Unterschied zum Feinguss besteht die verlorene Form nicht aus einer schrittweise auf das Modell aufgetragenen Keramikschale. Vielmehr werden in diesem Fall die Formen durch Tauchen der Modelle in Gipsblöcke erzeugt und nach dem Brennen und Entfernen des Modells unter Vakuumunterstützung mit metallischen Legierungen gefüllt (*Notar 1998*).

Alle drei Verfahren haben ähnliche Defizite wie die für den Kunststoffbereich dargestellte Vakuumgießtechnik:

- Starke Stückzahlrestriktion aufgrund hoher Kosten für Modelleinrichtungen und gießtechnische Herstellung jedes einzelnen Modells.
- Geringe Qualität aufgrund mehrmaligem Abformen und thermischen Schwinden sowie geringe Aussagekraft bezüglich dem späteren Produkt aufgrund prozessspezifisch fehlender Materialverdichtung.
- Kein Erwerb von prozessspezifischen Know-how und damit Verkürzung der Iterationsschleifen durch Parallelisierung von Produkt- und Prozessentwicklung.

Der Modellbau ist zwar als Entwicklungspartner etabliert, jedoch mangelt es i.a. an produktionstechnischen Erkenntnissen der Zielprozesse, um Prototypenwerkzeuge herzustellen. Die zur Kompensation vielfach durchgeführten Surrogattechnologien können die entscheidenden Bedürfnisse der Produktentwicklung nach materialidentischen Prototypen und der Vorverlagerung von Erkenntnissen über die späteren Serienprozesse nicht befriedigen.

#### **3.2.2 Werkzeug- und Formenbau**

Im Gegensatz zum Modellbau ist die Branche des Werkzeug- und Formenbaus traditionell nicht entwicklungsbegleitend tätig sondern dient der Umsetzung der Konstruktionsergebnisse in Betriebsmittel zur urformenden Bauteilproduktion (vgl. Abbildung 3-3 auf Seite 55). Dementsprechend ist auch die Ausrichtung der meisten Betriebe des Werkzeug- und Formenbaus für eine Integration in die Produktentwicklung nicht geeignet. Die Mitarbeiterstruktur ist stark handwerklich geprägt. Typischerweise ist die Personalstärke im Hochtechnologiebereich nur bei ca. 10% während der Werkstattbereich mit 70% vorherrscht. Die Integration neuer vorwiegend DV-gestützter Technologien sowie der Aufbau entwicklungs-spezifischen Know-hows findet daher sehr schleppend statt (*Wagner 1998*). Im Bereich der Werkzeugkonstruktion wird nur zu einem geringen Anteil 3D-CAD eingesetzt. Damit ist in vielen Fällen die Integration in die Produktentwicklung sowie die Anwendung innovativer Technologien wie Rapid Prototyping oder Simulationsverfahren aufgrund fehlender Eingangsdaten ausgeschlossen. Zudem kommt es aufgrund der Verwendung unterschiedlicher CAX-Werkzeuge in Kombination mit traditioneller Konstruktionsarbeit am Zeichenbrett zu einer Vielzahl von Medienbrüchen. Aufgrund der streng tayloristischen und auslastungsorientierten Auftragsabwicklung liegt das Verhältnis von Liegezeiten zu Hauptzeiten bei 70% zu 30% (*Klocke 1998*) wodurch lange Lieferfristen entstehen.

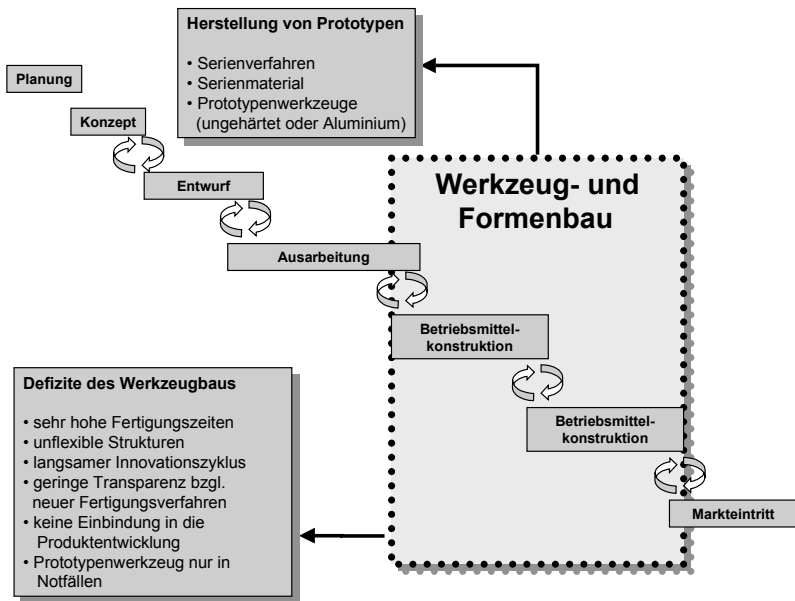


Abbildung 3-3: Einsatzbereich des Werkzeug- und Formenbaus in der Produktentstehung

Durch die Vielzahl der beteiligten Prozessschritte im Werkzeug- und Formenbau sowie die Verwendung sehr hauptzeitintensiver Fertigungsverfahren verschärft sich dieser Effekt zusätzlich. Eine Produktion von Prototypenwerkzeugen findet zwar derzeit bereits statt. Derartige Aufträge werden jedoch nur in Erwartung des zugehörigen Serienwerkzeuges durchgeführt. Technologisch entsprechen die dabei gefertigten Prototypenwerkzeuge bis auf die ungehärtete Ausführung der Werkzeugkontur weitgehend den späteren Produktionswerkzeugen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Werkzeug- und Formenbau aufgrund der spezifischen Kenntnisse bezüglich urformender Fertigung ein unverzichtbarer Partner für die Produktentwicklung ist. Allerdings ist er aufgrund seiner derzeitigen organisatorischen, personellen und technologischen Struktur für die entwicklungsbegleitende Fertigung von Prototypenwerkzeugen nur sehr bedingt einsatzbereit (Breitinger & Pieverling 1999).

### 3.2.3 Virtual Prototyping

Durch stetige Entwicklungsfortschritte auf dem Gebiet des Virtual Prototyping können diverse Eigenschaften von Bauteilen inzwischen durch rein digitale Modellbildung untersucht werden. Neben der durch den Einsatz von Stereobildern sehr anschaulichen dreidimensionalen Darstellung sind hier Verfahren wie die Finite Elemente Methode sowie die kinematische Mehrkörper 3D-Simulation und das Digital Mock Up anzuführen, mit deren Hilfe die mechanische Festigkeit, kinematische Wechselwirkungen und Zusammenbausituationen von ganzen Baugruppen präventiv untersucht werden können. Als nächster Entwicklungsschritt des Virtual Prototyping wird die Verbesserung der Interaktion mit dem digitalen Produktmodell durch geeignete Mensch-Maschine-Schnittstellen angesehen. Ansatzpunkte in der Forschungslandschaft sind beispielsweise spezielle Eingabegeräte, mit denen eine Krafrückkopplung aus dem digitalen Modell erzielt wird (Patron 2001).

Ein wesentlicher Vorteil bei der digitalen Modellbildung besteht in der leichten und schnellen Änderbarkeit der Simulation sowie der verglichen mit körperlichen Modellbildungsverfahren geringen Kapitalbindung in produktspezifische Betriebsmittel. Da zu den Voraussetzungen einer ausreichend genauen digitalen Modellbildung jedoch die mathematische Umsetzbarkeit der Eigenschaften sowie eine umfassende Kenntnis aller Randbedingungen notwendig ist, können derzeit gerade im Zusammenhang mit urformtechnischer Herstellung bei weitem nicht alle Eigenschaften modelliert werden (Hagen 1998).

## 3.3 Unterstützung zur Technologieauswahl

Zur Unterstützung der Technologieauswahl im Zusammenhang mit der Herstellung von Prototypen wurden bereits mehrere Untersuchungen durchgeführt und wissenschaftliche Arbeiten veröffentlicht. Ein großer Teil dieser Vorgehensmodelle beschränkt sich jedoch thematisch auf die Herstellung von Modellen mittels generativer Fertigungsverfahren (Macht 1999, Müller 1996, Westkämper u.a. 1996). Dadurch werden jedoch sehr effiziente Fertigungsverfahren wie z.B. das Fräsen bereits per Definition ausgeschlossen. Für die in diesem Abschnitt durchgeführte Betrachtung bisheriger Forschungsansätze im Umfeld der Aufgabestellung sollen daher im folgenden nur Forschungsansätze untersucht werden, die nicht auf den Einsatz generativer Fertigungsverfahren beschränkt sind.

### 3.3.1 Benchmarkbewertung generativer und abtragender Fertigungsverfahren

Zur Bewertungen der unterschiedlichen Verfahren für die Konturfertigung sind zahlreiche Benchmarks durchgeführt worden (*Dickens 1996, Kurenbach 1999*). Die grundlegende Problematik bei derartigen Fallstudien liegt allerdings in der starken Fixierung der Ergebnisse auf die konkreten Randbedingungen bei Durchführung des Benchmarks. Im Falle der Fertigung von Konturelementen stellt insbesondere die Charakteristik der herzustellenden Geometrie des Testteiles ein entscheidendes Kriterium dar. Allein die Wahl einer bestimmten Ausprägung der Konturgeometrie führt bereits zur Favorisierung einer Gruppe von Fertigungsverfahren und damit zu einem stark tendenziellen Ergebnis. Weiterhin prägen die Randbedingungen der Versuchsdurchführung wie z.B. die Wahl bestimmter Bearbeitungsmaschinen oder Prozessparametereinstellungen das Ergebnis entscheidend. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Benchmarkbewertungen zwar bei eigener Durchführung eine sehr genaue Entscheidungsfindung ermöglichen, diese aber von der konkreten Problemstellung i.a. nicht übertragbar ist. Für eine präventiv anzuwendende Methode im Sinne der Aufgabenstellung dieser Arbeit ist dieses Vorgehen lediglich zur Erhebung einzelner Technologietendenzen geeignet.

### 3.3.2 Technologiekalender

Die Methode des Technologiekalenders wurde bereits bei unterschiedlichen Problemstellungen eingesetzt (*Schuh u.a. 1992*). Aufgrund ihrer allgemeinen Gestaltung ist sie theoretisch auch auf den Bereich der Prototypenwerkzeugfertigung sowie charakteristisch unterschiedliche Fertigungsprozesse adaptierbar. Explizit wurde dies bislang jedoch nur für den Einsatz generativen Fertigungsverfahren zur Modellherstellung durchgeführt (*Eversheim u.a. 1996*). Dazu werden unternehmensspezifisch zu fertigende Produkte nach charakteristischen Anforderungen klassifiziert. Diese werden den potentiell einsetzbaren Technologien gegenübergestellt. Anhand eines unternehmensspezifisch ausgearbeiteten Bewertungssystems werden daraufhin die möglichen Technologien den unterschiedlichen Kriterien zugeordnet und priorisiert. Planungsergebnis ist eine unternehmensspezifisch geordnete strategische Handlungsanweisung in Abhängigkeit der Gewichtung der Anforderungskategorien. Der Technologiekalender selbst ist kein dynamisches Planungsinstrument, da dieses Expertensystem bei Änderung

der unternehmensspezifischen Abläufe oder der technologische Grundlagen erneut erstellt werden muss.

#### **3.3.3 Strategische Bewertung von generativen und konventionellen Fertigungsverfahren**

Diese Methode ermöglicht nur eine strategische Bewertung der technologischen Prozesse für die Prototypenherstellung. Grundlage ist dabei eine Gegenüberstellung der Produktionsleistung mit den Produktionskosten, um die Wirtschaftlichkeit verschiedener Technologien zu beurteilen. Die an die Produktion gestellten Kosten- und Leistungsanforderungen werden festgelegt und in Abhängigkeit ihrer Bedeutung für die verfolgte Wettbewerbsstrategie gewichtet. Die Bestimmung des Erfüllungsgrades durch die jeweilige Technologie erfolgt mittels Quantifizierung des Technologiepotentials (*Steger & Conrad 1995*). Auch diese Methode wurde ursprünglich nur für den Modellbau konzipiert, ist allerdings ebenfalls aufgrund der Miteinbeziehung konventioneller Technologien auf den Werkzeugbau übertragbar.

#### **3.3.4 Zweistufige Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl von Rapid Tooling-Prozessketten**

Dieses Vorgehensmodell dient der Unterstützung zur Technologieauswahl sowohl bei der Modell- als auch der Prototypenwerkzeugherstellung. Wie bei anderen Methoden werden zunächst Anforderungen an die zu fertigenden Bauteile aufgestellt. Dies dient dazu, zunächst auftragsneutral die prinzipielle Vorgehensweise bezüglich direkter bzw. urformender Fertigungsstrategie festzulegen. Anschließend erfolgt anhand technologischer und wirtschaftlicher Kriterien eine vergleichende Bewertung unterschiedlicher Prozessketten, die im konkreten Fall eine Feinplanung der Fertigungsverfahren ermöglichen soll (*Kaschka 1999*). Aufgrund der Zusammenfassung der Problemstellungen des Modell- und des Werkzeugbaus wird das Anforderungsprofil lediglich aufgrund der globalen Eigenschaften des zu erzeugenden Bauteiles ermittelt. Durch Separation der Konturgeometrie für die urformtechnische Herstellung ergeben sich allerdings bereits mehrere Kontureinsätze. I.a. weisen diese sehr unterschiedliche geometrische Charakteristika auf, so dass eine Feinplanung der Fertigung nur unter Berücksichtigung der bereichsweise individuellen Konturgeometrie möglich ist.



Zusätzlich spielen gerade bei der Herstellung von Prototypenwerkzeugen die seitens der Fertigungstechnik aufgeworfenen Anforderungen eine entscheidende Rolle, die für die Auswahl des geeigneten Fertigungsprozesse untersucht werden müssen. Diese Problemstellungen werden in der genannten Methode nicht berücksichtigt.

### 3.3.5 Bewertung der Forschungsansätze

Um die vorliegende Arbeit bezüglich anderer Forschungsarbeiten zur Thematik der Prototypenwerkzeugherstellung abzugrenzen und den Handlungsbedarf aufzuzeigen, werden die vorhandenen Ansätze anhand der dargestellten Kriterien für eine entwicklungsbegleitende Prototypenwerkzeugherstellung bewertet.

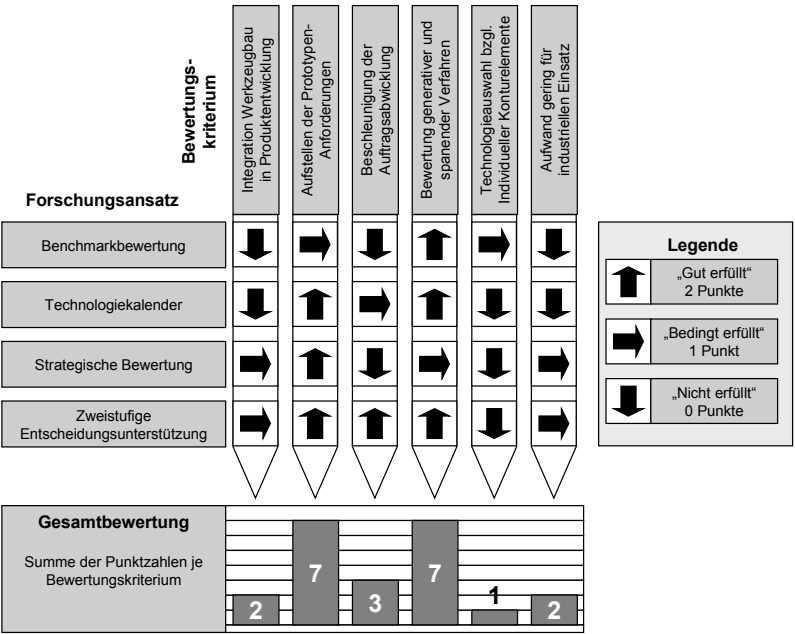


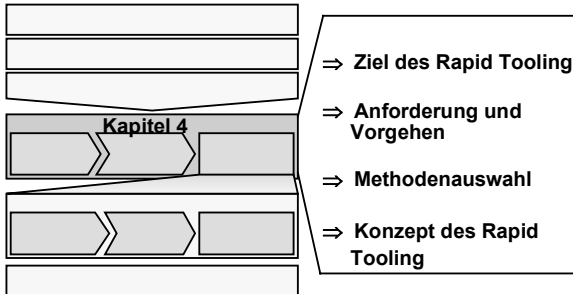
Abbildung 3-4: Bewertung der Forschungsansätze

Wie Abbildung 3-4 zeigt, stellen die bisherigen Forschungsansätze im wesentlichen Vorgehensmodelle zur Ermittlung der Prototypenanforderungen sowie zur

strategischen Potentialermittlung der generativen und spanenden Fertigungsverfahren dar. Insbesondere bei der Integration des Werkzeug- und Formenbaus in die Produktentwicklung weisen alle Konzepte erhebliche Defizite auf. Darüber hinaus ist eine Feinplanung im Sinne einer flexiblen, reaktionsfähigen Fertigung der zeit- und kostenintensiven Konturelemente mit den genannten Auswahlmethoden nicht möglich. Der Grund ist im wesentlichen darin festzustellen, dass keine der vorgestellten Methoden die prozess- und konturspezifischen Anforderungen berücksichtigt sondern lediglich auf produktspezifische Aspekte ausgerichtet ist.

## 4 Die Strategie Rapid Tooling

In diesem Kapitel wird das Konzept des Vorgehensmodells Rapid Tooling entwickelt. Dieses Vorgehensmodell ist notwendig, da die in dieser Dissertation zu erarbeitende



Auswahlmethode für Konturfertigung in den Gesamtablauf der Prototypenwerkzeugherstellung eingebettet werden muss.

Dazu werden zunächst die Ziele, das Einsatzprofil sowie die Anforderungen für die Strategie Rapid Tooling dargestellt. Die zusätzlich zur Auswahlmethode für Konturfertigungsverfahren notwendigen Methoden werden zur Vervollständigung übersichtsartig dargestellt und im Anschluss daran das Gesamtkonzept der Strategie Rapid Tooling zur entwicklungsbegleitenden Prototypenwerkzeugherstellung zusammengefasst.

### 4.1 Leistungsumfang von Rapid Tooling

Der anvisierte Einsatzzweck der Strategie Rapid Tooling ist die schnelle, entwicklungsbegleitende Herstellung von urformenden Prototypen- und Kleinserienwerkzeugen. Der Anwendungsbereich ist dabei beschränkt auf die Applikationen Spritzguss von Thermoplasten sowie Druckguss von Leichtmetallen. Beide Fertigungstechnologien stellen höchste Anforderungen an die Komplexität der Betriebsmittel. Durch den geplanten Einsatz derartiger Betriebsmittel während der Produktentwicklung können bereits während einer sehr frühen Phase sowohl Erkenntnisse über die technischen Eigenschaften des Produktes selbst als auch des anvisierten urformenden produktionstechnischen Prozesses erlangt werden. Die Vorteile gegenüber dem bislang praktizierten Vorgehen wurden unter Punkt 3.1 detailliert dargestellt. Die Strategie Rapid Tooling umfasst die gesamte Prozesskette der Prototypenwerkzeugfertigung. Sie beginnt mit der Konstruktion der Werkzeuge auf Basis fertigungsgerechter CAD-Bauteildaten und beinhaltet wei-

terhin die Arbeitsvorbereitung bezüglich des Einsatzes innovativer Fertigungsverfahren zur Konturfertigung bis hin zur Bemusterung der Bauteile.

### **Rapid Tooling**

Strategie zur schnellen Herstellung von Werkzeugen, die Serienwerkstoffe im Serienverfahren verarbeiten.

#### **Applikationen**

- Spritzguss von Thermoplasten
- Druckguss von Leichtmetallen

#### **Anforderungen**

- Durchführung wirtschaftlich sinnvoll
- minimale Durchlaufzeit für die Werkzeugherstellung
- Einbindung in die Produktentwicklung
- Integration der bisherigen Einzelverfahren
- Strategie industriell umsetzbar

*Abbildung 4-1: Ziele und Anforderungen an das Rapid Tooling*

## **4.2 Anforderungen und Vorgehen**

Unter Einsatz der Strategie Rapid Tooling werden die i.a. kleinen und mittelständischen Betriebe des Werkzeug- und Formenbaus in die Lage versetzt, ihre Kompetenz auf dem Gebiet der Fertigung urformender Betriebsmittel in die Produktentwicklung einzubringen. Damit ergibt sich als primäre Anforderung, dass der Einsatz des Rapid Tooling bezüglich seines zeitlichen und wirtschaftlichen Nutzens gegenüber dem bislang im Werkzeug- und Formenbau praktizierten Vorgehen der Prototypen- und Kleinserienwerkzeugherstellung überlegen sein muss.

Im Sinne der Definition des Begriffes „Strategie“ als genau geplantes Vorgehen (*Duden 1989*) ist es erforderlich, dass Rapid Tooling als ganzheitliches, generi-

sches Maßnahmenpaket entworfen und erarbeitet wird. Um die unterschiedlichen Arbeitsinhalte abzudecken, die zur Prototypenwerkzeugherstellung notwendig sind, werden daher verschiedene organisatorische, konstruktive und technologische Methoden benötigt, deren Anwendung geplant und konzeptionell aufeinander abgestimmt sein muss. Um auf die individuellen Bedürfnisse und Defizite der Anwender eingehen zu können, ist die Strategie modular aufgebaut. Dadurch ist zudem die Möglichkeit einer problembezogenen Nutzung des Vorgehensmodells Rapid Tooling gegeben.

Im Hinblick auf die unmittelbare Anwendbarkeit des Rapid Tooling für den industriellen Einsatz im Werkzeug- und Formenbau muss weiterhin berücksichtigt werden, dass die Herstellung der Prototypenwerkzeuge mit Methoden und Technologien erfolgen muss, die im industriellen Maßstab und im Umfeld des Werkzeug- und Formenbaus anwendbar sind.

### **4.3 Methodenbereitstellung**

Gegenwärtig steht eine große Anzahl produktionstechnischer Methoden und Verfahren zur Steigerung der Effizienz und Reaktionsfähigkeit zur Verfügung. Im folgenden Abschnitt werden aus diesem Methodenvorrat diejenigen isoliert, die für die entwicklungsbegleitende Herstellung von Prototypenwerkzeugen am besten geeignet sind. Die verschiedenen Methoden lassen sich in vier unterschiedliche Kategorien separieren:

- Organisatorische Maßnahmen
- Modulares Werkzeugkonzept
- Anwendung von CAX-Technologien sowie
- Auswahlmethode zur Konturfertigung

### 4.3.1 Organisatorische Maßnahmen

Die derzeitigen Defizite bei der Prototypenwerkzeugherstellung durch den Werkzeug- und Formenbau wurden bereits unter Punkt 3.2.2 dargestellt. Einen erheblichen Anteil an der mangelhaften Flexibilität und Reaktionsfähigkeit des Werkzeugbaus tragen die derzeit eingesetzten Strukturen und Arbeitsabläufe der betrachteten Branche (*Wagner 1998*). Diese Probleme lassen sich durch unterschiedliche organisatorische Maßnahmen beseitigen.

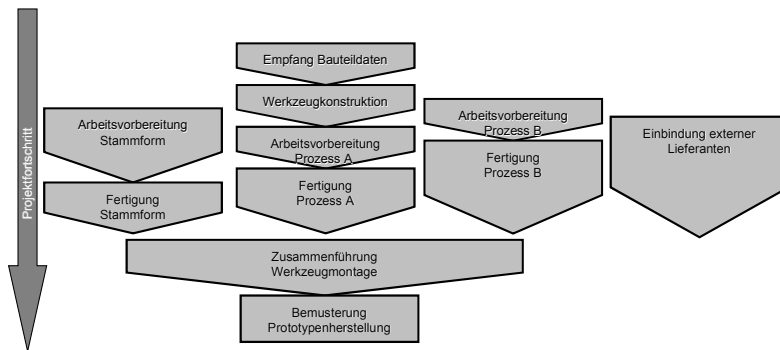


Abbildung 4-2: Parallelisierte, projekthafte Abwicklung des Prototypenwerkzeugbaus

Für die kurzfristige Abwicklung von entwicklungsbegleitenden Prototypenwerkzeugen muss die bislang durchgeführte auslastungsorientierte Abwicklung zugunsten einer durchlauforientierten, projekthaften Auftragsdurchführung verlasen werden. Das Potential bzgl. der Straffung bei den Herstellzeiten von Werkzeugen, das sich allein durch Parallelisierung der Wertschöpfungsketten sowie durch Abbau der derzeit vorhandenen Liegezeiten erschließen lässt, wird mit ca. 30% abgeschätzt (*Klocke 1998*). Um aus Gründen der Rentabilität dennoch mit einer relativ hohen Kapazitätsauslastung produzieren zu können, sind eine flexible und sehr genaue Ressourcenplanung sowie eine intensive Kommunikation der beteiligten Arbeitseinheiten notwendig. Dies beinhaltet auch die Kooperation in Produktionsnetzwerken unter Verwendung moderner Informations- und Kommunikationstechnologien zur kurzfristigen Auslagerung von Wertschöpfungsprozessen, für deren Durchführung keine eigenen Ressourcen zur Verfügung stehen.

Derartige internetbasierte Kooperationsnetzwerke sind bereits für unterschiedliche Dienstleistungen verfügbar und ermöglichen eine gegenüber der konventionellen Auftragsvergabe deutlich schnellere Abwicklung (*Brandner & Rudorfer 1999*).

### 4.3.2 Modulares Werkzeugkonzept

Betriebsmittel für die urformtechnische Herstellung im Spritz- und Druckgießverfahren weisen aufgrund der Gegebenheiten dieser Fertigungsverfahren spezielle Eigenschaften auf. Während der Formrahmen hinsichtlich der vorherrschenden Prozesskräfte und –temperaturen sowie der Anschlussmaße der Produktionsmaschinen ausgelegt werden muss, wird die Formkontur von den Gegebenheiten der zu produzierenden Bauteilgeometrie bestimmt. Die einzige Überschneidung entsteht bei komplexen Entformungskinematiken, die gleichermaßen durch Schieberelemente im Konturbereich sowie durch Schieberführungen und Schieberbetätigungen im Formrahmen ausgebildet werden müssen.

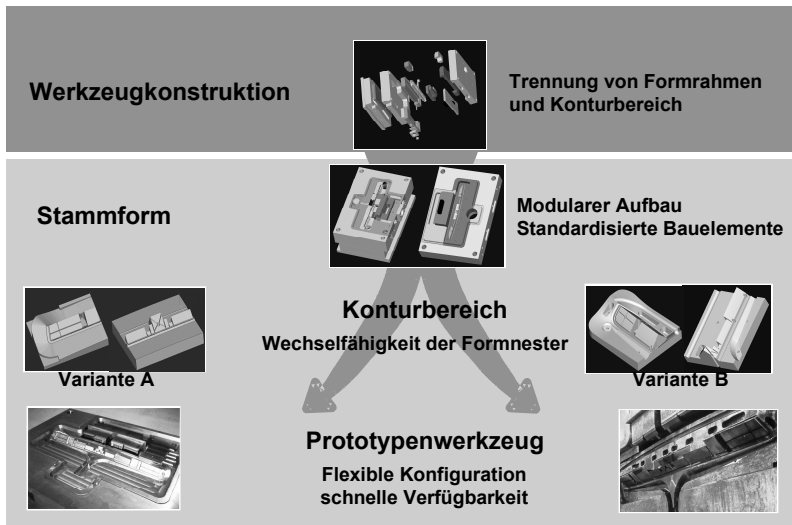


Abbildung 4-3: Vorgehen zur Modularisierung des Stammformaufbaus

Durch Modularisierung des Werkzeugaufbaus sowie Standardisierung der verwendeten Bauelemente ergibt sich die Möglichkeit, erhebliche Zeit- und Kosteneinsparungspotentiale zu erschließen. Dazu muss der produktspezifische Konturbereich vom verfahrensspezifischen Stammformaufbau separiert werden. Dadurch werden die Kontureinsätze variabel auswechselbar. Bei geeigneter Definition und Standardisierung der Anschlussmaße können flexible Stammformsysteme sogar bei komplexerer Entformungskinematik vorbereitet werden, die für eine größere Anzahl an Prototypenwerkzeugprojekten verwendet werden können. Abbildung 4-3 zeigt beispielhaft das geeignete Vorgehen anhand eines Projektes aus der Automobilbranche. Dadurch kann eine Verteilung der Kosten für die Stammform erzielt werden und die Verfügbarkeit steigt an (Schröder 1998).

### 4.3.3 Anwendung von CAx-Technologien

Die fehlende Akzeptanz des Werkzeug- und Formenbaus als Partner der Produktentwicklung liegt wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben zu einem hohen Anteil an den Defiziten dieser Branche im Bereich der Datenverarbeitung begründet.

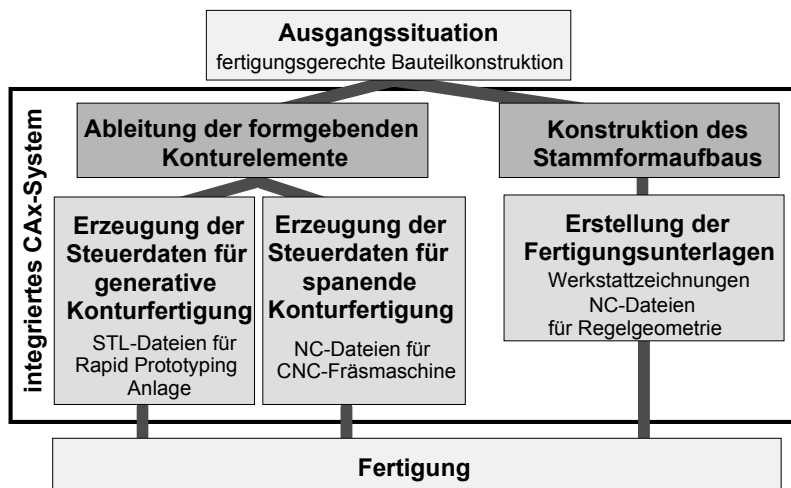


Abbildung 4-4: Integrierte CAx-Anwendung ermöglicht Rapid Tooling



Die durchgängige Verwendung eines dreidimensionalen Datenmodells ist jedoch grundlegende Voraussetzung für die Teilnahme am Produktentwicklungsprozess sowie für die durchlauforientierte Auftragsabwicklung, da eine Zurückführung produktionstechnisch bedingter Bauteiländerungen ermöglicht wird und die bislang vielfach vorhandenen Medienbrüche ausgeschlossen werden können. Für den Werkzeug- und Formenbau bedeutet dies nach Empfang des Bauteilmodells die vollständige Konstruktion des Betriebsmittels im 3D-CAD System. Dies beinhaltet sowohl die Ableitung der Formelemente anhand der Bauteilkonturen, als auch den konstruktiven Aufbau des Stammformrahmens. Der nächste Schritt ist die flexible Generierung der notwendigen Arbeitsunterlagen in Abhängigkeit des anvisierten Fertigungsverfahrens. Darunter wird der Export von sogenannten STL-Dateien für die generative Fertigung von Formkonturen sowie die Erzeugung von NC-Steuerdateien für ihre spanende Herstellung mittels eines grafisch interaktiven CAM-Programmiersystems verstanden. Im Bereich der regelgeometrischen mechanischen Bearbeitung werden ebenfalls NC-Steuerdateien oder ggf. Werkstattzeichnungen als Arbeitsunterlagen bereitgestellt.

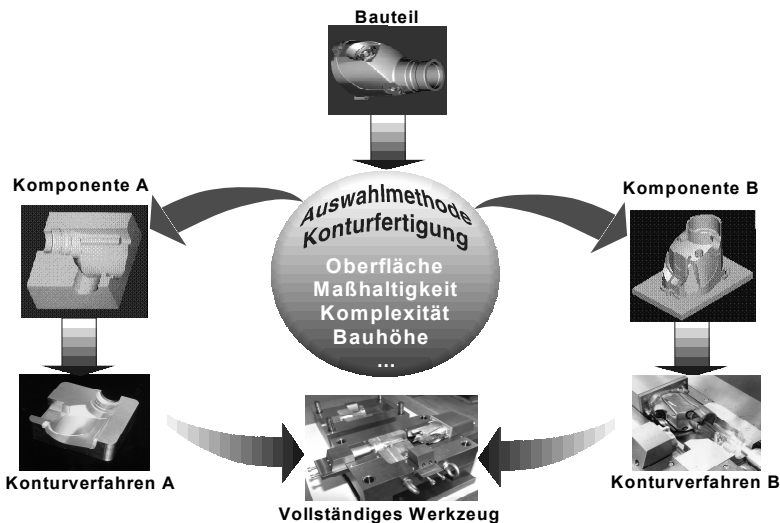
Darüber hinaus eröffnet erst die durchgängige Verwendung des Produktdatenmodells sowohl für das Bauteil selbst als auch für seine Betriebsmittel eine Vielzahl von weiteren Anwendungen. Für den Bereich des Werkzeugbaus sind dies vor allem Applikationen zur präventiven Verbesserung der Betriebsmittelkonstruktion sowie zur Steigerung der Effizienz und Prozesssicherheit. Im einzelnen sind dies computerunterstützte Simulationsverfahren der Formfüllung und zum thermischen Haushalt des Werkzeuges sowie Simulationsverfahren zur Kollisionsüberprüfung der spanenden Wertschöpfungsprozesse.

### **4.3.4 Auswahlmethode zur Konturfertigung**

Die Fertigung der konturgebenden Elemente stellt wie in Abbildung 1-2 dargestellt mit 38% Zeitanteil den größten Einzelposten bei der Produktion eines Prototypenwerkzeuges dar. Auch bezüglich der Kosten ist nach Bereinigung des Anteils an Zukaufteilen der wertschöpferische Anteil größer als für die Stammformherstellung. Das Optimierungspotential dieses Arbeitspaketes durch geeignete Auswahl und Kombination innovativer Konturfertigungsverfahren ist dadurch am größten.

In den vorangegangenen Abschnitten wurde bereits eine vollständige Zusammenstellung der gegenwärtig verfügbaren Einzeltechnologien zur Herstellung

von Geometrieconturen erarbeitet. Darüber hinaus wurden wissenschaftliche Ansätze zur Technologieunterstützung der Anwender bei der Auswahl geeigneter Rapid Tooling-Verfahren dargestellt. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass aufgrund der enormen Entwicklungsdynamik auf diesem Gebiet bei den Anwendern große Unsicherheit hinsichtlich der Leistungsfähigkeit und Grenzen der angebotenen Technologien herrscht.



*Abbildung 4-5: Prinzip der Auswahlmethode zur Konturfertigung*

Eine geeignete Auswahlmethode, die auf Basis der Anforderungen sowohl an das Produkt als auch an das Betriebsmittel eine bereichsweite Zuordnung von Fertigungsverfahren zu Konturelementen ermöglicht, ist gegenwärtig nicht verfügbar. Eine derartige Methode ist jedoch aufgrund der gezeigten Zusammenhänge für die Strategie Rapid Tooling von zentraler Bedeutung und daher unverzichtbar. Im anschließenden fünften Kapitel wird diese Methode wie bereits in der Einleitung angekündigt erarbeitet.

## 4.4 Zusammenfassung des Gesamtkonzeptes

Unter Anwendung der Strategie Rapid Tooling werden industrielle Betriebe aus der Branche des Werkzeug- und Formenbaus in die Lage versetzt, durch die schnelle und reaktionsfähige Herstellung von Prototypen- und Vorserienwerkzeugen sich als begleitender Partner der Produktentwicklung zu etablieren. Dies ist unbedingt notwendig, da zur Realisierung kurzer Produktlebens- und Entwicklungszyklen viel früher als bisher spezifische produktionstechnische Erkenntnisse der anvisierten Serienfertigungsverfahren Spritzguss und Druckguss in die Entwicklung einfließen müssen.

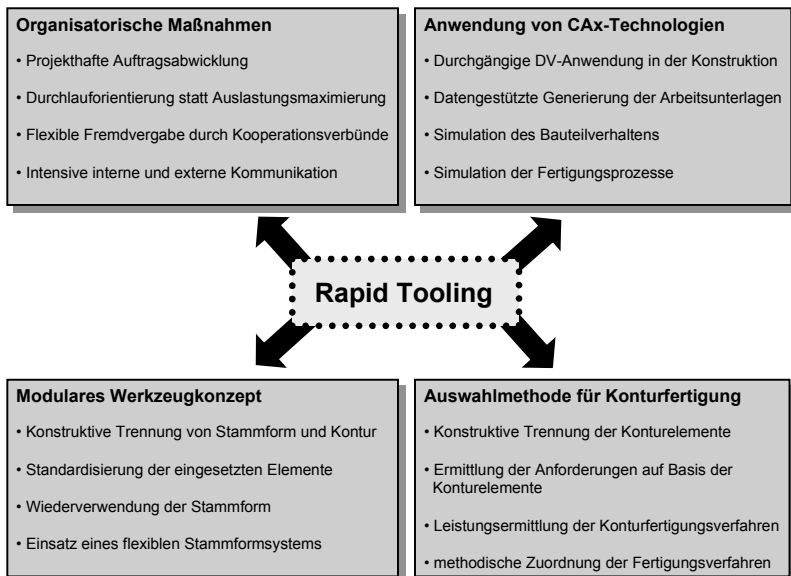


Abbildung 4-6: Gesamtkonzept der Strategie Rapid Tooling

Da die Strategie Rapid Tooling nur unter Einbindung aller an der Herstellung des Prototypenbetriebsmittels beteiligten Wertschöpfungsschritte erfolgreich angewendet werden kann, muss das Konzept mehrere produktionstechnische Maßnahmen aus unterschiedlichen Kategorien enthalten. Die Vielfältigkeit der Einzelmethoden wurde in den vorangegangenen Gliederungspunkten dargestellt. Wie Abbildung 4-6 zusammenfassend zeigt, umfasst dies auf organisatorischer

Ebene die Koordination sowie die Kommunikation während der Auftragsabwicklung. Weiterhin muss der gesamte Vorgang der Prototypenwerkzeugherstellung unter durchgängiger DV-Unterstützung ablaufen. Durch die Entscheidung für eine modulare Werkzeugkonstruktion kann weiteres Zeit- und Kosteneinsparungspotential erschlossen werden. Die größten Defizite der Anwender sind derzeit allerdings in der Nutzung innovativer Fertigungstechnologien für die Herstellung der Werkzeugkontur festzustellen. Da im Bereich dieser Wertschöpfung jedoch das größte Optimierungspotential vorhanden ist, wird der Schwerpunkt der Arbeit auf die Entwicklung einer geeigneten Methode zur Technologieunterstützung bei der Auswahl und Zuordnung der Konturfertigungsverfahren zu Formelementen gelegt. Diese Auswahlmethode wird im folgenden fünften Kapitel entwickelt.

## 5 Erarbeitung einer Auswahlmethode für Konturfertigungsverfahren

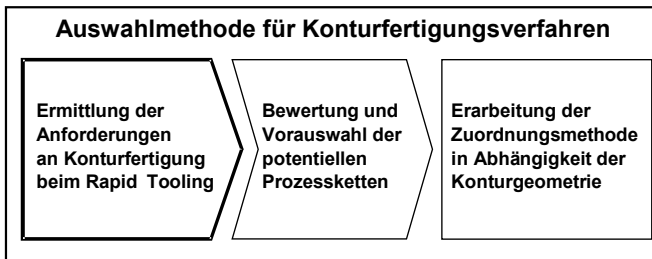
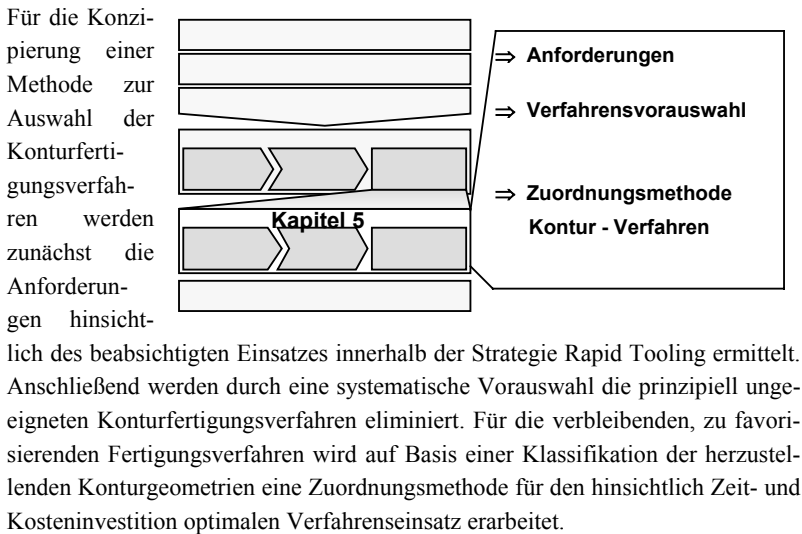


Abbildung 5-1: Mehrstufiges Vorgehen zur Entwicklung der Auswahlmethode

### 5.1 Erstellung der Anforderungsliste

Zur Auswahl des für den jeweiligen Konturbereich geeigneten Fertigungsverfahrens ist eine zielführende Systematik notwendig. In einem ersten Schritt wird

daher eine Anforderungsliste erstellt, mit deren Hilfe das Leistungsspektrum der einzelnen Verfahren in einer Vorauswahl methodisch bewertet und als geeignet für den Einsatz innerhalb der Strategie Rapid Tooling identifiziert werden kann. Diese Vorauswahl dient dazu, den theoretischen Lösungsraum vor der Erarbeitung der Zuordnungsmethode der Verfahren zu Geometriertypen auf die potentiell stärksten Verfahren hinsichtlich der globalen Anforderungen an das Rapid Tooling einzugrenzen. Im folgenden wird die Erstellung der Anforderungsliste sowie die Verfahrensvorauswahl sowohl erarbeitet als auch exemplarisch durchgeführt. Je nach Veränderung der Rahmenbedingungen wie z.B. durch das Auftreten neuer geeigneter Fertigungsverfahren kann eine Überprüfung der Neubewertung der Anforderungen und der Gewichtungen erforderlich werden.

### Anforderungen

<b>Kritisch</b>	Herstellungsdauer unter Verwendung des Konturfertigungsverfahrens	<b>Kritisch</b>
	Industrielle Verfügbarkeit des Konturfertigungsverfahrens	
<b>Objektiv</b>	Eignung und Stückzahlwartung für die Anwendung im Druckguss und Spritzguss	<b>Objektiv</b>
	Maßgenauigkeit des Konturfertigungsverfahrens	
	Maximal herstellbare Formeinsatzgröße	
	Herstellbare Oberflächenqualität	
<b>Subjektiv</b>	Geometrische Freiheit bei der Erzeugung der Kontur	<b>Subjektiv</b>
	Reparatur- und Änderungsfähigkeit des hergestellten Formeinsatzes	
	Anzahl der Einzelschritte innerhalb der Prozesskette	
	Herstellkosten des Verfahrens	

Abbildung 5-2: Anforderungsliste für Konturfertigungsverfahren

Die Anforderungsliste beinhaltet unterschiedliche organisatorische und technologische Aspekte, die für die Herstellung von Prototypen- und Kleinserienwerkzeugen Bedeutung haben. Die Auswahl der Kriterien richtet sich dabei nach den Ergebnissen einer Umfrage, die unter Entwicklungsabteilungen und Werkzeugbaubetrieben für ein öffentliches Forschungsprojekt durchgeführt wurde (*Ostermann & Weiss 1997*). In Vorbereitung einer beabsichtigten methodischen Vorauswahl unter Anwendung des Multi-Kriterium-Modells nach Ghandforoush werden die Anforderungen bereits in drei Kategorien eingeteilt (*Ghandforoush 1988*). Diese Kategorien sind je nach ihrer Funktion innerhalb der Bewertungsmethode „kritische Anforderungen“, „objektive Anforderungen“ und „subjektive Anforderungen“. Eine Übersicht aller Anforderungen und deren Einordnung in die Kategorien zeigt Abbildung 5-2.

### 5.1.1 Kritische Anforderungen

Die als kritisch definierten Anforderungen stellen innerhalb der anvisierten Bewertungsmethode die wichtigsten Einflussfaktoren dar. Eine unzureichende Erfüllung auch nur einer dieser Anforderungen führt zu einem automatischen Ausscheiden der betrachteten Lösungsvariante.

Bezüglich der schnellen, reaktionsfähigen Konturfertigung im Rahmen der Strategie Rapid Tooling zur industriellen Prototypenwerkzeugherstellung werden die folgenden beiden Aspekte als kritische Anforderungen definiert:

#### 5.1.1.1 Herstellungsdauer

Als wichtigstes Kriterium für die Eignung eines Konturfertigungsverfahrens innerhalb des Vorgehensmodells Rapid Tooling wird die spezifische Herstellungsdauer des Verfahrens definiert, da sie im allgemeinen Konsens als die Hauptmotivation für den Einsatz des Rapid Tooling angesehen wird (*Ostermann & Weiss 1997, Reinhart u.a. 1998A, Wildemann 1993B*). Unter Herstellungsdauer wird dabei die Zeit bezeichnet, die ausgehend vom CAD-Datensatz des Konturelementes bis zu seiner körperlichen Fertigstellung verbraucht wird. Neben den reinen Hauptzeiten werden daher auch die Neben- und Verteilzeiten berücksichtigt (*Klocke 1998*). Dabei wird entsprechend der unter Punkt 4.3.1 beschriebenen, für Rapid Tooling geeigneten Organisationsstruktur von einer durchlauforientierten Auftragsabwicklung ausgegangen, so dass von einem jeweils optimalen Projekt-

ablauf ohne kapazitätsbedingte Liegezeiten ausgegangen wird. Konturfertigungsverfahren, die aufgrund der Vielzahl oder Zeitaufwändigkeit der beteiligten Prozessschritte unter den oben angegebenen Annahmen bereits eine Fertigungsdauer von 7 Tagen überschreiten, werden von der weiteren Bewertung ausgeschlossen. Untersuchungen unter Anwenden der Technologien ergaben, dass dieser Wert als kritische Grenze für eine erfolgreiche Anwendung angesehen wird (*Ostermann & Weiss 1997*). Da die Prozesszeiten der einzelnen Prozessketten jedoch je nach geometrischer Charakteristik des herzustellenden Formeinsatzes stark differieren können, werden im Rahmen dieser Verfahrensvorauswahl keine detaillierten Einzelkalkulationen erstellt sondern aussagekräftige Abschätzungen ausgewertet.

### 5.1.1.2 Industrielle Verfügbarkeit

Die Methode Rapid Tooling dient der Unterstützung der Betriebe des Werkzeug- und Formenbaus und ist daher auf das industrielle Umfeld ausgerichtet. Aus diesem Grund muss gewährleistet sein, dass die betrachteten Konturfertigungsverfahren im industriellen Maßstab angewendet werden können oder industriell ausreichend verfügbar sind. Konturfertigungsverfahren, deren Durchführung bislang lediglich im Forschungsrahmen realisiert wurde oder deren Verfügbarkeit durch Exklusivitätsrechte und Lizenzvorschriften stark eingeschränkt ist, werden daher ausgeschlossen.

### 5.1.2 Objektive Anforderungen

Unter dem Begriff objektive Anforderungen werden bei der Bewertung nach dem Multi-Kriterium-Modell alle derartigen Kriterien zusammengefasst, deren Erfüllungsgrad durch die unterschiedlichen Lösungsvarianten in Form von quantitativen Maßzahlen beschrieben werden kann (*Ghandforoush 1988*). Diese Maßzahlen des jeweiligen Erfüllungsgrades werden dabei wie bei vielen gängigen Bewertungsmethoden mittels Wertefunktionen den Eigenschaften der Lösungsvarianten zugeordnet und ggf. auf eine Bezugsgröße normiert (*Breiting & Knosala 1997*). Um die Wichtigkeit der unterschiedlichen Anforderungen untereinander festzulegen, wird eine Gewichtung z.B. mittels der Präferenzmatrixmethode erzeugt.



### 5.1.2.1 Standmenge im Produktionsprozess

Ein überaus wichtiges Kriterium für die Eignung eines Konturfertigungsverfahrens für Prototypen- und Kleinserienwerkzeuges stellt die erzielbare Ausbringungsmenge an Bauteilen bei Anwendung der Standardproduktionsprozesse dar. Sie liegt aufgrund der verwendeten Formwerkstoffe weit unterhalb der für Serienwerkzeuge aus gehärtetem Stahl üblichen Losgrößen, sollte jedoch so groß wie möglich sein. Dies hängt damit zusammen, dass nur mit einer ausreichend großen Anzahl von Prototypenteilen alle anfallenden Aufgaben, angefangen von der Eigenschaftsüberprüfung der Bauteile, über die Prozessentwicklung bis hin zur Kundenkommunikation, durchgeführt werden können. Bereits während der Definition der Begriffe „Prototyp“ und Prototypenwerkzeug“ bzw. Vor- und Kleinserienwerkzeug“ zu Beginn des 2. Kapitels dieser Arbeit wurden untere Richtwerte für die Stückzahlen in den einzelnen Kategorien festgelegt. Für den Bereich der Prototypen werden mindestens 100 Bauteile gefordert, während Vor- und Kleinserien ab 1000 bis ca. 10.000 Teilen anzusiedeln sind (*Kruth u.a. 1997*). Dabei ist jedoch zu beachten, dass zum Einstellen stabiler Produktionsbedingungen bei den urformtechnischen Prozessen Spritz- und Druckgießen zu Produktionsanlauf ein Einfahrvorgang notwendig ist, in dessen Folge ca. 50-100 Ausschussteile produziert werden, die zur Standzeitbetrachtung der Werkzeugform addiert werden müssen.

### 5.1.2.2 Prozessspezifische Maßgenauigkeit

Während der Produktentwicklung sind gegenüber den Serienbauteilen noch mehrere Abstraktionen vorhanden. Daher wurde in der Vergangenheit die Möglichkeit in Betracht gezogen, je nach Einsatzbereich des Prototypen bei der geometrischen Maßgenauigkeit Qualitätseinschränkungen zugunsten einer kürzeren Verfügbarkeit in Kauf zu nehmen (*Breitinger 1996*). Dieses Vorgehen hat sich jedoch aus folgenden Gründen nicht als zielführend gezeigt.

Der Aufwand für die Herstellung eines Prototypenwerkzeuges rechtfertigt sich nur bei technisch mittelschweren bis schwierigen Bauteilen. Für einfache Standardteile sind die Bauteileigenschaften und das Prozessverhalten analytisch oder empirisch ausreichend prognostizierbar. Die Funktionssicherheit und damit ein wesentlicher Bestandteil der Eigenschaften der technisch anspruchsvollen Bauteile ist jedoch nur unter Erfüllung der gleichen hohen geometrischen Anforderungen realisierbar, die an die Serienbauteile gestellt werden. Geringe Abstri-

che hinsichtlich der geometrischen Toleranz können nur in Ausnahmefällen bei funktionsirrelevanten Abmaßen hingenommen werden. Dies bedeutet, dass an die Bewertung der geometrischen Genauigkeit der Konturfertigungsverfahren sehr hohe Anforderungen gestellt werden müssen (*Macht 1999*).

### 5.1.2.3 Prozessspezifische Oberflächenqualität

Im Gegensatz zur geometrischen Maßtoleranz ist die Produktentwicklung als Kunde des Prototypenwerkzeugbaus bei der Oberflächenbeschaffenheit bereit, Kompromisse hinsichtlich der Qualität hinzunehmen. Der Grund für diese Bereitschaft liegt darin, dass im Vergleich zu technischen Versuchen relativ wenige Prototypen für Marketingzwecke eingesetzt werden, da diese Anwendung bereits mit Modellen zufriedenstellend abgedeckt werden kann. Darüber hinaus kann das Oberflächenfinish der Teile durch modellbauliche Maßnahmen wie Lackieren nachträglich verbessert werden (*Macht 1999*).

Aus diesen Gründen bestehen die Anforderungen an die Oberflächenqualität aus den für eine sichere Durchführung der urformtechnischen Fertigungsprozesse notwendigen Eckdaten. Je nach Steigung der Konturgeometrie gegenüber der Entformungsrichtung muss eine ausreichend geringe Oberflächenrauheit für eine sichere Entformung des Bauteiles erzielt werden.

### 5.1.2.4 Herstellbare Formeinsatzgröße

Alle Konturfertigungsverfahren sind aufgrund der Auslegung der Produktionsmaschinen oder durch die beteiligten physikalischen Prozesse auf eine bestimmte maximale Baugröße limitiert. Im allgemeinen können durch die Vereinigung mehrerer Konturelemente bei der Montage in den Stammformrahmen größere Bauteile realisiert werden als die Maximalgröße eines Einzeleinsatzes. Bei diesem Vorgehen entstehen allerdings zusätzliche Trennfugen an den Stoßstellen der Einzelkonturelemente, die für die Prozesssicherheit und die Prototypenqualität potentiell nachteilig sind. An diesen Nahtstellen entsteht durch die nicht vollkommen dichte Passungsfuge am Bauteil ein Trennkrat, der die Oberflächenqualität und die Entformung beeinträchtigt. Tendenziell ist daher bis zu einer sinnvollen Maximalgrenze eine verfahrensspezifische höhere potentielle Baugröße zu favorisieren.

### 5.1.3 Subjektive Anforderungen

Im Gegensatz zu den objektiven Faktoren werden die subjektiven Anforderungen zur Bewertung sogenannter linguistischer Kriterien herangezogen. Der Erfüllungsgrad dieser Anforderungen durch die Lösungsvarianten kann a priori nicht durch eine objektiv quantifizierbare Maßzahl beschrieben werden. Allerdings kann er durch geeignete Maßnahmen objektiviert und quantifiziert werden. Eine Möglichkeit dazu bietet beispielweise ein gewichtetes Punktbewertungssystem (*Knosala 1991*). Die so gewonnenen Erfüllungsgrade können im weiteren Verlauf der Bewertung wie quantitative Maßzahlen behandelt werden.

#### 5.1.3.1 Geometrievariabilität des Konturfertigungsverfahrens

Urformende Fertigungsprozesse eröffnen als besonderer Vorteil gegenüber nahezu allen anderen Fertigungsverfahren die Möglichkeit zur Herstellung von geometrisch komplexen Integralbauteilen. Voraussetzung dafür ist allerdings die Herstellbarkeit der negativen Kontur im notwendigen Produktionswerkzeug des Urformprozesses. Daher ist ein wichtiges Kriterium für Konturfertigungsverfahren im Werkzeug- und Formenbau eine möglichst große Variabilität hinsichtlich der herstellbaren Geometrievielfalt. Je größer die geometrische Variabilität eines einzelnen Verfahrens ist, desto weniger verschiedene Verfahren für unterschiedliche Konturbereiche müssen vom Werkzeughersteller eingesetzt werden (*König & Klocke 1997*). Dies wirkt sich tendenziell positiv auf die Prozesszeiten und -kosten auf.

#### 5.1.3.2 Anzahl der Verfahrensschritte der Prozesskette

Im zweiten Kapitel wurden bereits unterschiedliche potentielle Konturfertigungsverfahren beschrieben. Dabei ist zu erkennen, dass einige Verfahren nicht nur aus einem einzelnen Fertigungsschritt, sondern aus einer ganzen Prozesskette mehrerer Einzeltechnologien bestehen. Dies impliziert die Gefahr von Liegezeiten und Verfügbarkeitsproblemen bei Übergängen zwischen den einzelnen Gliedern der Prozesskette. Für eine schnelle Herstellung der Formelemente sind derartige Prozessketten mit Zunahme der Anzahl der Verfahrensschritte weniger geeignet, als Verfahren, die lediglich aus einer Einzeltechnologie bestehen.

### 5.1.3.3 Nachträgliche Reparatur- und Änderungsfähigkeit

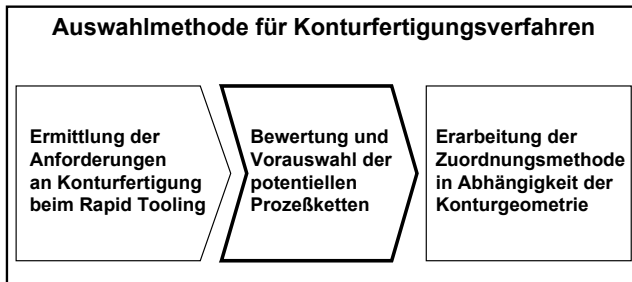
Unter Beachtung des Einsatzzwecks der Prototypenwerkzeuge als Versuchsträger während der Produktentwicklung kommt der Reparatur- und Änderungsfähigkeit der Formelemente große Bedeutung zu. Vielfach führen die Ergebnisse der Prototypenherstellung zu notwendigen Änderungen des Bauteildesigns oder der prozesstechnischen Auslegung des Betriebsmittels. Um gesicherte Aussagen über den Erfolg dieser Iterationsschritte machen zu können, müssen die Veränderungen flexibel in das Prototypenwerkzeug übertragen werden können (*Lindemann & Reichwald 1998*). Aufgrund der verwendeten Materialien und Technologien ist diese Änderungsfähigkeit bei einigen der Konturfertigungsverfahren nicht gegeben. Anstelle lokal begrenzter Einriffe in die Kontur der Formgeometrie können nur vollständig neue Konturelemente hergestellt werden, was i.a. nicht ausreichend kurzfristig realisierbar ist.

### 5.1.3.4 Herstellkosten des Fertigungsverfahrens

Normalerweise stellen die Kosten sehr wohl eine objektiv darstellbare Kenngröße dar. In diesem Fall wird trotzdem aus verschiedenen Gründen die Kostenbeurteilung den subjektiven Faktoren zugerechnet. Innerhalb der Produktentwicklung spielen Kosten gegenüber Entwicklungszeiten eine untergeordnete Rolle (*Macht 1997*). Gerade im Werkzeugbau mit seinen vielen z.T. manuellen Arbeitsschritten ist eine objektive Ermittlung der Kosten i.a. kaum möglich. Mehrere der anvisierten Konturfertigungsverfahren befinden sich zudem in einer sehr frühen Phase ihrer Markttetablierung. Die ermittelbaren Kostenkennwerte sind daher sehr stark verzerrt. Zum einem lastet auf den Investitionen ein sehr hoher Anteil an Individualitätsaufschlägen. Andererseits sind die Abschreibungszeiträume aufgrund fehlender Informationen über den weiteren Entwicklungsverlauf und –geschwindigkeit der Technologien sehr kurz anzusetzen. Informationen über die Wertentwicklung dieser Investitionsgüter sind nicht vorhanden. Zusätzlich ist eine wirtschaftliche Auslastung aufgrund der teilweise geringen Marktpräsenz noch nicht zu gewährleisten. Eine Kostenbetrachtung kann an dieser Stelle daher nur auf Basis einer tendenziellen Schätzung durchgeführt werden. Exemplarisch wird dies anhand des Praxisbeispiels unter Punkt 6.5 durchgeführt.

## 5.2 Vorauswahl geeigneter Konturfertigungsverfahren

Wie bereits dargestellt dient der Schritt der Vorauswahl der potentiell besten Konturfertigungsverfahren dazu, die theoretisch sehr große Anzahl der möglichen Alternativen vor der Konzeption einer Zuordnungsmethode auf Basis der Konturgeometrie zu reduzieren. Dadurch können diejenigen Verfahren aus der weiteren Betrachtung eliminiert werden, die aufgrund einer nicht ausreichenden Erfüllung der genannten Anforderungen zur schnellen Produktion von Prototypenwerkzeugen weniger geeignet sind.



*Abbildung 5-3: Bewertung und Vorauswahl der Konturfertigungsverfahren*

### 5.2.1 Vorstellung der Auswahlmethode

Die Anforderungen an Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling sind sehr vielschichtig. Wie bei Formulierung der Anforderungsliste festgestellt wurde, sind sowohl objektiv quantifizierbare als auch linguistische Faktoren für einen erfolgreichen Rapid Tooling Einsatz ausschlaggebend. Gleichzeitig sind absolute Mussanforderungen vorhanden, ohne deren Erfüllung das bewertete Verfahren nicht eingesetzt werden kann. Eine Bewertungsmethode, die diesen vielschichtigen Charakter abbildet, ist das sogenannte Multi-Kriterium-Modell (*Ghandforoush 1988*). Demnach werden alle Alternativen durch drei unterschiedliche Arten von Bewertungsfaktoren beschrieben, deren Struktur bereits in der Anforderungsliste unter Gliederungspunkt 5.1 umgesetzt wurde.

### Gesamtbewertung

Das eigentliche Bewertungsmodell bewertet und vergleicht die Lösungsalternativen mit Hilfe eines Gesamtbewertungsfaktors. Um alle drei Arten von Anforderungsfaktoren zu verarbeiten, wird folgender Zusammenhang angewendet:

$$PM_i = CFM_i \cdot (X \cdot OFM_i + (1 - X) \cdot SFM_i) \quad \text{Gleichung 5-1}$$

- $PM_i$ : Gesamtbewertungsfaktor („package measure“) der Alternative  $i$   
 $CFM_i$ : Kritischer Faktor („critical factor measure“) der Alternative  $i$   
 $OFM_i$ : Objektiver Faktor („objective factor measure“) der Alternative  $i$   
 $SFM_i$ : Subjektiver Faktor („subjective factor measure“) der Alternative  $i$   
 $X$ : Gewichtungsfaktor zwischen objektiven und subjektiven Kriterien  
 $i$ : Index der Alternative

Die so ermittelten Gesamtbewertungsfaktoren  $PM_i$  nehmen je nach Qualität der Variante Werte zwischen 0 und 1 ein. Je größer dabei der Wert, desto höher ist der Nutzen der Alternative.

### Kritische Bewertungskriterien

Der kritische Faktor  $CFM_i$  stellt sicher, dass nur Lösungsvarianten in die engere Auswahl vordringen, die eine Erfüllung der kritischen Faktoren gewährleisten. Dazu wird eine Variante bei Nichterfüllung des Kriteriums mit dem Wert 0 bewertet, ansonsten mit dem Wert 1. Bei beispielsweise zwei kritischen Bewertungskriterien gilt:

$$CFM_i = CFM_{im} \cdot CFM_{in} \quad \text{Gleichung 5-2}$$

- $CFM_i$ : Kritischer Faktor („critical factor measure“) der Alternative  $i$   
 $CFM_{im}$ : Kritischer Faktor der Alternative  $i$  nach Kriterium  $m$   
 $CFM_{in}$ : Kritischer Faktor der Alternative  $i$  nach Kriterium  $n$

### Objektive Bewertungskriterien

Ähnlich dem Vorgehen anderer Punktbewertungsverfahren wird zur Ermittlung des Erfüllungsgrades der objektiven Kriterien ein gewichtetes Bewertungssystem erstellt (Breiing & Knosala 1997).

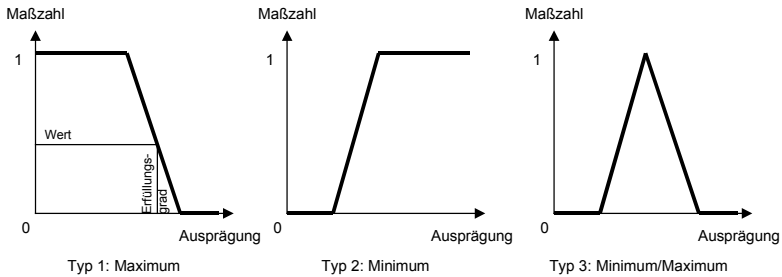


Abbildung 5-4: Zuordnung von Erfüllungsgraden zu Maßzahlen durch Wertefunktionen

Dabei werden den Systemausprägungen die Erfüllungsgrade der unterschiedlichen Lösungsvarianten anhand einer Wertefunktion Werte zwischen 0 und 1 zugeordnet. Dabei können je nach individueller Ausprägung der Anforderung unterschiedliche Typen von Wertefunktionen zur Anwendung kommen. Abbildung 5-4 zeigt drei gängige Typen von Wertefunktionen, die sich zur Bewertung der Überschreitung bzw. Unterschreitung eines Idealwertes eignen. Eine Darstellung der jeweiligen Wertefunktionen der einzelnen Anforderungskriterien erfolgt unter Punkt 5.2.3.

Die so gewonnenen Erfüllungswerte der Varianten werden mit der jeweiligen Gewichtung des Bewertungskriteriums multipliziert und anschließend zu einem Gesamtwert durch Addition zusammengefasst.

$$\text{OFMi} = \sum_{k=1}^n \text{OFMik} \cdot g_{k \text{ normiert}} \quad \text{Gleichung 5-3}$$

OFMi: Objektiver Faktor („objective factor measure“) der Alternative i

OFMik: Objektiver Faktor der Alternative i nach Kriterium k

$g_{k \text{ normiert}}$ : normierte Gewichtung des Kriteriums k

### Subjektive Bewertungskriterien

Analog dem Vorgehen zur Ermittlung des objektiven Bewertungsfaktors wird bei den subjektiven Bewertungskriterien verfahren. In diesem Fall werden jedoch linguistische Kriterien bewertet. Dies gelingt dadurch, dass auf der Ordinate der Wertefunktionen keine objektiv messbaren Eigenschaften angetragen und ausgewertet werden. Trotzdem kann eine Zuordnung der Eigenschaftsausprägung zu Maßzahlen zwischen 0 und 1 erfolgen, indem statt der Wertefunktionen ein Punktbewertungssystem eingesetzt wird. Anstelle der Werte stehen Notenbegriffe, denen die sogenannten linguistischen Variablen zugeordnet werden.

Notenbegriff	Maßzahl
Sehr gut	1
Gut	0,75
Mäßig gut	0,5
Ausreichend	0,25
Völlig ungeeignet	0

*Tabelle 5-1: Maßzahlen der subjektiven Kriterien*

Auch diese Erfüllungswerte der subjektiven Anforderungen werden mittels der Eigenschaftsgewichtungen zu einem Gesamtwert der subjektiven Anforderungen zusammengefasst:

$$SFM_i = \sum_{k=1}^n SFM_{ik} \cdot g_{k \text{ normiert}} \quad \text{Gleichung 5-4}$$

$SFM_i$ : Subjektiver Faktor („subjective factor measure“) der Alternative i

$SFM_{ik}$ : Subjektiver Faktor der Alternative i nach Kriterium k

$g_{k \text{ normiert}}$  : normierte Gewichtung des Kriteriums k

### 5.2.2 Gewichtung der Bewertungskriterien

Für die Berechnung sowohl der objektiven als auch der subjektiven Bewertungsanteile ist die Erstellung einer Gewichtung der unterschiedlichen Bewertungskriterien unerlässlich. Eine Möglichkeit dazu eröffnet die Generierung einer Rang-



folge der Bewertungskriterien mittels der Präferenzmatrixmethode (Siemens 1974). Diese Rangfolge stellt eine verhältnismäßige Wichtigkeit der einzelnen Bewertungsfaktoren dar und dient der Berechnung der Gewichtungsfaktoren.

### 5.2.2.1 Objektive Bewertungskriterien

Bei Anwendung auf die objektiven Bewertungsfaktoren der Vorauswahl der Rapid Tooling Verfahren sieht das Vorgehen folgendermaßen aus:

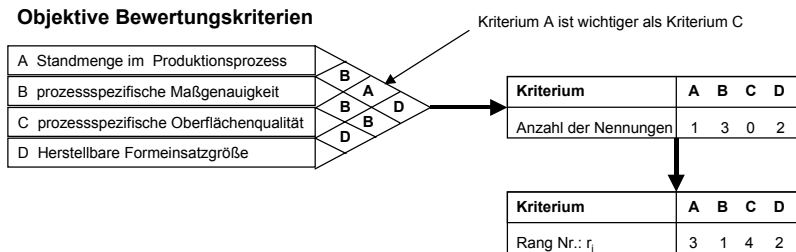


Abbildung 5-5: Ermittlung der Rangfolge der objektiven Anforderungen

Die Rangfolge des Kriteriums errechnet sich dabei anhand folgender Gleichung:

$$r_i = (n_{\max} + 1) - n_i \quad \text{Gleichung 5-5}$$

$r_i$ : Rang des Kriteriums  $i$

$n_{\max}$ : maximale Anzahl der Kriterien

$n_i$ : Anzahl der Nennungen des Kriteriums  $i$

Unter Verwendung dieser Rangfolge können die verhältnismäßigen Wichtigkeiten  $p_{ij}$  errechnet und in einer Gewichtungsmatrix dargestellt werden:

$$p_{ij} = r_j / r_i \quad \text{Gleichung 5-6}$$

	<b>Bewertungskriterium</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
<b>A</b>	Standmenge im Produktionsprozess	1	1/3	4/3	2/3
<b>B</b>	Prozessspezifische Maßgenauigkeit	3	1	4	2
<b>C</b>	Prozessspezifische Oberflächenqualität	3/4	1/4	1	1/2
<b>D</b>	Herstellbare Formeinsatzgröße	3/2	1/2	2	1

*Tabelle 5-2: Gewichtungsmatrix der objektiven Anforderungen*

Anschließend wird durch Verrechnung der Wichtigkeiten der Gewichtungsfaktor des Kriteriums errechnet:

$$g_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n p_{ij}}$$

Gleichung 5-7

	<b>Kriterium</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>Gewichtung</b>
<b>A</b>	Standmenge	1	1/3	4/3	2/3	0,73
<b>B</b>	Maßgenauigkeit	3	1	4	2	2,21
<b>C</b>	Oberflächenqualität	3/4	1/4	1	1/2	0,55
<b>D</b>	Formeinsatzgröße	3/2	1/2	2	1	1,11

*Tabelle 5-3: Errechnung der Gewichtungsfaktoren*

Der Gewichtungsfaktor wird zur Erhaltung auf die Gesamtzahl der vorhandenen Bewertungskriterien normiert:

$$g_i = \frac{g_i}{\sum_{i=1}^n g_i}$$

Gleichung 5-8

	Kriterium	Gewichtung absolut		Gewichtung normiert
A	Standmenge	0,73	} $\Sigma = 4,6$	0,16
B	Maßgenauigkeit	2,21		0,48
C	Oberflächenqualität	0,55		0,12
D	Formeinsatzgröße	1,11		0,24

Tabelle 5-4: Berechnung der normierten Gewichtungsfaktoren

### 5.2.2.2 Subjektive Bewertungskriterien

Das Vorgehen zur Gewichtung der subjektiven Bewertungsfaktoren unterscheidet sich nicht von dem der objektiven Faktoren. Die einzelnen Schritte sind auch hier die Ermittlung der Rangfolge durch Aufstellen der Präferenzmatrix, Erstellen der Gewichtungsmatrix mit den Wichtigkeiten der Kriterien sowie die Errechnung der absoluten und normierten Gewichtungsfaktoren. Im folgenden werden die Gewichtungsfaktoren der subjektiven Anforderungen ermittelt:

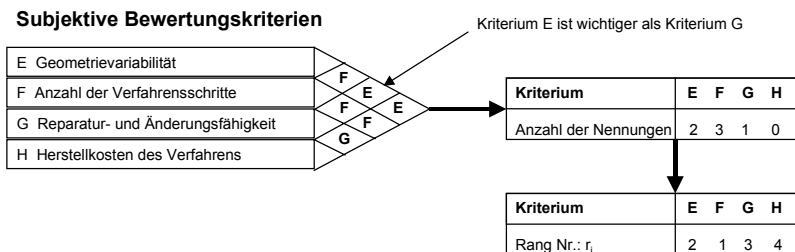


Abbildung 5-6: Ermittlung der Rangfolge der subjektiven Anforderungen

	<b>Bewertungskriterium</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>
<b>E</b>	Geometrievariabilität	1	1/2	3/2	2
<b>F</b>	Anzahl der Verfahrensschritte	2	1	3	4
<b>G</b>	Reparatur- und Änderungsfähigkeit	2/3	1/3	1	1/4
<b>H</b>	Herstellkosten des Verfahrens	1/2	1/4	3/2	1

*Tabelle 5-5: Gewichtungsmatrix der subjektiven Anforderungen*

	<b>Kriterium</b>	<b>Gewichtung absolut</b>		<b>Gewichtung normiert</b>
<b>E</b>	Geometrievariabilität	1,11	} $\Sigma = 4,6$	0,24
<b>F</b>	Anzahl der Schritte	2,21		0,48
<b>G</b>	Reparatur / Änderung	0,73		0,16
<b>H</b>	Herstellkosten	0,55		0,12

*Tabelle 5-6: Berechnung der normierten Gewichtungsfaktoren*

### 5.2.3 Wertefunktionen der Anforderungskriterien

Die einzelnen Anforderungen sowie die Gründe für ihre Auswahl wurden bereits in der Anforderungsliste beschrieben. Im Verlauf dieses Abschnittes werden nun den verschiedenen Anforderungen Wertefunktionen zugeordnet. Anhand dieser Wertefunktionen werden die objektiven Leistungsdaten der Konturfertigungsverfahren klassifiziert. Die so ermittelten Erfüllungswerte der Lösungsvarianten liegen der Vorauswahl der Konturfertigungsverfahren zugrunde.

### 5.2.3.1 Herstellungsdauer

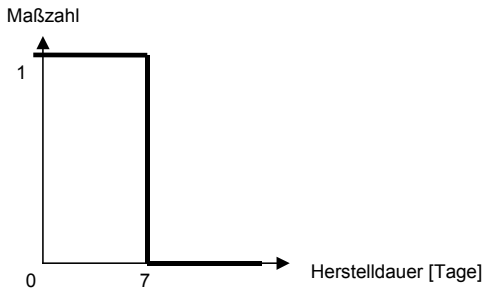


Abbildung 5-7: Wertefunktion des Kriteriums Herstelldauer

Die kritische Anforderung der Herstelldauer bewertet wie beschrieben die theoretisch notwendige Prozesslaufzeit des jeweiligen Konturfertigungsverfahrens. Dabei wird bis zu einer verfahrensspezifischen Laufzeit von 7 Arbeitstagen ein Wert von 1 vergeben. Ab einer längeren theoretischen Herstellungszeit wird der Wert 0 zugeordnet und die Lösungsvariante damit aus der Bewertung genommen.

### 5.2.3.2 Industrielle Verfügbarkeit

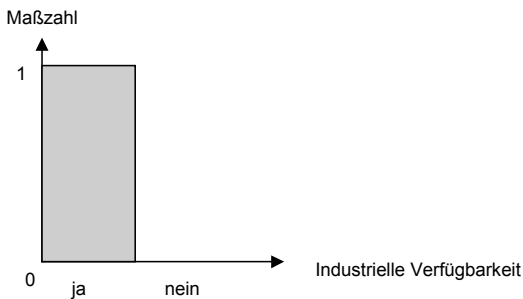


Abbildung 5-8: Wertefunktion des Kriteriums industrielle Verfügbarkeit

Die Anforderung der industriellen Verfügbarkeit erfordert eine ja – nein Entscheidung. Dementsprechend wird bei positiver Erfüllung dieser Anforderung der Wert 1 vergeben, bei negativer eine 0.

### 5.2.3.3 Standmenge im Produktionsprozess

Für die Beurteilung der Standmenge wird die bezüglich Werkzeugverschleiß schwierigste Applikation, der Leichtmetalldruckguss von Aluminium zugrunde gelegt. Eine Anzahl von 100 Bauteilen wurde als Mindestanforderung spezifiziert, so dass bis zu dieser Anzahl ein Wert von 0 vergeben wird. Ab dieser Anzahl erfolgt ein Anstieg der Wertefunktion bis zur Maximalanforderung von 5000 Bauteilen, die mit dem Wert 1 beurteilt wird.

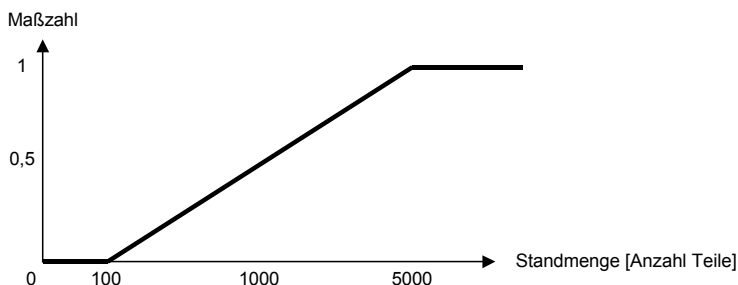


Abbildung 5-9: Wertefunktion der Standmenge

### 5.2.3.4 Prozessspezifische Maßgenauigkeit

Eine optimale Beurteilung kann nur für Verfahren vergeben werden, mit denen eine Maßgenauigkeit von  $\pm 10 \mu\text{m}$  erzielt werden kann. Dies entspricht den üblichen Anforderungen des Werkzeug- und Formenbaus (Menges & Mohren 1991). Im weiteren Verlauf fällt die Bewertung immer weiter ab. Für Verfahren, deren Genauigkeitspotential schlechter als 0,3 mm liegt wird eine Bewertung von 0 vergeben.

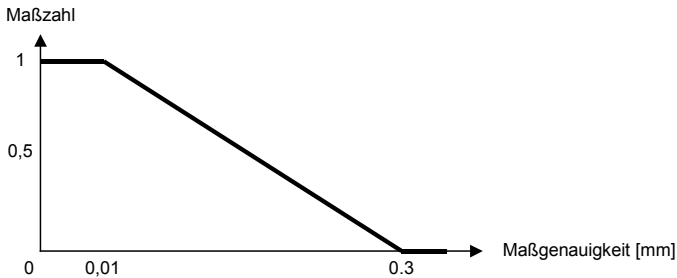


Abbildung 5-10: Wertefunktion der Maßgenauigkeit

### 5.2.3.5 Prozessspezifische Oberflächenqualität

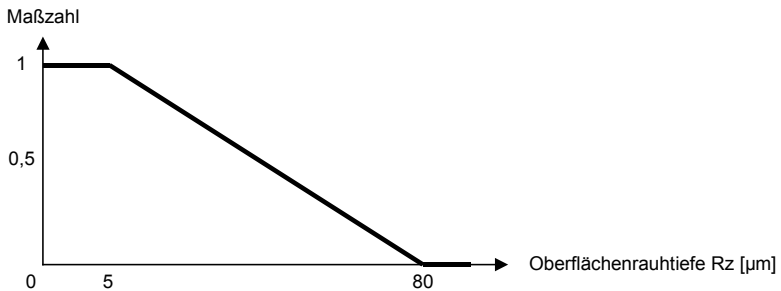


Abbildung 5-11: Wertefunktion der Oberflächenqualität

Ohne nachträglich Verbesserung der Oberflächenqualität kann nur bis hin zu einer Rauhtiefe von ca. 5 µm Rz problemlos entformt werden. Ab diesem Wert ist mit einer Verschlechterung der Prozesssicherheit und der Bauteilqualität zu rechnen. Ab einer Rauhtiefe von 80 µm Rz ist der Aufwand für Nacharbeit unwirtschaftlich hoch (Menges & Mohren 1991).

### 5.2.3.6 Herstellbare Bauteilgröße

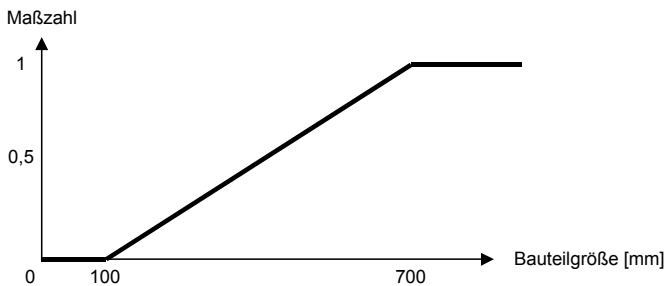


Abbildung 5-12: Wertefunktion der herstellbaren Formeinsatzgröße

80% aller weltweit hergestellten Formelemente sind in ihrer längsten Abmessungen kleiner als 700 mm (*Schock 1996*). Ab dieser Baugröße wird daher die Bewertung 1 zugeordnet. Am Minimum der Wertefunktion wird eine Mindestgröße von 100 mm für die größte Abmessung vorausgesetzt.

### 5.2.4 Ergebnis der Verfahrensvorauswahl

Unter Verwendung der unter Punkt 5.2.1 vorgestellten Methode, dem Multi-Kriterium-Modell, werden alle während der Recherche des Standes der Technik vorgestellten Fertigungsverfahren zur Herstellung von Konturelementen bewertet. Dazu werden den bereits unter Punkt 2.3 beschriebenen Eigenschaften der Fertigungsverfahren anhand der zuvor aufgestellten Wertefunktionen Erfüllungswerte zugeteilt. Linguistische Kriterien wurden mit der zuvor dargestellten Notenskala objektiviert. Tabelle 5-7 auf Seite 91 zeigt einen Überblick über die Bewertung aller Verfahren in den einzelnen Kategorien sowie das Ergebnis der Bewertung. Fertigungsverfahren, die bereits bei einer der beiden kritischen Anforderungen mit dem Wert 0 bewertet wurden, können gemäß der Konzeption der Bewertungsmethode frühzeitig von der weiteren Bewertung ausgeschlossen werden. Als Gewichtungsfaktor zwischen den objektiven und der subjektiven Kriterien wurde für den Faktor X ein Wert von 0,6 gewählt, der den objektiven Kriterien ein leichtes Übergewicht zuweist. Diese Gewichtung spiegelt die Forderung der Anwender nach einer zuverlässigen Erfüllung der quantitativ nachweisbaren Anforderungen wieder (*Ostermann & Weiss 1997*). Unter An-



wendung der zuvor hergeleiteten Gewichtungsfaktoren der einzelnen Kriterien sowie der algebraischen Zusammenhänge der Bewertungsmethode ergeben sich die unter der Spalte „Gesamtbewertung“ aufgeführten Wertigkeiten der Lösungsalternativen.

Gesamtbewertung	0,00	0,36	0,28	0,40	0,00	0,00	0,77	0,42	0,00	0,40	0,56	0,95	0,87	0,87	0,00	0,00	0,00
Konturfertigungsverfahren																	
Generative Verfahren & Feinguss	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gießharzwerkzeuge	1	1	0	0,2	0,4	0,75	1	0,25	0	0,5	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25
Spray-Metal Tooling	1	1	0	0,1	0,3	0,5	1	0,25	0	0,25	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25
Sandlaserintern	1	1	1	0	0	0,8	1	0,5	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0
Direct shell production casting	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Green body fabrication	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Senkerodieren	1	1	1	1	0,3	0,8	0,8	0,25	1	0,5	0,25	1	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Bridge Tooling	1	1	0	0,4	0,4	0,4	1	0,5	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0
Three dimensional printing	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Direktes Metall-Laserintern	1	1	0,1	0,5	0,1	0,4	1	0,25	0,25	0,5	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Indirektes Metall-Laserintern	1	1	0,7	0,4	0,3	0,5	1	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Hochgeschwindigkeitsfräsen	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Drehen	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Drahtrodieren	1	1	1	1	1	0,8	0,8	0,25	1	1	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Laminated Objekt manufacturing	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lasergenerieren	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Generative Elektrodentfertigung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 5-7: Systematische Vorauswahl der Konturfertigungsverfahren

Für die weitere Betrachtung, der Konzeption einer geometriegesteuerten Zuordnungsmethode werden nur die potentiell stärksten Lösungsalternativen weiter betrachtet. Abbildung 5-13 auf Seite 92 zeigt die Erfüllungsgrade aller Konturfertigungsverfahren bezüglich der angewendeten Vorauswahlmethode.

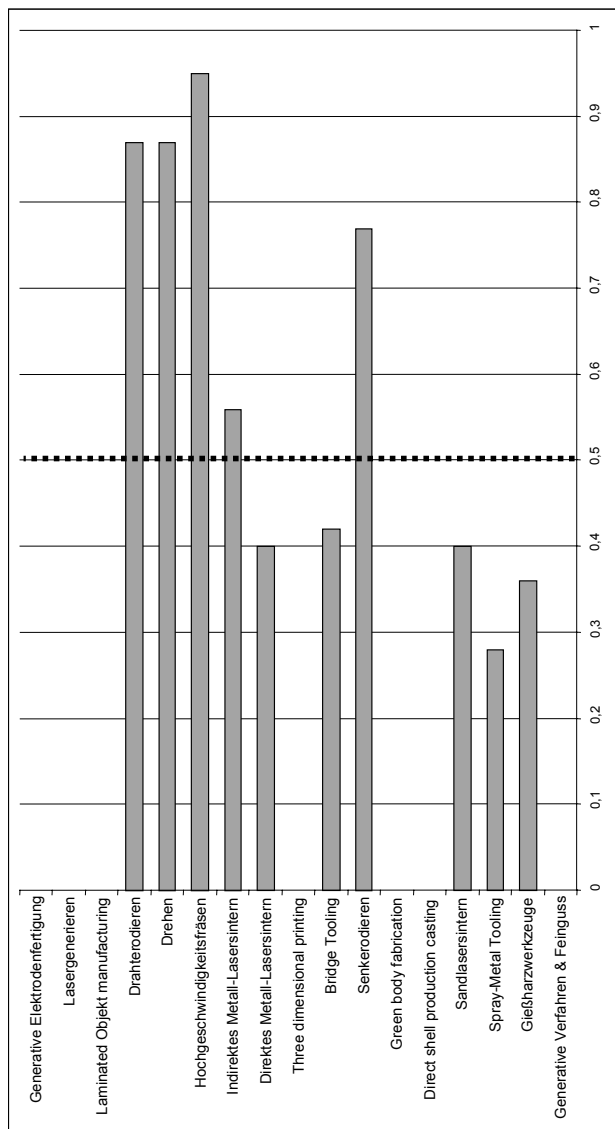


Abbildung 5-13: Erfüllungsgrade aller Konturfertigungsverfahren

Stellt man die erzielten Erfüllungsgrade aller Verfahren zueinander in Relation ergibt sich zwischen den Werten der Verfahren Bridge Tooling sowie dem indirekten Metall-Lasersintern der größte relative Sprung von 33%. Die Schwelle für die Annahmen eines Konturfertigungsverfahrens wird daher zwischen diesen beiden Fertigungsverfahren bei einem Erfüllungsgrad von 0,5 gelegt.

Als Ergebnis der Vorauswahlmethode ergibt sich eine Anzahl von fünf alternativen Fertigungsverfahren. Diese sind im einzelnen die Verfahren:

- Senkerodieren
- Indirektes Metall-Lasersintern
- Hochgeschwindigkeitsfräsen
- Drehen sowie
- Drahterodieren.

### 5.3 Erarbeitung der geometriespezifischen Zuordnungsmethode

Bereits bei der Vorstellung der Konturfertigungsverfahren zeigte sich eine starke Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Verfahren von der geometrischen Beschaffenheit des zu fertigendes Körpers. Die Geometrie der letztendlich herzustellenden Formeinsätze hängt dabei von zwei verschiedenen Voraussetzungen ab.

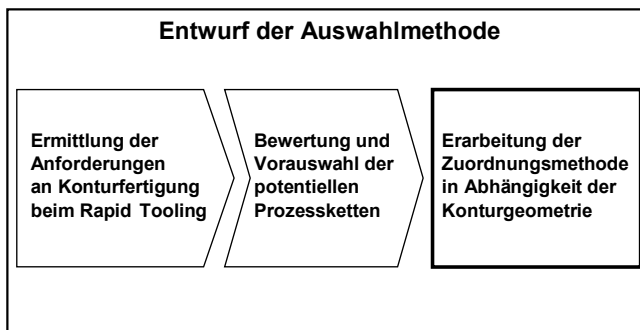
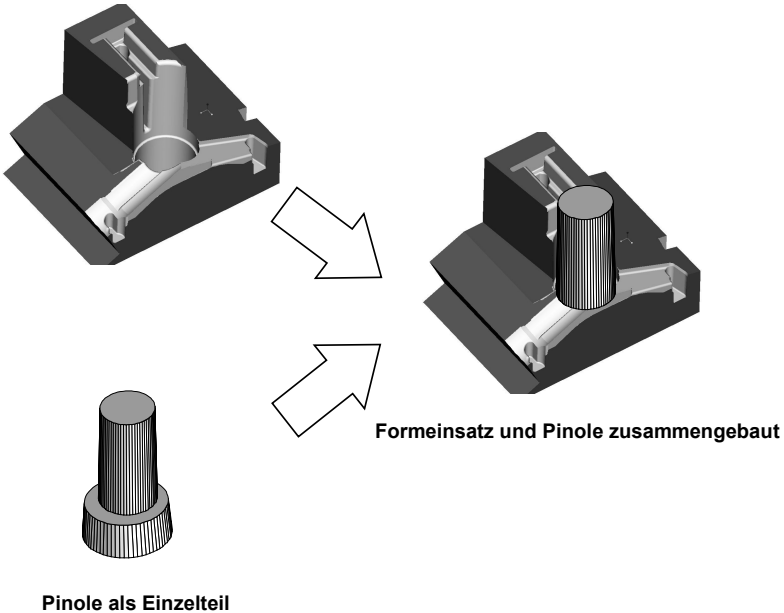


Abbildung 5-14: Konturgeometrie als Steuerelement für die Verfahrenszuordnung

- Die Formeinsätze stellen das Negativ des mittels Urformverfahren herzustellenden Bauteiles dar. Daher ist ein Kriterium die halbseitige Geometriecharakteristik des Zielbauteiles. Diese bereichsweise Betrachtung unterscheidet die vorliegende Arbeit von anderen Untersuchungen (*Eversheim u.a. 1996, Macht 1999, Müller 1996, Kaschka 1999*) bei denen jeweils u.a. die globalen Geometrieanforderungen des Bauteiles als Auswahlkriterium für das anzuwendende Herstellverfahren eingesetzt werden.
- Die Formeinsätze selbst können durch weitere Segmentierung in mehrere geometrisch unterschiedliche Teileinsätze aufgeteilt werden. Dies ist bei sehr großen Unterschieden der Geometriecharakteristik notwendig wie sie z.B. bei rotationssymmetrischen Kernen in Mitten einer komplexen Konturgeometrie

auftreten. Diesen Gedanken berücksichtigt gegenwärtig keine andere wissenschaftliche Untersuchung.

#### **Formeinsatz ohne Pinole**



*Abbildung 5-15: Beispielhafte Segmentierung von Formelementen*

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher eine Zuordnungsmethode entwickelt, mit der auf Basis der Konturgeometrie der Formeinsätze das geeignetste Fertigungsverfahren ermittelt werden kann. Als Auswahlkriterien werden eine möglichst geringe Bearbeitungszeit sowie möglichst geringe Herstellkosten zugrunde gelegt. Dabei werden nur Verfahren berücksichtigt, die aufgrund der Vorauswahlmethode als prinzipiell geeignet ermittelt wurden. Diese Beschränkung gewährleistet, dass die während der Vorauswahl definierten Anforderungen in einem ausreichendem Maße erfüllt werden können.

### 5.3.1 Strukturierung der Zuordnungsmethode

Das Vorgehen bei der Zuordnung der geeigneten Fertigungsverfahren zur Konturgeometrien ist aufgrund der Vielschichtigkeit der Problemstellung aber auch zugunsten einer schnellen Anwendung mehrstufig angelegt. Dadurch müssen nicht für jede Verfahrensauswahl alle Schritte durchlaufen werden. Dies fördert insbesondere die Akzeptanz für eine industrielle Anwendung der Zuordnungsmethode. Abbildung 5-16 auf Seite 97 zeigt den prinzipiellen Ablauf der Zuordnungsmethode, der zunächst zusammenfassend beschrieben wird:

Die Zuordnungsmethode kann begonnen werden, sobald die Werkzeugkonstruktion die unterschiedlichen Formelemente als Negativgeometrien der Bauteilkonturen festgelegt hat. Dies bedingt insbesondere die urformtechnisch notwendige Verteilung der Konturen auf die unterschiedlichen Entformungsrichtungen. Der erste Schritt der Zuordnungsmethode dient dazu, unmittelbar offensichtliche Übereinstimmungen von Formelementen und Fertigungsverfahren durch analytische Untersuchung der Gegebenheiten zu ermitteln. Eine detaillierte Beschreibung dieses Schrittes befindet sich unter Punkt 5.3.2 ff.

Formelemente, denen mittels des ersten Schrittes aufgrund z.B. des Fehlens einer ausgeprägten Geometriecharakteristik oder der hohen Komplexität noch kein Fertigungsverfahren zugeordnet werden konnte, werden im zweiten Schritt weiter untersucht (siehe Punkt 5.3.3 ff.). Dazu werden signifikante Kennzahlen der Geometrie der Konturelemente insbesondere durch EDV-Unterstützung ermittelt.

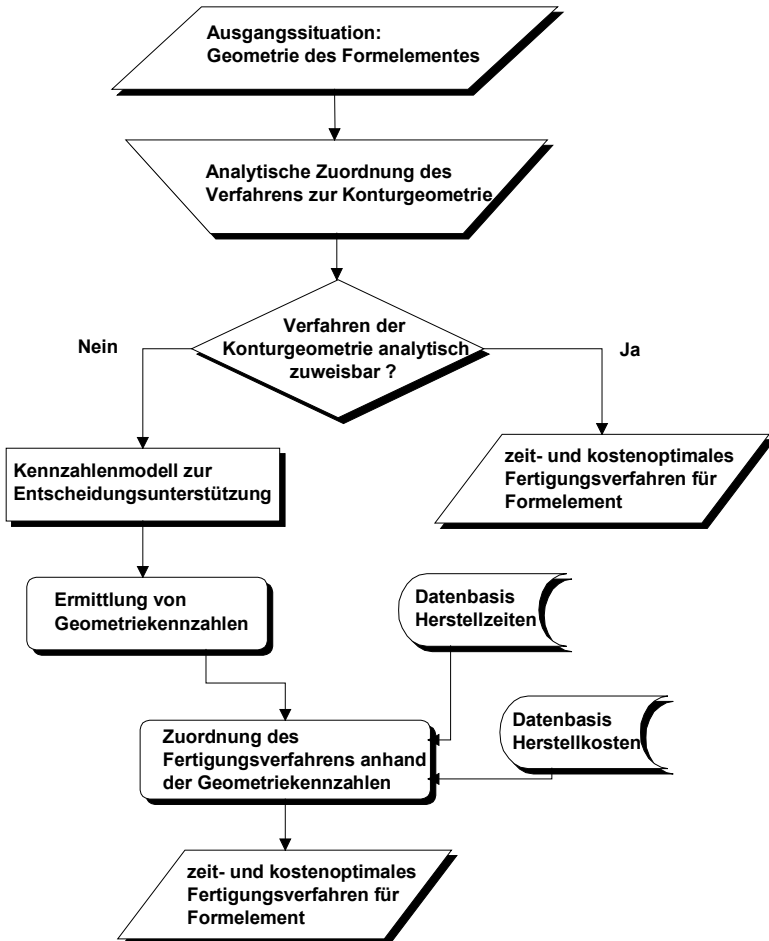


Abbildung 5-16: Strukturdiagramm der Zuordnungsmethode

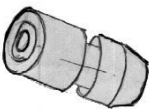
Unter Auswertung einer signifikant großen Anzahl von Werkzeugbauprojekten wurde dazu eine Datenbasis des Zeit- und Kostenverlaufes der potentiellen Fertigungsverfahren ermittelt. Diese Informationen wurden zu Trendlinien des Zeit- und Kostenverhaltens bezüglich objektiv feststellbarer Geometrikennzahlen verarbeitet. Anhand dieser Trendlinien kann eine Zuordnung des bezüglich der

Kriterien „Kosten“ und „Zeit“ optimalen Fertigungsverfahrens zum betrachteten Formelement vorgenommen werden.

### 5.3.2 Schritt 1: Analytische Zuordnung der Konturfertigungsverfahren

Urformende Verfahren ermöglichen eine sehr weitreichende geometrische Gestaltung der herzustellenden Bauteile. Trotzdem stößt die gestalterische Freiheit des Konstrukteurs auf technologische und wirtschaftliche Grenzen. Einerseits können regelgeometrische Körper vielfach wirtschaftlicher durch direkte spanende Fertigung produziert werden. Andererseits sind durch die Prozesseigenschaften der Urformverfahren geometrische Beschränkungen wie Entformbarkeit und Wandstärkenverhältnisse einzuhalten. Daher kann nur eine beschränkte Bandbreite von Geometrieelementen gefertigt werden, die sich in unterschiedliche Kategorien einteilen lassen. Um die Problematik weiter aufzubereiten soll zunächst auf die geometrischen Haupttypen der herzustellenden Bauteile eingegangen werden. Die Einteilung der Geometrietypen wurde von *Hornig 1998* übernommen. Im Anschluss daran werden die Konsequenzen auf die Geometrietypen der Formeinsätze und ihrer analytischen Zuordnung zu Konturfertigungsverfahren betrachtet.

#### 5.3.2.1 Bauteilgeometrien



##### Rotatorisch

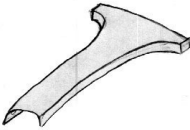
- geringe geometrische Komplexität
- hohe Anforderungen an Genauigkeit
- geringes Aufkommen für Rapid Tooling

Abbildung 5-17: Rotatorischer Geometrietyp (*Hornig 1998*)

Rotationssymmetrische Bauteile weisen sehr einfache geometrische Gegebenheiten auf. Die Geometrie ist bereichsweise nicht unterschiedlich von Mischformen insbesondere mit anderen Geometrietypen wie komplex gedungen abgesehen. Allerdings sind ihre Anforderungen an Genauigkeit und Oberflächenqualität sehr



hoch. Daher werden derartige Bauteile selten urformtechnisch hergestellt, so dass ihr Aufkommen für das Rapid Tooling eher untergeordnet ist.

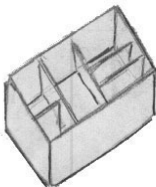


### Schalenförmig

- **geringe geometrische Komplexität**
- **hohe Anforderungen an Genauigkeit und Oberfläche**
- **mittleres Aufkommen für Rapid Tooling**

Abbildung 5-18: Schalenförmiger Geometrietyp (Hornig 1998)

Schalenförmige Teile haben weiche, größtenteils freigeformte Geometrien. Sie stellen meistens die Designseite eines Bauteiles dar, so dass ihre Anforderungen an Genauigkeit und Oberflächenqualität hoch sind. Die geometrische Komplexität ist eher gering. Allerdings weisen diese Bauteile an der Innenseite sehr häufig den Geometrietyp kastenförmig auf. Das Aufkommen dieses Geometrietyps für das Rapid Tooling ist mittelstark.



### Kastenförmig

- **sehr hohe geometrische Komplexität**
- **geringe Anforderungen an Genauigkeit**
- **hohes Aufkommen für Rapid Tooling**

Abbildung 5-19: Kastenförmiger Geometrietyp (Hornig 1998)

Kastenförmige Teile besitzen tiefe, zerklüftete Strukturen, Rippen, Stege und Nuten mit scharfen Innenecken und hohen Aspektverhältnissen. Sie stellen meistens Funktionsseiten von Bauteilen dar mit einer damit verbundenen sehr hohen geometrischen Komplexität. Ihre Genauigkeitsanforderungen sind jedoch bis auf wenige Funktionsmaße eher gering. Die Oberflächenanforderungen sind bis auf die Entformbarkeit völlig untergeordnet. Typische Mischformen treten mit dem Typ schalenförmig auf. Der Anteil von kastenförmigen Teilen am Aufkommen im Prototypenwerkzeugbau ist sehr hoch.



### **Komplex gedungen**

- **hohe geometrische Komplexität**
- **geringe Anforderungen an Genauigkeit**
- **hohes Aufkommen für Rapid Tooling**

*Abbildung 5-20: Komplex gedrungener Geometrietyp (Hornig 1998)*

Komplex gedrungene Bauteile zeigen feinste Strukturen an einem ansonsten kompakten körperlichen Grundaufbau. Dies bedingt meistens eine komplexe Entformungskinematik, da keine einfache Trennungsebene mit einer Entformungsrichtung mehr zu erkennen ist. Die Genauigkeits- und Oberflächenanforderungen sind eher gering, da es sich in der Regel um innenliegende Funktionsbauteile handelt. Das Aufkommen am Bauteilvolumen des Rapid Tooling ist hoch.

### **5.3.2.2 Formeinsatzgeometrien**

Die oben vorgestellten prinzipiellen Geometrietypen der Bauteile spiegeln sich in den Geometrietypen ihrer Negativkonturen, den Formeinsätzen wieder. Durch die bereits angesprochene Aufteilung der Formhöhlung in unterschiedliche Formeinsätze sowie deren Segmentierung entfallen die Mischtypen weitgehend, so dass sich die Anzahl an Geometrietypen weiter eingrenzen lässt. Im einzelnen sind folgende Konturtypen zu beobachten:

#### **Rotatorische Geometrien**

Diese Geometrie tritt selten auf, da sie sich auf wenige Situationen beschränkt. Diese sind Konturen der seltenen runden Bauteile oder Kernzüge, sowie rotatorische Kerneinsätze zur Reduzierung der Komplexität bei allgemeinen Konturelementen.

#### **Zweidimensionale Geometrien**

Ebenfalls weniger häufig ist das Vorkommen 2 bzw. 2 ½ dimensionaler Konturelemente. Ähnlich den rotatorischen Geometrien entstehen sie hauptsächlich als Kerneinsätze zur Reduzierung der Komplexität allgemeiner Formeinsätze.

### **Schalenförmige Geometrien**

Analog dem Geometrietyt auf Seiten der Bauteile zeigt sein negatives Abbild am Formeinsatz ebenfalls die gleichen Anforderungen hinsichtlich geometrischer Komplexität, Oberflächenqualität und Maßgenauigkeit auf. Gleichzeitig eignet sich dieser Konturtyp auch zur Abformung der unter Punkt 5.3.2.1 genannten rotatorischen Bauteilgeometrien.

### **Komplexe Geometrien**

Dieser Geometrietyt entspricht der Negativkontur der kastenförmigen Bauteilgeometrie. Die Anforderungen an Genauigkeit und Oberflächenqualität sind entsprechend eher gering einzustufen. Zusätzlich korrespondiert dieser Geometrietyt mit den Anforderungen, die an Konturelemente zur Erzeugung komplex geformter Bauteilgeometrien gestellt werden.

### **5.3.2.3 Analytische Zuordnung von Fertigungsverfahren zu Formeinsatzgeometrien**

Die analytische Zuordnung der Fertigungsverfahren zu Formeinsatzgeometrien ist nur bei den oben angesprochenen geometrisch einfachen Geometrietypen möglich. Diese sind der rotatorische, der zweidimensionale und der schalenförmige Geometrietyt. Zu Ihrer Herstellung sind die Fertigungsverfahren (Hochgeschwindigkeits-)Fräsen, Drehen und Drahterodieren geeignet. Wie während der Vorauswahl unter Punkt 5.2 ermittelt, erfüllen diese Verfahren die aufgrund der Anwendung Rapid Tooling an sie gestellten Anforderungen gleichermaßen sehr gut. Einzig die geometrische Variabilität erzielt bei diesen Fertigungsverfahren nur eine niedrigere Bewertung, da jedes dieser Verfahren einen spezifischen Geometrietyt aufgrund seiner Eigenschaften favorisiert. Je nach Ausprägung der Geometriemerkmale erzielt daher nur eines der genannten Verfahren für einen bestimmten Geometrietyt optimale Zeit- und Kostenwerte.

Die folgende Liste zeigt eine Zuordnung aufgrund des Kosten- und Zeitverhaltens der Fertigungsverfahren:

<b>Geometrietyp</b>	<b>Fertigungsverfahren</b>
Rotatorisch	Drehen
Zweidimensional	Drahterodieren
Zweieinhalbdimensional	Fräsen
Schalenförmig	HSC-Fräsen

*Tabelle 5-8: Analytische Zuordnung von Geometrietypen zu Fertigungsverfahren*

Die analytische Verfahrenszuordnung anhand linguistischer Einteilung der Geometrietypen ist in diversen Quellen beschrieben und entspricht dem allgemein üblichen Vorgehen bei der Auswahl von Fertigungsverfahren in der industriellen Praxis des auf Einzelteilerfertigung spezialisierten Werkzeug- und Formenbaus (Claho 1998, Eversheim & Klocke 1998). Aufgrund der eindeutigen Charakteristik sowohl der Geometrien als auch der Fertigungsverfahren sowie der geringen Komplexität, reichen einfache Eigenschaftsbeschreibungen als Zuordnungskriterien aus, ohne das weitergehenden Untersuchungen des Zeit- und Kostenverhaltens notwendig sind. Die Möglichkeiten dieser Vorgehensweise beschränken sich jedoch auf geometrische einfache Konturelemente.

### **5.3.3 Schritt 2: Zuordnung von Konturfertigungsverfahren anhand von Kennzahlen**

Aufgrund hoher geometrischer Komplexität oder wegen des Vorliegens einer uneinheitlichen Geometriecharakteristik ist eine analytische Zuordnung in vielen Fällen nicht möglich. Deshalb muss bei Vorliegen komplexer Geometrien eine Möglichkeit zur objektiven Verfahrenszuordnung geschaffen werden. Da an die Fertigungsverfahren zur Herstellung derartiger Formeinsatzgeometrien höchste Anforderungen bezüglich geometrischer Variabilität gestellt werden, verkleinert sich die Anzahl an möglichen Alternativen auf drei verschiedene Prozessketten. Dies ist zum einen die Herstellung der Formeinsätze durch den indirekten Metall-Lasersinterprozess, zum anderen über das Fertigungsverfahren Hochgeschwin-

digkeitsfräsen, sowie die Prozesskette Hochgeschwindigkeitsfräsen mit anschließendem Senkerodieren.

Im folgenden wird daher ein Vorgehensmodell erarbeitet, auf dessen Basis eine Zuordnung der drei genannten Fertigungsverfahren zu geometrisch komplexen Formeinsätzen vorgenommen werden kann. Dazu werden objektiv ermittelbare Kennzahlen der Formeinsätze auf ihren Auswirkungen hinsichtlich des Zeit- und Kostenverhaltens der betrachteten Fertigungsverfahren untersucht. Ziel dieser Maßnahme ist es, durch geeignete Methoden wie z.B. der Regressionsanalyse Trendfunktionen des Zeit- und Kostenverhaltens der Verfahrensalternativen zu erarbeiten, die als Entscheidungsgrundlage der Problemstellung herangezogen werden können.

### **5.3.3.1 Ermittlung der Zusammenhänge zwischen geometrischen Kennzahlen und dem Zeit- und Kostenverhalten**

Die Ermittlung aussagekräftiger Kennzahlen der Konturgeometrien sowie der Zusammenhänge zu dem daraus resultierenden Zeit- und Kostenverhalten erfolgte durch den Aufbau einer Datenbasis. Dazu wurden 18 unterschiedliche Bauteile aus der industriellen Praxis ausgewertet und hinsichtlich ihres Verhaltens bezüglich folgender 17 Kennzahlen untersucht (siehe auch Abbildung 5-21 auf Seite 104). Dabei wurde Wert auf eine unproblematische Erhebung der Kennzahlen beispielweise durch den Einsatz von CAD/CAM-Systemen gelegt:

- Länge des Bauteils
- Breite des Bauteils
- Höhe des Bauteils
- Gesamtvolumen des Bauteils: Das Volumen liefert die Modellanalysefunktionalität von 3D-CAD-Systemen.
- Zerspanvolumen: Dieses Volumen errechnet sich aus dem theoretischen Volumen eines umschriebenen Quaders abzüglich des tatsächlichen Bauteilvolumens.
- Volumenverhältnis: Quotient aus Zerspanvolumen und Gesamtvolumen
- Oberfläche des Bauteiles. Diese Kennzahl kann ebenfalls unter Verwendung eines CAD-Systems ermittelt werden.
- Aspektverhältnis: Als Aspektverhältnis wird der Quotient aus Tiefe und Breite der am Bauteil vorkommenden Nuten verwendet. Eine Nuttiefe von 10 mm bei einer gleichzeitigen Breite von 1mm ergibt beispielsweise ein Aspektverhältnis von 10. Als Kennzahl wird der größte am Bauteil vorkommende Wert verwendet.

- **STL-Dreiecke:** Beim Export der CAD-Bauteildaten in das STL-Schnittstellenformat wird die Bauteiloberfläche durch eine Triangulationsbeschreibung approximiert. Als Kennzahl wird die dazu notwendige Anzahl an Dreiecksflächen verwendet.
- **Polierfläche:** Diese Kennzahl ist der Anteil der Oberfläche, der zur Abformung des Gußteils dient. Er errechnet sich aus der Gesamtoberfläche abzüglich der Seiten- und Bodenflächen sowie der Trennflächen.

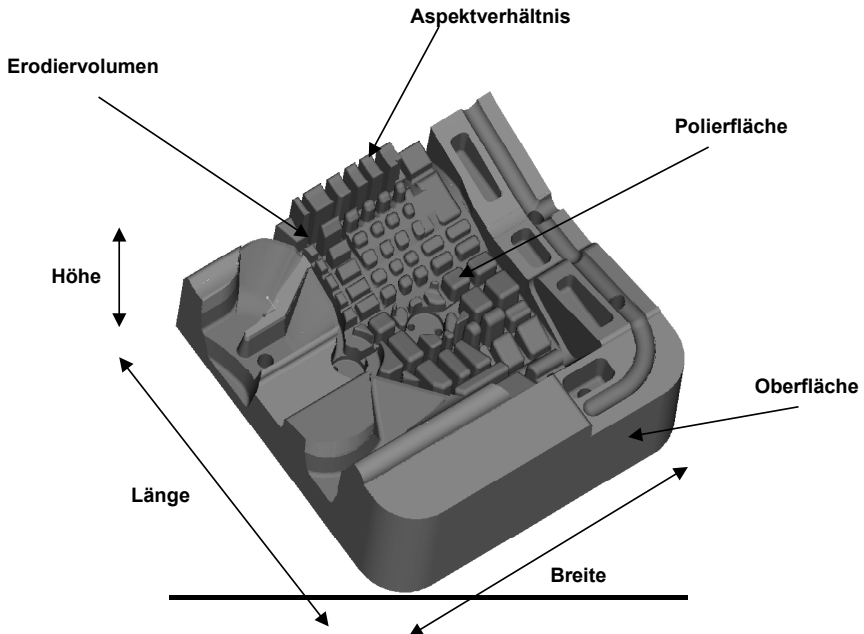


Abbildung 5-21: Kennzahlen der Bauteile

- **Gewichtete Polierfläche:** Je nach Geometriecharakteristik wird die zuvor ermittelte Polierfläche mit einem Korrekturfaktor multipliziert. Dieser Faktor liegt zwischen 0,3 und 1 und wird anhand von Erfahrungswissen über die manuelle Nacharbeit von Bauteilen festgelegt. Wesentlicher Einfluß hat dabei die Lage der zu polierenden Flächen unterhalb der Bauteilgrenzen. Als Richtlinien gilt: je 5 mm unterhalb der Bauteilgrenzen erhöht sich der Korrekturfaktor um 0,1.
- **Elektrodenanzahl:** Diese Kennzahl bezeichnet die Anzahl an Erosionselektroden, die bei einer senkerosiven Herstellung des Bauteiles notwendig sind. Sie kann leicht abgeschätzt werden.
- **Erodiervorgänge:** Da oftmals gleiche Elektroden an verschiedenen Stellen benutzt werden können, bezeichnet diese Kennzahl die Anzahl an Erodiervorgängen. Auch diese Kennzahl wird abgeschätzt.

- Erodiervolumen: Durch die Herstellung des Bauteiles mittels Erodieren wird dieses Volumen entfernt. Mittels einer NC-Simulation kann das durch Fräsen eliminierbare Volumen leicht ermittelt werden. Das Erodiervolumen errechnet sich im Anschluß als Differenzbetrag zum gesamten Zerspanvolumen.
- Erodiervolumenverhältnis: Quotient aus Erodiervolumen und Zerspanvolumen
- Elektrodenanzahl x Erodiervolumenverhältnis: Dieser einheitslose Faktor relativiert die Anzahl der Elektroden über den Erodieraufwand.
- STL-Dreiecke/Oberfläche: Bei stark gekrümmten Bauteilflächen ist zur Triangulationsapproximation eine weit höhere Anzahl an Dreiecksflächen notwendig als bei ebenen Flächen. Daher kann bestimmt dieser Faktor einen Grad der geometrischen Komplexität.

Eine Darstellung der einzelnen ausgewerteten Bauteilgeometrien sowie der ermittelten spezifischen Kennzahlen ist im Anhang unter Punkt 9.1 dokumentiert.

Für jedes dieser Bauteile wurden die jeweils zur Herstellung des Teiles benötigten Zeit- und Kostenwerte der alternativen Fertigungswege ermittelt. Da es sich bei allen Bauteilen um Bestandteile realer Projekte handelte, konnten dabei die Ergebnisse der realen Fertigung verwendet werden. Weil die Bauteile in der Realität nur auf jeweils einem Fertigungsweg hergestellt wurden, mussten die Zeit- und Kostenwerte des alternative Fertigungsprozesses durch Simulationssysteme ermittelt bzw. durch Kalkulationsmethoden sehr aufwendig errechnet werden. Insgesamt ergeben sich für die 18 untersuchten Bauteile folgende Zeit- bzw. Kostenwerte:

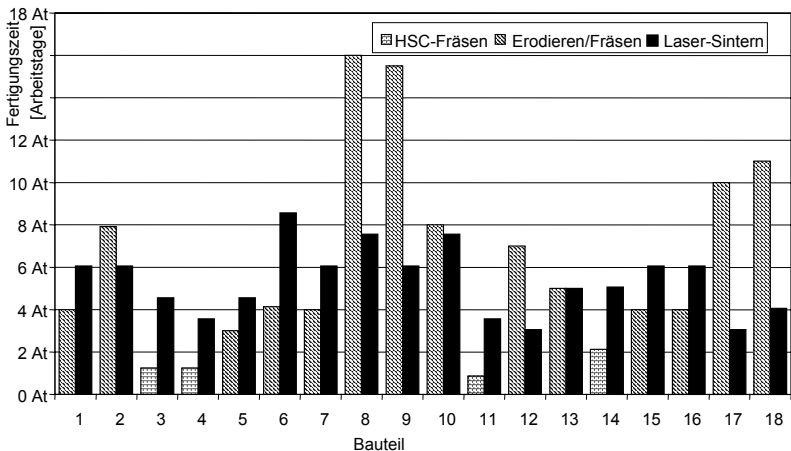


Abbildung 5-22: Gegenüberstellung der Fertigungszeiten

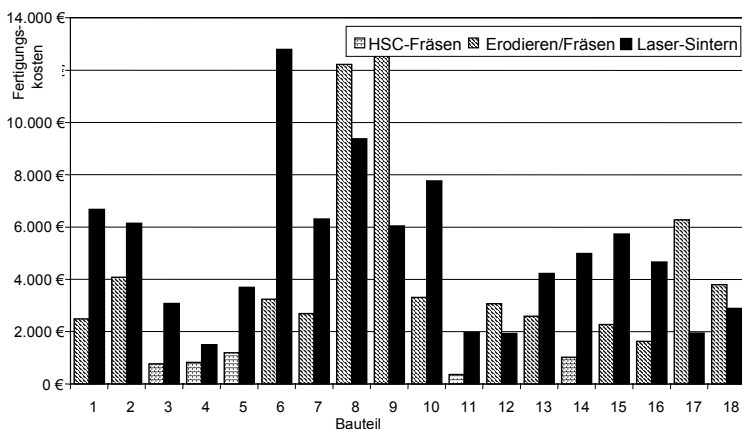


Abbildung 5-23: Gegenüberstellung der Fertigungskosten

Die so erarbeitete Datenbasis wurde im weiteren Verlauf dafür verwendet, einen arithmetischen Zusammenhang zwischen geometrischen Kennzahlen und Zeit- bzw. Kostenverhalten abzuleiten.

### Hochgeschwindigkeitsfräsen

Bei näherer Betrachtung der Zeit- und Kostenwerte anhand der beiden Diagramme in Abbildung 5-22 und Abbildung 5-23 ist der sehr geringe Aufwand für die Bauteile 3, 4, 5, 11, und 14 auffällig. Im Zeitverhalten liegt hier zwischen dem aufwendigsten Teil innerhalb dieser Gruppe, dem Bauteil 14 und dem nächstfolgenden aller Bauteile (Bauteil 15) ein Zuwachs von ca. 50%.

Der wesentliche Unterschied zwischen der genannten Gruppe und dem Rest der Bauteile kann bei Zusammenstellung der Kennzahlen Elektrodenanzahl und Aspektverhältnis ermittelt werden. Abbildung 5-24 zeigt deutlich, dass alle der 5 genannten Bauteile bezüglich der beiden betrachteten Kennzahlen folgende Merkmale aufweisen.

- Alle genannten 5 Bauteile weisen maximale Aspektverhältnisse auf die unter für die frästechnische Herstellung entscheidenden Schwellwert von 10 liegen. Diese Bedingung alleine wird jedoch auch von Bauteil 7 erfüllt, ohne dass dieses Teil besonders geringe Fertigungszeiten- und -kosten aufweist.
- Zusätzlich wurden für die fünf Bauteile mit dem geringsten Fertigungsaufwand keine einzige Senkerosionselektrode benötigt, da diese Bauteile bei-



spielweise keine scharfkantigen Innenecken besitzen. Die Kennzahl Elektrodenanzahl lautet also in allen fünf Fällen 0.

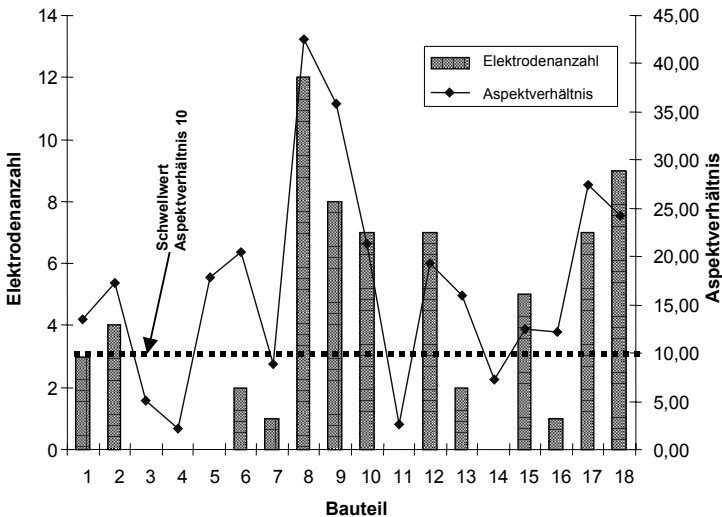


Abbildung 5-24: Gegenüberstellung der Kennzahlen Elektrodenanzahl und Aspektverhältnis

Für die Herstellung der 5 betrachteten Bauteile ist also allein die Technologie Hochgeschwindigkeitsfräsen ausreichend. Da im Vergleich der verbliebenen Fertigungstechnologien das Hochgeschwindigkeitsfräsen die höchste Produktivität aufweist (Schulz 1996), erzeugt dieses Verfahren die geringsten Fertigungszeiten und -kosten. Aufgrund der Beobachtungen der Beispielbauteile lassen sich als Entscheidungskriterium die Kennzahlen Aspektverhältnis und Elektrodenanzahl identifizieren. Bauteile die für eine rein frästechnische Herstellung möglich ist, dürfen ein maximales Aspektverhältnis von 10 aufweisen und dürfen keine Erosionselektrode benötigen.

### Indirektes Metall-Lasersintern

Die Zeiten und Kostenwerte des indirekten Lasersinterns können aufgrund des stark standardisierten Fertigungsablaufs und Parameterbindung des Verfahrens zuverlässig durch einfache Kalkulationsrechnungen, die einer strengen Linearität folgen ermittelt werden. Der einzige Einfluss seitens der Bauteilgeometrie liegt

aufgrund der Bauteilabmessungen (Länge, Breite, Höhe) und dem Volumenanteil bezüglich des theoretisch aufgespannten Maximalvolumens vor.

Beispielhaft bestehen folgende Zusammenhänge für die Zeitenberechnung:

$$t_{\text{LayerBauteil}} = \frac{\text{Länge} \cdot \text{Breite} \cdot \text{Volumenverhältnis}}{\text{VectorSpacing} \cdot \text{ScanSpeed}} \quad \text{Gleichung 5-9}$$

$$t_{\text{LayerAufmaß}} = \frac{(\text{Länge} + \text{Breite}) \cdot 2 \cdot A_{\text{Be}}}{\text{VectorSpacing} \cdot \text{ScanSpeed}} \quad \text{Gleichung 5-10}$$

$$t_{\text{Layer}} = t_{\text{LayerBauteil}} + t_{\text{LayerAufmaß}} \quad \text{Gleichung 5-11}$$

$$t_{\text{Bauteil}} = \frac{(\text{PowderDelivery} + t_{\text{Layer}}) \cdot \left( \text{Höhe}' + \frac{A_{\text{Fo}} + A_{\text{Bo}}}{\text{Volumenverhältnis}} \right)}{\text{LayerThickness}} \quad \text{Gleichung 5-12}$$

$$t_{\text{Gesamt}} = t_{\text{Bauteil}} + t_{\text{sonstige}} \quad \text{Gleichung 5-13}$$

**Bauteilunabhängige Werte:** VectorSpacing, ScanSpeed, Bearbeitungsaufmaß  $A_{\text{Be}}$ , Formtrennaufmaß  $A_{\text{Fo}}$ , Bodenaufmaß  $A_{\text{Bo}}$ , PowderDelivery, LayerThickness,  $t_{\text{sonstige}}$  (Zeitpauschale von 38,5 h für CAD-Konvertierung, Maschinenrüstzeit, Ofenprozess, Abkühlzeit, Säubern und Polieren).

**Bauteilkennzahlen:** Länge, Breite, Höhe, Volumenverhältnis

### Senkerodieren

Die notwendigen Zusammenhänge zwischen Bauteildaten und Fertigungszeiten bzw. –kosten sind für die Prozesskette des Senkerodierens sehr komplex. Daher wurde für die bereits dargestellten 17 unterschiedlichen Kennzahlen jeweils eine lineare Regression durchgeführt, um ggf. einen Zusammenhang zwischen Geometrieparameter und Zeit- bzw. Kostenentwicklung aufzudecken. Derartige lineare Zusammenhänge sind besonders gut geeignet, eine Berechnung in inverser Richtung durchzuführen.

Zusätzlich wurde jeweils das Bestimmtheitsmaß der Regression  $R^2$  errechnet, um die Qualität der Annäherung und damit die Eignung der betrachteten Kennzahl zu überprüfen.

$$R^2 = \frac{[n(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)]^2}{[n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]} \quad \text{Gleichung 5-14}$$

n: Anzahl der Bauteile

x: Fertigungszeit bzw. Fertigungskosten

y: zugehöriger Wert der jeweiligen Kennzahl

Abhängig vom Bestimmtheitsgrad besitzt die Regressionsgerade eine bestimmte statistische Sicherheit und einen statischen Fehler, mit der sie die Kennzahl  $t$  über der Fertigungszeit bzw. -kosten wiedergibt. Innerhalb dieser Fehlertoleranz befindet sich die tatsächliche Regressionsgerade. Die entsprechend dem Parameterverlauf ermittelten Fehlertoleranzen entsprechen zwei Grenzgeraden, eine mit einer größeren Steigung als die der ermittelten Regressionsgerade, und eine Grenzgerade mit einer geringeren Steigung. Die Gleichungen der Geraden ergeben sich nach folgenden Formeln (*Mückenheim 1996*):

n Anzahl der Bauteile

x Fertigungszeit / -kosten

y zugehöriger Wert des Parameters

t Korrekturfaktor für Datenbasisanzahl 18

(Wert 2,21 für Vertrauensniveau 95% (*Chatterjee & Price 1995*))

$$m = \frac{n\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad \text{Gleichung 5-15: Steigung der Ausgleichsgeraden}$$

$$c = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i y_i}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad \text{Gleichung 5-16: Achsabschnitt}$$

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - mx_i - c)^2} \quad \text{Gleichung 5-17: Standardabweichung}$$

$$\Delta m = s_y \sqrt{\frac{n}{n \sum (x_i^2) - (\sum x_i)^2}} \quad \text{Gleichung 5-18: Unsicherheit der Steigung}$$

$$\Delta c = s_y \sqrt{\frac{\sum (x_i^2)}{n \sum (x_i^2) - (\sum x_i)^2}} \cdot t \quad \text{Gleichung 5-19: Unsicherheit des Achsenabschnitts}$$

Auf die vollständige Darstellung der Berechnung der einzelnen Bestimmtheitsmaße aller Kennzahlen wird aufgrund ihres Umfanges an dieser Stelle verzichtet. Eine Auflistung aller Bestimmtheitsmaße der untersuchten Kennzahlen sowie eine exemplarische Darstellungen der linearen Zusammenhänge zwischen Kennzahlen und Zielwerten befindet sich im Anhang unter Punkt 9.2.

### 5.3.3.2 Auswertung der Zeit- bzw. Kostentrends

Um anhand der Trendfunktionen der Kennzahlen Prognosen bezüglich einer Entscheidung pro oder contra einer Fertigungsalternative hinsichtlich Fertigungszeiten und -kosten fällen zu können, muss zunächst die invertierte Funktion der jeweils ermittelten linearen Regression gebildet werden:

- x: Fertigungszeit bzw. Fertigungskosten aus Regression
- y: zugehöriger Wert der jeweiligen Kennzahl
- m: Steigung des Regressionsmodells
- c: Achsabschnitt des Regressionsmodells
- n: Anzahl der Bauteile
- s: Standardabweichung

$$y_i = m_i \cdot x_i + c_i$$

Gleichung 5-20: Gleichung der linearen Regression

$$x_i = \frac{y_i - c_i}{m_i}$$

Gleichung 5-21: Inversion

Wie bereits erwähnt, zeigen die so ermittelten Zeiten und Kosten je nach Bestimmtheitsmaß der Kennzahl mehr oder weniger starke Abweichungen von den realen Werten. Die Standardabweichung errechnet sich anhand der Gleichung:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Gleichung 5-22: Standardabweichung

$\bar{x}$ : Mittelwert gleich 0, da gute Regressionsmodelle bei ihrer Anwendung eine mittlere Abweichung von 0% ergeben sollten.

Bespielhaft wird nun anhand der Kennzahl STL-Dreiecke die Fertigungszeit prognostiziert. Es ergibt sich nach Rückrechnung auf die Fertigungszeiten der Bauteile eine Standardabweichung von 38,5%. Abbildung 5-25 zeigt die Werte der verbleibenden 13 Bauteile in der Reihenfolge aufsteigender Fertigungszeiten, da 5 Teile bereits für die rein frästechnische Herstellung geeignet sind.

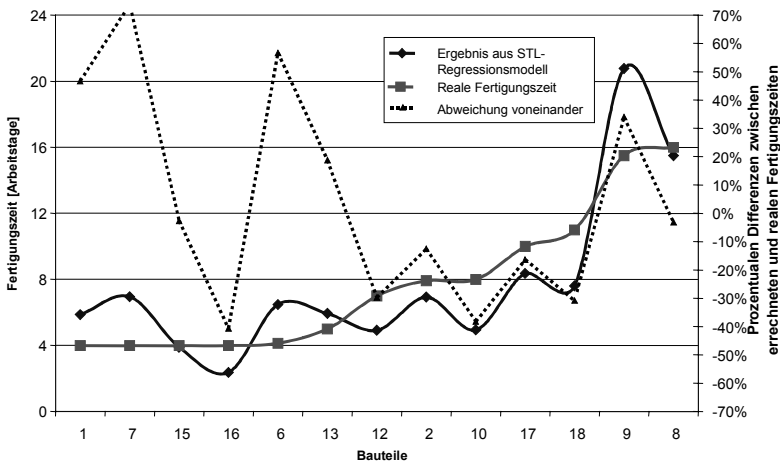


Abbildung 5-25: Vergleich reale und errechnete Fertigungszeiten aus Kennzahl STL-Dreiecke

Da dies bei einzelnen Bauteilen Abweichungen von +60% bzw. –40% entspricht, ist dies für eine genügend genaue Prognose der Fertigungszeiten der Prozesskette HSC-Fräsen – Senkerodieren nicht ausreichend. Analog stellt sich die Situation bei der Errechnung der Fertigungskosten dar.

Um die Genauigkeit der präventiven Zeiten- bzw. Kostenberechnung weiter zu verbessern, werden jeweils die aussagekräftigsten Kennzahlen der Bauteile, D.h. diejenigen mit einem Bestimmtheitsgrad über 70%, zu einem Gesamtparameter durch Mittelwertbildung verdichtet.

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{y_i - c_i}{m_i}}{n} + u \quad \text{Gleichung 5-23: Berechnung der Zeiten-/Kosten}$$

- x: Fertigungszeit bzw. Fertigungskosten
- y: Wert der Kennzahl
- m: zugehörige Steigung des Regressionsmodells
- c: Achsenabschnitt des Regressionsmodells
- u: Additiver Faktor zur Mittelwertanpassung

Für die Fertigungszeiten beispielsweise werden die vier unterschiedlichen Kennzahlen STL-Dreiecke, Anzahl der Elektroden, STL-Dreiecke bzgl. Oberfläche sowie die gewichtete Polierfläche verarbeitet. Dazu werden die Werte der jeweiligen Regressionsmodelle entsprechend Tabelle 5-9 in obige Gleichung eingesetzt:

Kennzahl	Steigung m	Achsenabschnitt c
STL-Dreiecke	999,12	-3,018E+03
Elektrodenanzahl	999,12	-1,519E-01
STL-Dreiecke / Oberfläche	999,12	5,026E-03
Gewichtete Polierfläche	999,12	-3,137E+04
U	0,07	

*Tabelle 5-9: Werte zur Ermittlung der Fertigungszeit*

Im Vergleich der errechneten zu den tatsächlichen Fertigungszeiten der Bauteile ergeben sich nun wesentlich bessere Übereinstimmungen als bei der Auswertung der Regression einer einzelnen Kennzahl.

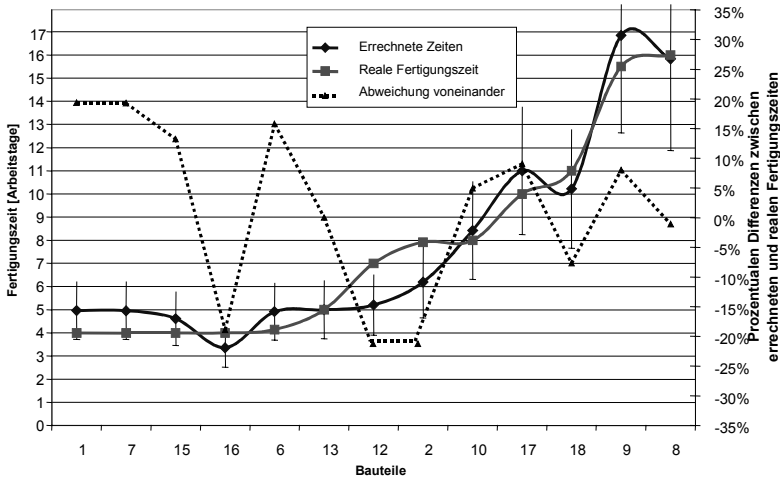


Abbildung 5-26: Vergleich der prognostizierten Fertigungszeiten mit den realen Werten

Wie obige Abbildung zeigt, liegen die Abweichungen bei diesem Vorgehen innerhalb eines Toleranzbereiches von ca.  $\pm 20\%$ .

Diese Methode der Auswertung mehrerer Regressionsmodelle wird entsprechend dem Vorgehen bei den Fertigungszeiten auch bei den Fertigungskosten durchgeführt.

Kennzahl	Steigung m	Achsenabschnitt c
STL-Dreiecke	1,536E+00	1,045E+03
Geschätztes Erodiervolumen	2,949E+01	-1,092E+05
Gewichtete Polierfläche	1,679E+01	-3,209E+04
U	-246,48	

Tabelle 5-10: Werte zur Ermittlung der Fertigungskosten

Die entsprechenden Regressionsmodelle der Kennzahlen STL-Dreiecke, geschätztes Erodiervolumen und gewichtete Polierfläche werden wiederum in Gleichung 5-23 eingesetzt:

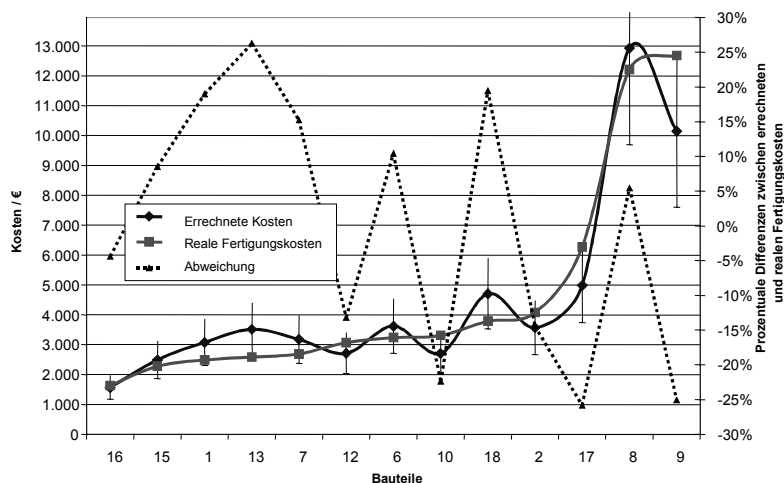


Abbildung 5-27: Vergleich der prognostizierten Fertigungskosten mit den realen Werten

In der zusammengefassten Darstellung der prognostizierten mit den realen Fertigungskosten erzielt man auch hier eine gute Näherung innerhalb eines Toleranzbandes von  $\pm 25\%$ .

### 5.3.3.3 Abschätzung der Ergebnisqualität

Ein generelles Problem bei der Erzeugung von Regressionsmodellen und deren Übertragung auf allgemeine Problemstellungen liegt in der Tatsache begründet, dass u.U. nur die Datenbasis abgebildet wird, auf deren Erzeugung das Regressionsmodell beruht. Eine Übertragung der durch Gleichung 5-23 beschriebenen Prognosemethode auf künftige Bauteile wäre in diesem Fall nicht möglich. Da die Regressionsmodelle im vorliegenden Fall nicht anhand von arithmetisch beschreibbarem Verhalten sondern sowohl aus Messwerten als auch anhand von simulativ und kalkulatativ ermittelten Daten erzeugt wurden, ist eine klassische Berechnung des Gesamtfehlers nicht möglich. Um dennoch die Gültigkeit der Methode nachzuweisen, können Signifikanztests in der F-Verteilung nach „Fisher“ sowie in der t-Verteilung nach „Student“ durchgeführt werden (Charterjee & Price 1995). Bei beiden Methoden wird gegen die Nullhypothese getestet. D.h. man überprüft, ob das Ergebnis auch für den Fall bestehen bleibt, dass der Zusammenhang zwischen errechnetem und gemessenen Wert gleich Null ist. Sofern



einer der Tests Signifikanz erzielt, kann das Ergebnis auf weitere Bauteile übertragen werden.

### F-Verteilung nach Fisher

Der Quotient der F-Verteilung für das erarbeitete Regressionsmodell wird errechnet und mit tabellierten Werten verglichen.

$$F = \frac{\bar{y}^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \cdot \frac{n-p-1}{p} \quad \text{Gleichung 5-24}$$

n: Anzahl der Bauteile

y: reale Fertigungszeit / -kosten

$\bar{y}$ : Mittelwert der Fertigungszeiten / -kosten

$\hat{y}$ : Errechnete Fertigungszeiten / -kosten

p: Anzahl der Kennzahlen

Für die Fertigungszeiten errechnet sich ein Wert von 7,18. Der tabellierte Wert für die Anzahl der Freiheitsgrade 4 beträgt 3,84 (*Charterjee & Price 1995*). Da er kleiner ist, liegt für die Fertigungszeiten Signifikanz und keinesfalls ein zufälliges Trendverhalten vor.

Im Falle der Fertigungskosten kann die Entscheidung auf Basis der F-Verteilung noch nicht gefällt werden, da mit den errechneten F-Verteilungsquotienten von 2,46 der für 3 Freiheitsgrade notwendige Signifikanzwert von 3,94 nicht erreicht wird.

### t-Verteilung nach Student

$$t = \frac{|R| \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R^2}} \quad \text{mit} \quad R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Gleichung 5-25}$$

n: Anzahl der Bauteile

$y_i$ : reale Fertigungszeit / -kosten des Bauteiles i

$\bar{y}$ : Mittelwert der realen Fertigungszeiten/ -kosten

$\hat{y}_i$ : Errechnete Fertigungszeiten /-kosten des Bauteiles i

Bei Betrachtung der Fertigungszeiten übertrifft der errechnete Wert von 13,26 den für die vorliegenden Randbedingungen tabellierten Wert von 1,80.

Auch für die Fertigungskosten kann mit einem errechnetem t-Quotienten von 11,70 der Signifikanzwert von 1,80 übertroffen werden.

Die angestellten Untersuchungen der Signifikanz erlauben also die Aussage, dass die entwickelte Methode dazu geeignet ist, nicht in der Datenbasis abgebildete Bauteilgeometrien hinsichtlich ihres Kosten und Zeitenverhaltens für die Prozesskette HSC-Fräsen – Senkerodieren abzuschätzen.

### 5.3.4 Zusammenfassung der Methode zur Verfahrenszuordnung

Die in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Überlegungen werden nun zu einem vollständigen Ablauf (siehe Abbildung 5-28) für eine industriell durchführbare Entscheidungsunterstützung bzgl. des optimalen Einsatzes von Konturfertigungsverfahren im Rapid Tooling vereinigt.

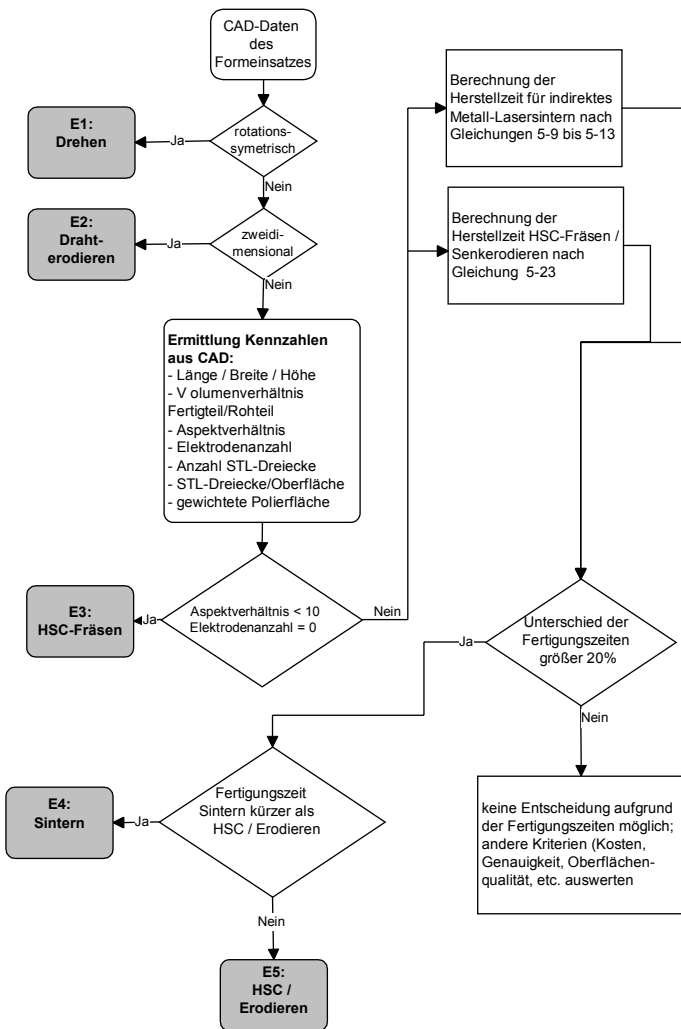


Abbildung 5-28: Ablaufdiagramm des Auswahlverfahrens zur Konturfertigung

Da das Zeitkriterium bei der Anwendung Rapid Tooling eine größere Relevanz besitzt als der Kostenaspekt soll im folgenden nur die Ermittlung einer möglichst kurzen Fertigungszeit eine Rolle spielen. Eigene Untersuchungen zeigten darüber

hinaus, dass die Fertigungskosten im wesentlichen Proportionalität zu den Fertigungszeiten aufweisen. Als Eingangsdaten stehen die 3D-CAD Daten der Formeinsatzgeometrie zur Verfügung. Anhand dieser Daten wird zunächst die Möglichkeit einer rein analytischen Verfahrenszuordnung überprüft. Im einzelnen werden dabei folgende geometrischen Charakteristiken überprüft:

- Bei Vorliegen einer rotationssymmetrischen Geometrie, z.B. bei Kernstiften oder Pinolenschiebern wird die Kontur dem Fertigungsverfahren Drehen zugeordnet (→ E1 in Abbildung 5-28).
- Rein zweidimensionale Konturen, wie sie z.B. durch Segmentierung von Formgeometrien zu Einzeleinsätzen entstehen, können vorteilhaft durch Drahterodieren hergestellt werden (→ E2 in Abbildung 5-28).

Diese Entscheidungen können allein aufgrund des allgemeinen Informationsstandes der Mitarbeiter der Arbeitsvorbereitung über die betroffenen Fertigungsverfahren getroffen werden. Sollte auf analytischen Wege wegen erhöhter Komplexität oder Fehlen einer ausgeprägten Geometriecharakteristik noch keine Entscheidung möglich sein, muss von einer Fertigung der Konturen über die Prozessketten HSC-Fräsen, HSC-Fräsen mit Senkerodieren bzw. indirektes Metall-Lasersintern ausgegangen werden. Dazu werden zunächst die für eine Zeitabschätzung relevanten Kennzahlen aus den CAD-Daten ermittelt.

- Im ersten Schritt werden die Kennzahlen Aspektverhältnis und Elektrodenanzahl überprüft. Dadurch kann festgestellt werden, ob sich die Geometrie für eine Fertigung allein durch HSC-Fräsen eignet. Die Bedingungen die dafür erfüllt sein müssen sind erstens das Vorliegen einer Aspektverhältnisses von maximal 10. Zweitens darf keine Senkelektrode erforderlich sein, um die Zielgeometrie zu erzeugen, d.h. die Elektrodenanzahl muss 0 betragen. Sofern diese beiden Bedingungen erfüllt sind, kann von einer Fertigung durch HSC-Fräsen ausgegangen werden (→ E3 in Abbildung 5-28).

Für eine Abschätzung der Fertigungszeit durch den indirekten Metall-Lasersinterprozess müssen die prinzipiellen Größenverhältnisse des Bauteiles ermittelt werden. Diese sind neben Länge, Breite und Höhe des Formeinsatzes auch das Verhältnis zwischen dem wirklichen Bauteilvolumen und dem theoretischen Maximalvolumen des umschreibbaren Rohteiles. Aus diesen Daten lässt sich anhand der unter Punkt 5.3.3.1 beschriebenen Gleichungen die Fertigungszeit errechnen. Für die Abschätzung der Herstellungszeit über die Prozesskette HSC-Fräsen - Senkerodieren ist die Ermittlung der Kennzahlen STL-Dreiecke,

STL-Dreiecke/Oberfläche, Elektrodenanzahl und gewichtete Oberfläche notwendig. Über diese Daten kann unter Verwendung von Gleichung 5-23 die Zeit für die Herstellung des Bauteiles errechnet werden. Anschließend werden beide Prozesszeiten miteinander verglichen, so dass eine Favorisierung der einen oder anderen Alternative getroffen werden kann ( $\rightarrow$  E4 bzw. E5 in Abbildung 5-28). Wie dargestellt unterliegt die Abschätzung der Erodierzeiten einer Unsicherheit von ca.  $\pm 20\%$ . Sollten sich beide Zeitabschätzungen innerhalb dieses Unsicherheitskorridors bewegen, kann allein aufgrund der Zeitenkalkulation keine Entscheidung getroffen werden. In einem derartigen Fall müssen weitere Anforderungen wie die zu erzielende Maßgenauigkeit, Oberflächenbeschaffenheit, Fertigungskosten oder kapazitive Verfügbarkeit als Entscheidungshilfe berücksichtigt werden.

Die vorgestellte Methode zur Verfahrenszuordnung ist problemlos im industriellen Rahmen durchführbar. Durch die Einbeziehung des Erfahrungswissens der Werker sowie die Verwendung von Ausgangsdaten, die schnell mittels CAD-System ermittelbar sind, ist die Akzeptanz innerhalb der realen Fertigungsumgebung sehr hoch. Allerdings weisen die angeführten Gleichungen zur präventiven Berechnung der Fertigungszeiten für das Lasersintern und Erodieren keine Allgemeingültigkeit auf, da die Grundlage dieser Kalkulationsformeln Daten einer spezifischen Fertigungsumgebung sind. Vor Übertragung der Methode auf eine andere Fertigungsumgebung müssen daher folgende Anpassungen durchgeführt werden:

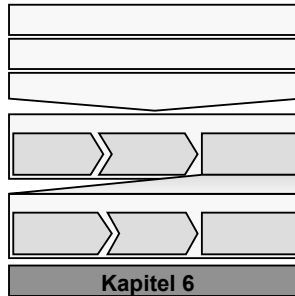
- Angleichung der prozessspezifischen Parameter des Lasersinterprozesses in den Kalkulationsformeln 5-9 bis 5-13.
- Ermittlung neuer Trendgeraden für die zur Kalkulation des Erodierens relevanten Kennzahlen. Dazu müssen erneut für eine ausreichend große Anzahl von Bauteilen (ca. 10 Stück) die zur Herstellung erforderlichen Zeiten ermittelt werden. Anschließend müssen mit diesen Eingangsdaten durch lineare Regression neue Trendgeraden errechnet werden, um die Werte der Gleichung 5-23 auf die neue Fertigungsumgebung anzupassen.

Unter diesen Voraussetzungen kann die erarbeitete Zuordnungsmethode auf andere Fertigungsumgebungen übertragen werden.



## 6 Prototypenwerkzeug für ein Stichsägebauteil

Im diesem Kapitel wird das vorgestellte Konzept Rapid Tooling zur schnellen Herstellung von Prototypen- und Kleinserien-



- ⇒ Ausgangssituation
- ⇒ Konstruktiver Aufbau des Prototypenwerkzeuges
- ⇒ Darstellung der Kontur-elemente
- ⇒ Anwendung der Methode zur Zuordnung der Fertigungsverfahren

werkzeugen sowie die ermittelte Methode zur anforderungsgerechten Zuordnung der Konturfertigungsverfahren beispielhaft validiert. Das vorgestellte Vorgehen für die Abwicklung derartiger Projekte sowie die praktische Anwendbarkeit der erarbeiteten Auswahlmethode wird überprüft. Als Beispielprojekt wird ein realisierter Kundenauftrag des iwB spin-off Unternehmens appex GmbH herangezogen.

### 6.1 Ausgangssituation des Projektes

Als Dienstleister für die Herstellung von Prototypen- und Kleinserienwerkzeugen wurde die Firma appex GmbH von einem Anbieter für Elektrogeräte mit der Fertigung eines Prototypen-Spritzgießwerkzeuges für das Bauteil mit der Bezeichnung „Tisch“ einer neuentwickelten Stichsäge beauftragt. Das Bauteil besitzt größte Abmessungen von 127x77,47x15,5 mm, eine flächige Struktur mit Verrippung und dient als unterer Gehäuseabschluss der Stichsäge. Aufgrund der hohen mechanischen Beanspruchung in diesem Bereich wurde als Serienmaterial der glasfasergefüllte Thermoplast Polyamid 6.6 – 60%GF vorgesehen. Um mechanische Stabilitätsprobleme bei dieser Neukonstruktion auszuschließen sowie um das Verhalten des Werkstoffes mit seinem ungewöhnlich hohen Anteil an Glasfasern im Spritzgussprozess überprüfen zu können, sollte ein Prototypenwerkzeug zur Herstellung von serienidentischen Prototypenteilen hergestellt werden.

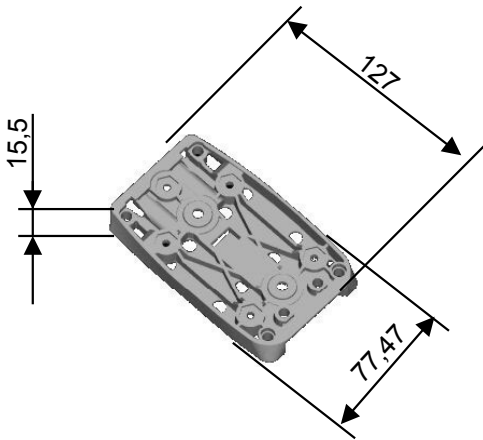


Abbildung 6-1: Beispielbauteil „Tisch“

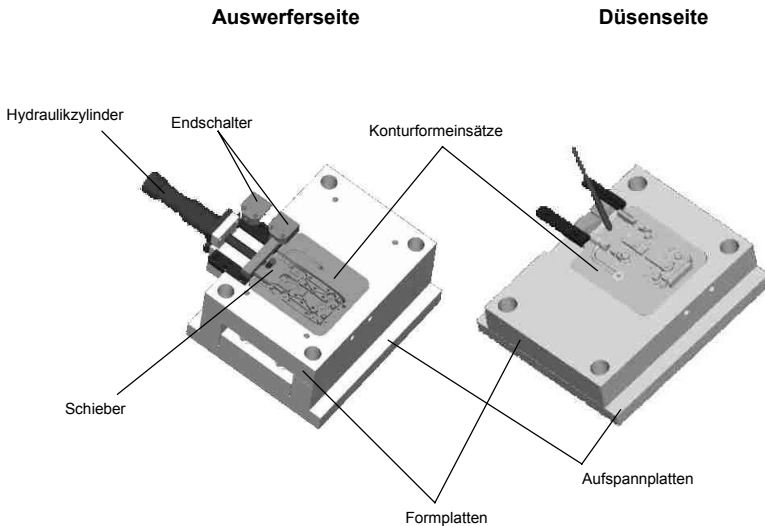
Mit dem zu fertigenden Werkzeug sollten 600 Prototypenteile erzeugt werden, die für mechanische Stabilitätsuntersuchungen, Einbautests sowie zur Analyse der Materialstruktur verwendet werden. Die Genauigkeitsanforderungen an die zu erzeugenden Prototypen entsprachen den Vorgaben der DIN 16901 und sind damit als nicht sehr hoch einzustufen. Da es sich um ein verdecktes Bauteil handelt, wurden hinsichtlich der zu erzielenden Oberflächengüte keinerlei Anforderungen festgelegt. Um möglichst schnell erste Ergebnisse zu erzielen, sollte die Laufzeit für die Herstellung des Prototypenwerkzeuges und der Prototypenteile ab Übergabe der 3D-CAD Daten des Bauteiles einen Zeitraum von 4 Wochen nicht überschreiten.

### 6.2 Konstruktiver Aufbau des Prototypenwerkzeuges

Vereinbarte Ausgangssituation für den Aufbau des Prototypenwerkzeuges war der fertigungsgerecht auskonstruierte 3D-CAD Datensatz des Bauteiles, D.h. für die urformtechnische Herstellung notwendige Entformungsschrägen und Verrundungen waren bereits während der Bauteilentwicklung berücksichtigt worden und im Datensatz integriert. Um nun die Werkzeugkonstruktion durchzuführen, wurden diese Daten über ein geeignetes Schnittstellenformat wie z.B. VDAFS, IGES oder STEP in das CAD-System eingelesen. Anhand dieses Datensatzes



wurden im Anschluss daran die einzelnen Formelemente von der positiven Bauteilgeometrie abgeleitet sowie der notwendige Formrahmen auskonstruiert. Dabei wurde größtenteils auf zukaufbare, katalogisierte Form- und Aufspannplatten zurückgegriffen, die mit geringem Aufwand um notwendige Peripherieelemente erweitert werden müssen.



*Abbildung 6-2: Konstruktiver Aufbau des Prototypenwerkzeuges*

Da im Falle des vorliegenden Bauteiles Geometrielemente in einer weiteren Entformungsrichtung dargestellt werden mussten, war die Konstruktion eines Schiebers notwendig. Die Anzahl der Konturelement beträgt daher drei.

Durch konsequente Nutzung eines CAx-Systems stehen die während der Konstruktion erzeugten Daten allen folgenden Bereichen der Arbeitsvorbereitung sofort zur Verfügung und verkürzen die weiteren Abläufe erheblich. Zusätzlich kann dem Auftraggeber bei Veränderung der Bauteilgeometrie aufgrund fertigungstechnischer Erfordernisse ein aktueller Datensatz zurückgeliefert werden, um diese Änderung ggf. auf ihre produktspezifischen Auswirkungen hin zu überprüfen.

### 6.3 Separation der Formelemente und Zuordnung zu Fertigungsverfahren

Wie bereits im vorangegangenen Punkt 6.2 beschrieben, erforderte die Geometrie des Bauteiles „Tisch“ eine Aufteilung in drei Konturelemente. Dies sind der auswerferseitige und der düsenseitige Formeinsatz sowie ein Schieber.

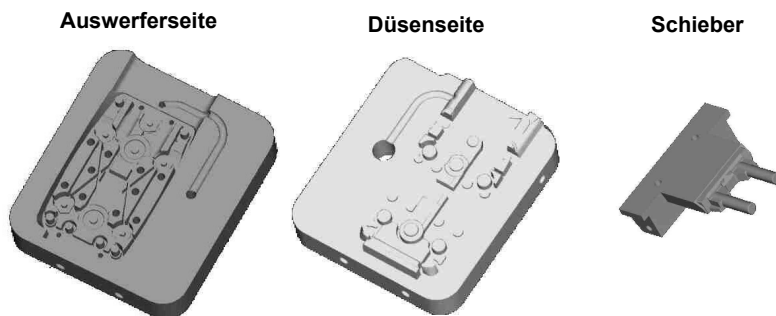


Abbildung 6-3: Formeinsätze und Schieber

Die Anforderungen hinsichtlich Stückzahl, Oberflächenqualität und Maßgenauigkeit sind für alle anhand der Vorauswahl ermittelten Fertigungsverfahren unkritisch. Für eine möglichst schnelle, kostengünstige Herstellung wurden diese drei unterschiedlichen Konturelemente anhand der unter Punkt 5.3 entwickelten Methode den potentiellen Fertigungsverfahren zugeordnet.

#### Schieber

Bei genauer Analyse der vorliegenden Gegebenheiten zeigt das Konturelement Schieber folgende Eigenschaften: Die Abmaße liegen bei 94,15 mm x 87,97 mm x 25,81 mm. Der Konturbereich umfasst dabei jedoch nur eine Höhe von 10,81 mm. Die Geometriecharakteristik ist durch rechtwinklige Außenecken, das fehlen von Verrippungen sowie einer insgesamt flächigen Geometrie gekennzeichnet.

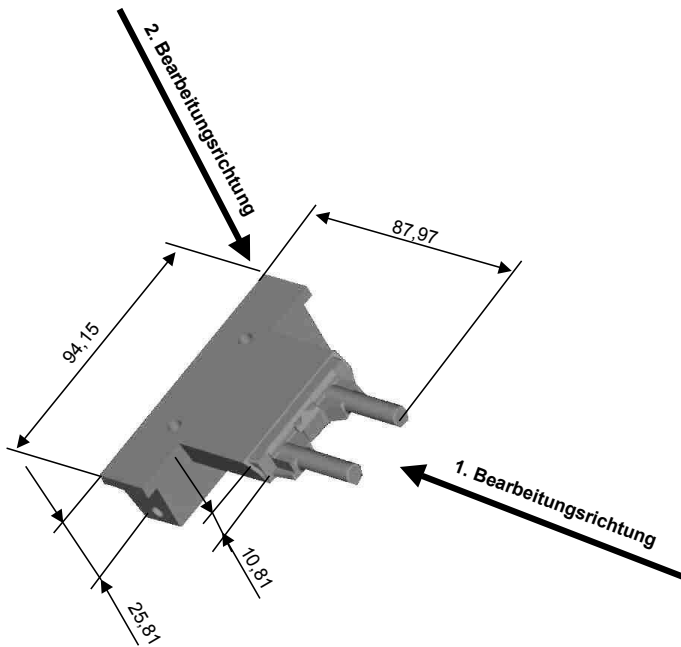


Abbildung 6-4: Schieber und geeignete Bearbeitung

Die geometrischen Verhältnisse des Schiebers sind einfach. Es finden sich keine für die frästechnische Herstellung ungeeigneten Bereiche. Einzig die rotatorische Geometrie der beiden gabelförmigen Kernpinolen erfordert eine Bearbeitung der Kontur in zwei unterschiedlichen Aufspannlagen. Da Fräsen das produktivste der möglichen Konturfertigungsverfahren ist, wird allein aus der analytischen Betrachtung der geometrischen Verhältnisse heraus diese Technologie ausgewählt. Da jedoch zusätzlich die Ausformschrägen der Konturelemente durch zeilenweises Bearbeiten erzeugt werden müssen, wird die Verfahrensvariante Hochgeschwindigkeitsfräsen bevorzugt.

### Formeinsatz Düsenseite

Der düsenseitige Formeinsatz hat eine prinzipielle Größe von 170 mm x 150 mm x 36,18 mm. Auch hier liegt eine flächige Geometrie vor. An den 4 markierten Stellen liegen die für die frästechnische Bearbeitung begrenzenden Rippenbereiche vor. Da hier jedoch bei einer Tiefe von 13 mm im Grund eine Nutbreite von 1,72 mm vorliegt wird das für die Fräsbearbeitung kritische Aspektverhältnis von 10 nicht überschritten. Gleichzeitig gibt es keinen Bereich, der die Herstellung von Erosionselektroden notwendig macht.

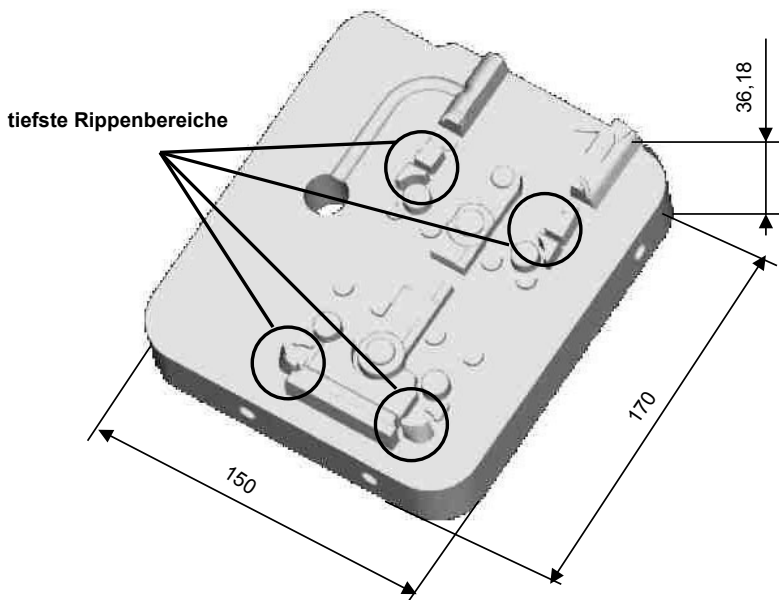


Abbildung 6-5: Düsenseitiger Formeinsatz

Daher kann auch für den düsenseitigen eine Entscheidung zugunsten des Konturfertigungsverfahrens HSC-Fräsen gefällt werden.

### Formeinsatz Auswerferseite

Der Formeinsatz für die Auswerferseite des Bauteiles Tisch besitzt eine Größe von 170 mm x 150 mm x 30 mm. Seine Kontur ist deutlich komplexer als die der bereits dargestellten Konturelemente.

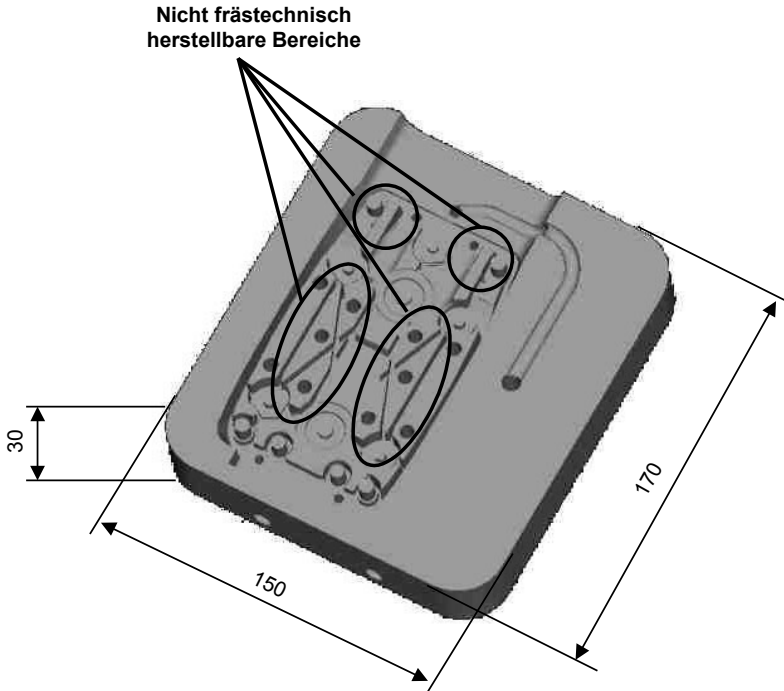


Abbildung 6-6: Auswerferseitiger Formeinsatz

Da das Bauteil zudem keine deutliche geometrische Ausprägung besitzt, die eine analytische Zuordnung zu Fertigungsverfahren ermöglicht, muss aus den Alternativen HSC-Fräsen, HSC-Fräsen-Erodieren, bzw. indirektes Metall-Lasersintern das optimale Konturfertigungsverfahren hinsichtlich des Kriteriums Zeit anhand der im Kapitel 5.3.3 beschriebenen Kennzahlenmethode ermittelt werden.

Folgende Parameter des Formeinsatzes, die zu einer Anwendung der kennzahlenbasierten Auswahlmethode notwendig sind, werden anhand des CAD-Datenmodelles ermittelt: Die Anzahl der für die Herstellung des Formeinsatzes notwendigen Elektroden wird abgeschätzt.

1	Länge	150 mm
2	Breite	170 mm
3	Höhe	30 mm
4	Rohteilvolumen	765.000 mm <sup>3</sup>
5	Reales Volumen	652.532 mm <sup>3</sup>
7	Volumenanteil	85,3%
6	Oberfläche	101.033 mm <sup>2</sup>
7	Polierfläche	46.854 mm <sup>2</sup>
8	Elektrodenanzahl	8
9	Anzahl der STL- Dreiecke	9324
10	STL- Dreiecke/Oberfläche	10,836 / mm <sup>2</sup>
11	Aspektverhältnis	15,32

Durch Betrachtung der Kennzahlen Elektrodenanzahl und Aspektverhältnis wird deutlich, dass eine rein frästechnische Herstellung nicht möglich ist.

### Kalkulation des indirekten Metall-Lasersinterns

Anhand der Gleichungen 5-9 bis 5-13 ergibt sich unter Verwendung der o.a. Werte des betrachteten Bauteiles eine Herstellzeit  $t_{\text{bauteil}}$  von 14,3 Stunden. Zusätzlich der sonstigen pauschal zusammenfassbaren Zeiten wie z.B. für Datenaufbereitung, Rüstzeiten und Ofenprozess ergibt sich damit eine Herstellzeit von 52,8 Stunden.

### Kalkulation der Prozesskette Fräsen - Erodieren

Durch Einsetzen der ermittelten Bauteilkennzahlen in die Gleichung 5-23 unter Berücksichtigung der erarbeiteten Daten der linearen Regressionen nach Tabelle 5-9 ergibt sich für die Prozesskette eine Fertigungszeit von 22,7 Stunden. Da die selbe Fertigungsumgebung zum Einsatz kommt, innerhalb der die Zuordnungsmethode entwickelt wurde, können die Parameter der Regression ohne Anpassung übernommen werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Verfahrenskette HSC-Fräsen-Erodieren gegenüber dem indirekten Metall-Lasersintern in diesem Beispiel deutlich im Vorteil ist. Es gibt bei den ermittelten Ergebnissen keine Über-

schneidung bezüglich des Unschärfekorridors von 20%. Dementsprechend fällt nach Anwendung der erarbeiteten Auswahlmethode die Entscheidung zugunsten der Prozesskette HSC-Fräsen-Erodieren aus.

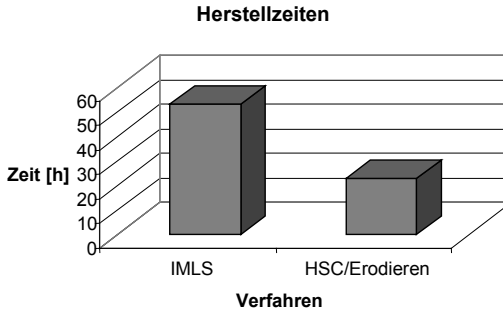


Abbildung 6-7: Übersicht Herstellzeiten der Verfahrensalternativen für Auswerferseite

## 6.4 Realisierte Herstellung des Prototypenwerkzeuges

Projektplan Prototypenwerkzeug "Tisch"																				
Tätigkeit	Woche 1				Woche 2				Woche 3				Woche 4							
3D-CAD Konstruktion: Ableiten der Formeinsätze																				
3D-CAD Konstruktion: Aufbau des Formrahmens																				
3D-CAD Konstruktion: Ableiten der Elektroden																				
Materialdisposition																				
AV: CAM-Programmierung Formeinsätze																				
AV: CAM-Programmierung Elektroden																				
AV: Erstellung der Werkstattzeichnungen																				
Materialvorbereitung Formeinsätze																				
HSC-Fräsen der Formeinsätze																				
HSC-Fräsen der Graphitelektroden																				
Fräsen der Formrahmentteile																				
Erodieren des Formeinsatzes Auswerferseite																				
Montage des Werkzeuges																				
Bemusterung des Werkzeuges																				

Abbildung 6-8: Projektplan zur Herstellung des Prototypenwerkzeuges Tisch

Um den für die Realisierung dieses Projektes anvisierten Zeitlauf von 4 Wochen zu ermöglichen, ist neben dem Einsatz des jeweils optimalen Konturfertigungsverfahrens auch die Anwendung der weiteren Elemente der Strategie Rapid Tooling zwingend notwendig. Wie unter Abschnitt 4.3 dargestellt ist dafür die An-

wendung unterschiedlicher Methoden sowohl auf organisatorischer als auch auf technischer Ebene notwendig. Die Zuordnung der geeigneten Prozesskette zu dem jeweiligen Konturelement wurde im vorangegangenen Gliederungspunkt durchgeführt. Bezüglich der organisatorischen Abwicklung des Projektes unter Anwendung der Strategie Rapid Tooling sind folgende Bemerkungen zu machen:

Abbildung 6-8 auf Seite 129 zeigt den zugrundeliegenden Zeitplan für die Durchführung des Projektes. Die Inhalte der einzelnen Arbeitsschritte entsprechen dabei den unter Gliederungspunkt 2.2 dargestellten Tätigkeiten. Anders als bei Vorgehen des konventionellen Werkzeug- und Formenbaus wird dabei jedoch auf eine starke Parallelisierung und Verzahnung der Arbeiten Wert gelegt. Beispielsweise wird aufgrund der Lieferfristen für Zukaufteile eine Materialdisposition bereits auf Basis eines ersten Konzeptes der Werkzeuggröße noch vor der Auskonstruktion aller Einzelteile durchgeführt. Der so erzielte Zeitgewinn hinsichtlich des Fertigungsbeginns rechtfertigt die Gefahr von Fehleinkäufen. Darüber hinaus können die verwendeten Standardnormalienteile i.a. zurückgegeben werden. Auch die Erstellung der Fertigungsunterlagen wie NC-Programme und technischer Zeichnungen erfolgt in ständiger Kommunikation mit der Fertigung unmittelbar vor der realen Umsetzung der Arbeitsschritte. So wird beispielsweise bereits mit der Frästechnischer Herstellung erster Graphitelektroden begonnen, obwohl noch nicht die NC-Programme aller Elektroden vollständig programmiert sind. Dieser integrative Ansatz wird durch die Verwendung durchgängiger CAX-Systeme ermöglicht.

Weiterhin ist darauf zu achten, dass soweit es der Automatisierungsgrad der technologischen Prozesse ermöglicht, auch Nachtschichten und Wochenenden durch mannlosen Betrieb als Fertigungszeiten erschlossen werden. Im vorliegenden Beispiel betrifft dies insbesondere die zeitintensive Schlichtbearbeitung der Formeinsätze mittels HSC-Fräsen sowie das Erodieren. Diese Prozesse finden Vorwiegend nachts oder am Wochenende statt. Das HSC-Fräsen der Graphitelektroden die regelgeometrische Bearbeitung der Formrahmentteile sowie die Montage des Werkzeuges, können nicht über eine längere Zeit ohne Bediener-eingriffe durchgeführt werden, so dass diese Arbeitsschritte tagsüber durchgeführt werden müssen.

Unter Anwendung der o.a. Aspekte der Strategie Rapid Tooling konnte das Prototypenwerkzeug des Bauteiles „Tisch“ 24 Tage nach Empfang der CAD-Daten fertiggestellt werden und zur Bemusterung auf eine Spritzgiessmaschine montiert



werden. Dabei wurde die geforderte Prototypenserie von 600 Bauteilen bei einer Zykluszeit von 40 Sekunden erzeugt.

## 6.5 Exemplarische Kosten-Nutzen Betrachtung

Derzeit wird, wie bereits unter Punkt 5.1.3.4 dargestellt, eine numerisch exakte Festlegung der Kostenwerte der Konturfertigungsverfahren durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren erschwert und verzerrt. Daher soll der wirtschaftliche Nutzen der erarbeiteten Auswahlmethode im folgenden anhand der Eckdaten der untersuchten Beispielbauteile sowie unter Zugrundelegung der Struktur eines typischen Dienstleisters dargestellt werden.

Die Analyse der Summe aller Kostenwerte der Beispielbauteile aus Abbildung 5-22 ergibt nach Gruppierung der Entscheidungsmöglichkeiten folgendes Bild:

Art des Kostenwertes	absolut	normiert
$\Sigma$ der Kostenwerte falls jeweils die ungünstigste Auswahl des Fertigungsverfahrens erfolgt	106.300 €	212 %
$\Sigma$ der Kostenwerte falls jeweils das Fertigungsverfahren Metall-Lasersintern gewählt wird	87.100 €	174 %
$\Sigma$ der Kostenwerte falls jeweils das Fertigungsverfahren HSC-Fräsen bzw. HSC-Fräsen/Erodieren gewählt wird	64.200 €	128 %
$\Sigma$ der Kostenwerte falls jeweils die optimale Auswahl des Fertigungsverfahrens erfolgt	50.200 €	100 %

*Tabelle 6-1: Vergleich der aufsummierten Kostenwerte*

Der Fall einer jeweils optimalen Auswahl des Konturfertigungsverfahrens wird durch die Anwendung der erarbeiteten Methode sichergestellt. Dieser Fall wurde daher als Vergleichsgröße normiert. Anhand obiger Tabelle ist deutlich zu sehen, dass eine Zuordnung der Fertigungsverfahren beispielsweise allein anhand der vorhandenen Kapazitäten bereits zu einem deutlichem Anstieg der Fertigungskosten führt. Wird z.B. immer die Prozesskette HSC-Fräsen/Erodieren eingesetzt, muss mit einer Kostensteigerung um 28% gerechnet werden.

Demgegenüber steht der Aufwand für die Anwendung der Methode, der im wesentlichen aus der Ermittlung der Kennzahlen sowie der Berechnung der erarbeiteten Formeln besteht. Überschlägig lässt sich der notwendige Aufwand für ein Projekt mit einer Ingenieurstunde inklusive CAD-Arbeitsplatz abschätzen. Der Kostenwert für den Einsatz der Methode liegt also bei ca. 65 € pro Formelement und ist verglichen mit den Fertigungskosten von durchschnittlich 2800 € pro Formelement zu vernachlässigen.

Um den betriebswirtschaftlichen Nutzen der Methode darzustellen, soll das Einsparpotential für einen Dienstleistungsbetrieb in der Prototypenbranche abgeschätzt werden. Typische Umsatzdaten für die vorzugsweise kleinen Unternehmen liegen bei ca. 1,5 Mio. € pro Jahr. Dabei entfallen wie bereits in Abbildung 1-2 zu sehen ca. 30% auf die Fertigung der Konturelemente. Dies entspricht einem absoluten Betrag von jährlich 450.000 €. Beschränkt sich der Anbieter lediglich auf eine mögliche Prozesskette so fallen deutlich höhere Kosten an, um den gleichen Projektrahmen abzuwickeln. Wählt der Anbieter beispielweise aus Kapazitätsgründen stets die Prozesskette HSC-Fräsen/Erodieren steigen die Kosten für die Konturfertigung auf 576.000 €, bei der dauernden Auswahl des Metall-Lasersinterns sogar auf 783.000 €. Regelrecht existenzgefährdend wirkt sich eine rein intuitive Auswahl des Konturfertigungsverfahrens aus. Im ungünstigsten Fall einer konsequent falschen Auswahl des Fertigungsverfahrens steigen die Kosten auf 945.000 €.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund vielschichtiger Veränderungen ihres Umfeldes können Unternehmen ihre Zukunft nur durch die Bereitschaft zu Flexibilität und Reaktionsfähigkeit erfolgreich gestalten. Ein entscheidender Aspekt der Wandlungsfähigkeit besteht darin, Innovationen in den angebotenen Produkten zu vermarkten. Dadurch fällt der dynamischen Produktentwicklung eine Schlüsselrolle für den Erfolg der Unternehmen zu. Diese Entwicklung wird dabei durch den Trend zur Funktionsvereinigung mittels hochintegraler Bauteile getragen, die über urformtechnische Fertigungsverfahren hergestellt werden. Da sowohl die funktionspezifischen Eigenschaften als auch die serientechnische Herstellung dieser komplexen Integralbauteile nicht mehr analytisch validiert werden können, müssen zur Absicherung der Eigenschaften unterschiedliche Methoden eingesetzt werden. Dabei spielt neben organisatorischen Maßnahmen und DV-unterstützten Simulationsverfahren besonders die schnelle Herstellung von prototypischen Betriebsmitteln eine entscheidende Rolle, da unter ihrer Anwendung sowohl eine große Anzahl serienidentischer Prototypenteile erzeugt, als auch das genaue Prozessverhalten der späteren Serienproduktion ermittelt wird.

Die schnelle Herstellung von Prototypenwerkzeugen erfordert allerdings die Koordination einer Vielzahl an Arbeitsinhalten sowie ein spezielles technologisches Know-how. Diese Voraussetzungen sind beim Werkzeug- und Formenbau nur unvollständig vorhanden. Daher ist ein komplexes, in dieser Arbeit konzipiertes Vorgehensmodell notwendig, das den Unternehmen dieser Branche die Möglichkeit eröffnet, sich als Partner der Produktentwicklung zu etablieren. Diese Strategie einer entwicklungsbegleitenden Fertigung von Prototypen- und Kleinserienwerkzeugen wird als Rapid Tooling bezeichnet. Die Strategie Rapid Tooling ist dabei für den industriellen Einsatz vorgesehen. Sie integriert unterschiedliche Einzelmethoden aus den Bereichen Organisation, Konstruktion und Fertigung, die für die Herstellung von Prototypen- und Kleinserienwerkzeugen eine Rolle spielen und bietet Hilfestellung bei der anforderungsgerechten Auswahl der technologischen Prozesse. Kernelement ist dabei die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte kennzahlenbasierte Methode zur Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl des Konturfertigungsverfahrens. Diese Auswahlmethode objektiviert die Eigenschaften der verschiedenen technologischen Konturfertigungsverfahren und erleichtert so dem Anwender aus der Vielzahl der potentiellen Verfahren das für den jeweiligen Anwendungsfall geeignete auszuwählen. Dabei ist die Methode sehr stark an der industriellen Praxis ausgerichtet, so dass nur einfach ermit-

telbare Kennzahlen der Bauteile ausgewertet werden. Gleichzeitig ist die Methode offen gestaltet, um sie sowohl auf die jeweilige Fertigungsumgebung des Anwenders adaptieren, als auch um neue Eigenschaften der Fertigungsprozesse ergänzen zu können.

Die Einsatzfähigkeit der Strategie Rapid Tooling wurde anhand eines Praxisbeispiels aus dem Bereich des Kunststoffspritzguss gezeigt. Durch ihren Einsatz konnte ein Prototypenwerkzeug innerhalb von nur 4 Wochen hergestellt werden, dessen Produktionszeit von mehreren alternativen Anbietern mit einem Zeitraum, von 12 Wochen abgeschätzt wurde. Durch dieses Vorgehen standen 600 Prototypenteile für die Validierung der Konstruktion sowie Erkenntnisse über den anvisierten Produktionsprozess deutlich früher zur Verfügung. Der durch Vorverlagerung der Erkenntnisse gewonnene Zeitvorteil wiegt nach Aussage des Projektpartners die reinen Kosten für das Prototypenwerkzeug in Höhe von ca. 35.000,- DM bei weitem auf.

Die praktische Umsetzung des Vorgehensmodelles Rapid Tooling wird darüber hinaus von der appex GmbH, einem der ersten Spezialanbieter für die schnelle Herstellung entwicklungsbegleitender Spritz- und Druckgießwerkzeuge durchgeführt. Wesentlicher Bestandteil des Geschäftsmodelles dieses 1998 gegründeten Unternehmens sind Elemente der in dieser Arbeit entwickelten Strategie. Der Businessplan wurde beim Münchener Businessplan Wettbewerb 1997/1998 eingereicht und erzielte in allen drei Stufen eine Prämierung (*tu-muenchen 1998*).

Das in dieser Arbeit entwickelte Vorgehensmodell erlaubt es insbesondere Unternehmen des Werkzeug- und Formenbaus schnell Prototypenwerkzeuge herzustellen und sich so als Partner der Produktentwicklung zu qualifizieren. Die aufgrund der Konsumentenindividualität für die Zukunft prognostizierten weiteren Reduzierungen der Bauteilstückzahlen eröffnen weitere Einsatzgebiete. Durch weitere Entwicklungsfortschritte auf Seiten der Fertigungsverfahren sind Qualitäts- und Stückzahlsteigerungen zu erwarten, die den Einsatz der ursprünglich prototypischen Betriebsmittel für die Produktion der eigentlichen Serie qualifizieren. Damit wird sich mittelfristig der Übergang des Rapid Tooling zum Rapid Manufacturing ergeben.

## 8 Literaturverzeichnis

### *3D-Systems 1998*

3D-Systems Corporation (Hrsg.): the edge. Valencia (CA) 1998.

### *Almond 1996*

Almond, H.: Investment Casting Tooling Project. European Action on Rapid Prototyping (EARP), No. 9/96, Danish Technological Institute, Aarhus, 1996.

### *Bernard & Stetter 1997*

Bernard, R.; Stetter, R.: Early Determination of Product Properties. In: Riitahuhta, A.: Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design in Tampere. Tampere: University of Technology, 1997.

### *Birmingham & Marcus 1995*

Birmingham, B. R.; Marcus, H. L.: Solid Freeform Fabrication of Silicon Nitride Shapes by Selective Laser Reaction Sintering (SLRS). In: Solid Freeform Fabrication Proceedings, The University of Texas at Austin, 1995, S. 389 - 396.

### *Birzer 1990*

Birzer, F.: Synergien und Wettbewerb beim erosiven Senken und Schneiden. Werkstatt und Betrieb 123 (1990) 7, S. 539-549.

### *Boar 1984*

Boar B.: Application Prototyping. New York: John Wiley & Sons 1984.

### *Brandner & Rudorfer 1999*

Brandner, S.; Rudorfer, W.: RP und RT über das Internet. In: Kunststoffberater 44 (1999) 11, S. 16 – 17.

### *Breiting & Knosala 1997*

Breiting, A.; Knosala, R.: Bewerten technischer Systeme. Berlin: Springer 1997.

### *Breitinger 1996*

Breitinger, F.: Schneller zu Werkzeugen für funktionale Prototypen. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Rapid Prototyping, Rapid Tooling – Schnell zu funktionalen Prototypen, Augsburg. München: Utz 1996, S. 57-68. (Seminarberichte /iwb 21).

### *Breitinger & Lorenzen 1997*

Breitinger, F.; Lorenzen, J.: Rapid Tooling – Ein neuer Ansatz zur integrierten Produkt- und Prozessentwicklung. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Rapid Tooling – Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt, Augsburg. München: Utz 1997, S. 2-19. (Seminarberichte /iwb 28).

### *Breitinger & Pieverling 1997A*

Breitinger, F.; v. Pieverling, J.: Schnelle Modelle. In: Maschinenmarkt, (1997) Nr.46, S. 106-108.

### *Breitinger & Pieverling 1997B*

Breitinger, F.; v. Pieverling, J.: Der schnelle Weg zum Gießwerkzeug. Die neue Fabrik – Modellfabrik als Denkmodell (1997), S. 96-98.

### *Breitinger & Pieverling. 1999*

Breitinger, F.; v. Pieverling, J.: Die industrielle Anwendung der Strategie Rapid Tooling. In: Tagungsband zum 3D Erfahrungsforum Werkzeug- und Formenbau, 25./26. Februar, Dortmund 1999, S. 219-228.

### *Brunotte 1992*

Brunotte, D.: Fünf-Achs-Fräsen im Modell- und Werkzeugbau. Werkstatt und Betrieb 125 (1992) 1, S. 15-18.

### *Camacho 1991*

Camacho, J.: Frästechnologie für Funktionsflächen im Formenbau. Hannover: VDI-Verlag 1991 (Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2: Fertigungstechnik, Nr.: 226).

### *Chatterjee & Price 1995*

Chatterjee, S.; Price, B.: Praxis der Regressionsanalyse. München: Oldenbourg 1995.

*Clark & Fujimoto 1992*

Clark, K.; Fujimoto, T.: Automobilentwicklung mit System. Frankfurt a. M., 1992.

*Connell 1989*

Connell J. L., Shafer L. B.: Structured Rapid Prototyping. Prentice Hall: Yourdon Press 1989.

*Colton u.a. 2001*

Colton, J.; Crawford, J.; Pham, G.; Rodet, V.; Wang, K.: Failure of rapid prototype molds during injection molding. In: CIRP Annals Vol. 50/1. Heidelberg: Springer 2001.

*Cooper u.a. 1998*

Cooper, A.; Kang, S.; u.a.: Automated Fabrication of Complex Molded Parts Using Mold SDM, In: 1998 Solid Freeform Fabrication Proceedings, The University of Texas At Austin, 1998.

*Delphi 1998*

Delphi '98 - Studie zur globalen Entwicklung von Wissenschaft und Technik. Karlsruhe. Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, 1998.

*Dickens 1996*

Dickens, P.: Rapid Tooling: A Review of the Alternatives. In: Time-Compression Technologies '96 Conference, Tagungsband, 2.-5.9.1996, The Heritage Motor Centre, Gaydon (GB), 1996.

*Dietz & Frank 1989*

Dietz, C.; Frank, K.: CAD/CAM im Werkzeug-, Formen-, und Modellbau. Zwf 84 (1989) 7, S. 397-406.

*DIN 1688-4*

DIN 1688-4: Gussrohnteile aus Leichtmetalllegierungen; Druckguss; Allgemeintoleranzen, Bearbeitungszugaben. Berlin: Beuth 1986.

*DIN 16750*

DIN 16750: Press-, Spritzgieß-, und Druckgießwerkzeuge. Berlin: Beuth 1991.

### *DIN 8580*

DIN 8580: Fertigungsverfahren; Einteilung. Berlin: Beuth 1974.

### *DIN 8589*

DIN 8589, Teil 3: Fertigungsverfahren Spanen – Fräsen - Einordnung Unterteilung, Begriffe, Berlin: Beuth 1982.

### *DIN 16901*

DIN 16901: Kunststoff-Formteile; Toleranzen und Abnahmebedingungen für Längenmaße. Berlin: Beuth 1981.

### *DIN 19226*

DIN 19926, Teil 1: Regelungstechnik und Steuerungstechnik: Allgemeine Grundlagen. Berlin: Beuth 1994.

### *DIN ISO 8062*

DIN ISO 8062, Maßtoleranzen und Bearbeitungszugaben für Neukonstruktionen. Berlin: Beuth 1998.

### *Duden 1989*

Duden: Fremdwörterbuch. 14. Auflage. Mannheim: Bibliografisches Institut 1989.

### *Dunlop 1995*

Dunlop, G.: Rapid Tooling mit Methoden des Metallspritzens. In: I-SATA, 28th International Symposium on Automotive Technologies and Automation, Rapid Prototyping in the Automotive Industries, Stuttgart. 1995, S. 429-438.

### *Dusel u.a. 1997*

Dusel, K.-H., u.a.: Rapid Prototyping für Feingussprototypen – Generative Fertigungsverfahren liefern verlorene Modelle. In: Konstruieren und gießen 22 (1997) 2, S. 4-11.

### *Dusel & Eyrer 1996*

Dusel, K.-H.; Eyrer, P.: Materialien für Rapid Tooling Technologien. In: Produkt- und Prozessentwicklung mit neuen Technologien, Intelligente Produktionssysteme - Solid Freeform Manufacturing, 4. Anwendertagung. Dresden 1996, S 246-256.



*Dutta & Shiptalni 2000*

Dutta, D.; Shiptalni, M.: Heterogeneous solid modeling for layered manufacturing. In: CIRP Annals Vol. 49/1. Heidelberg: Springer 2000.

*EOS 2000*

EOS GmbH (Hrsg.): For Rapid Success. Planegg: 2000.

*Eversheim & Klocke 1998*

Eversheim, W.; Klocke, F.: Werkzeugbau mit Zukunft. Heidelberg: Springer 1998.

*Eversheim & Pollack 1994*

Eversheim, W.; Pollack, A.: NC-Programmierung für die 5-Achsen-Bearbeitung. Wt-Produktion und Management 84 (1994), S.159-162.

*Eversheim u.a. 1989*

Eversheim, W.; Schütt, J.; u.a.: Fünfachsiges Simultanfräsen von Freiformflächen. VDI-Z 131 (1989) 2, S. 14-17.

*Eversheim u.a. 1996*

Eversheim, W.; u.a.: Rapid Prototyping – unternehmensspezifische Technologiekonzepte. In: Rapid Product Development, Stuttgart: Stuttgarter Messe- und Kongressgesellschaft mbH 1996, S. 423-431.

*Extrude Hone 2000*

Extrude Hone Corporation (Hrsg.): Prometal Rapid Tooling System. Irwin (PA): 2000.

*Fährer 1999*

Fährer J.: Anwendung von generativen Verfahren im Rapid Tooling. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Rapid Manufacturing – Methoden für die reaktionsfähige Produktion, Augsburg. München: Utz 1999, S. 5/1-5/18. (Seminarberichte /iwb 50).

*Feurer 1983*

Feurer, M.: Elektroerosive Metallbearbeitung. Würzburg: Vogel 1983.

### *Friedhoff & Enselmann 1998*

Friedhoff, J.; Enselmann, A.: Angepasster Vorschub. In: Form und Werkzeug (1998) 2, S. 50-53.

### *Gebhardt 1996*

Gebhardt, A.: Rapid Prototyping, Werkzeuge für die schnelle Produktentwicklung. München: Hanser 1996.

### *Geuer 1996*

Geuer, A.: Einsatzpotentiale des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung. Berlin: Springer 1996 (iwb Forschungsberichte 100).

### *Geiger 1997*

Geiger, M.; Coremans, A.: Lasergestütztes Rapid Tooling - Vorseerienwerkzeuge zur Herstellung funktionsfähiger Bauteile mit Endprodukteigenschaften. In: Schmoeckel, D. (Hrsg.): Wege kennen - Potentiale nutzen. 6. Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt. 11.-12.03.97, S. 175-193.

### *Ghandforoush 1988*

Ghandforoush, P.: A multi-criteria decision model for the selection of a computerized manufacturing system. In: International Journal of Production Design, 23 (1988) 1.

### *Gornet 1997*

Gornet, T.: LNC7000 Inserts for Tooling. In: 1997 SLS Users Group Meeting, Albuquerque Double Tree Hotel, 5.-8.10.1997.

### *Greenwood & Grimm 1995*

Greenwood, D.; Grimm, T.: Composite Tooling from Stereolithography Patterns for Injection Molding. In: Rapid Prototyping and Manufacturing '95, Hyatt Regency, Dearborn, 2.-4.5.1995.

### *Griffith u.a. 1996*

Griffith, M. L.; Keicher, D.: Free Form Fabrication of Metallic Components using Laser Engineered Net Shaping (LENS™). In: Solid Freeform Fabrication Proceedings, The University of Texas at Austin, 1996, S. 125 - 131.

*Grote u.a. 2000*

Grote, K.-H.; Ambos, E.; Beyer, C.; Birke, C.; Schumann, S.: Rapid Prototyping and Three-Dimensional Digitizing as Engineering Design Tools. In: The Fourth & Fifth World Conference on Integrated Design and Process Technology IDPT. Dallas, June 2000.

*Hagen 1998*

v. d. Hagen, F.: Physische und virtuelle Prototypen in der Produktentwicklung. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Rapid Prototyping – Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung, Augsburg. München: Utz 1998, S. 1-1 – 1-23. (Seminarberichte /iwb 38).

*Heller 1998*

Heller, B.: Einbindung der Stereolithografie in die Produktentwicklung. In: Rapid Prototyping, Innovationen für den Modell-, Werkzeug- und Formenbau. VDI-Fachtagung Aachen. 2.-3.03.1998. Vortrag Nr.: 8.

*Herzwurm 1999*

Herzwurm, G.; Schokert, S.: Virtual Product Development. In: Proceedings of the Fifth International Symposium on Quality Function Deployment and the First Brazilian Conference on Management of Product Development, August 24-26, 1999, Brazil, Belo Horizonte 1999, S. 83-91.

*Hock 1996*

Hock, S.: Hochgeschwindigkeitsfräsen im Werkzeug- und Großformenbau. Aachen: Shaker 1996.

*Hock & Janovsky 1992*

Hock, S.; Janovsky, D.: Freiformflächen im Werkzeug und Formenbau bearbeiten. In: Werkstatt und Betrieb 125 (1992) 8, S. 597-606.

*Hoffmann 2000*

Hoffmann, H.; u.a.: Ohne Wandel schwimmen uns die Einfälle weg – Innovationen in der Ur- und Umformtechnik. In: Reinhart, G.; Hoffmann, H.: Münchner Kolloquium 2000, München. München: Utz 2000, S. 107-129.

### *Hornig 1998*

Hornig, K.: I-Tooling. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau, Augsburg. München: Utz 1998, S. 7/1-7/16. (Seminarberichte /iwb 39).

### *Horvath u.a. 1994*

Horváth, P.; u.a.: Rapid Prototyping – der schnelle Weg zum Produkt. In: Harvard Business Manager, (1994) Nr.3, S. 42-53.

### *Jacobs 1997*

Jacobs, P.: Recent advances in Rapid Tooling from Stereolithography. In: Proceedings of the 7<sup>th</sup> international Conference on Rapid Prototyping. 1997, S. 338-354.

### *Kaschka 1999*

Kaschka, U.: Methodik zur Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl und Bewertung von konventionellen und Rapid Tooling-Prozessketten. Aachen: Shaker 1999.

### *Kegelmann 1999*

Kegelmann, S.: Neue Wege im Rapid Tooling – Keltool™ in der Praxis. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Rapid Manufacturing – Methoden für die reaktionsfähige Produktion, Augsburg. München: Utz 1999, S. 7-1 – 7-13. (Seminarberichte /iwb 50).

### *Keller u.a. 1995*

Keller, B.; u.a.: Prototypen und Klein(st)serien. Rapid Prototyping in der Produktentwicklung. In: Kunststoffe 85 (1995) 11, S. 1864-1866, 1868-1870.

### *Klocke u.a. 1996*

Klocke, F.; Wirtz, H.; u.a.: Direct Manufacturing of Metal Prototypes and Prototype Tools. In: Solid Freeform Fabrication Proceedings, The University of Texas at Austin, 1996, S. 141 - 148.

### *Klocke & Clemens 1996*

Klocke, F.; Clemens, U.: Verfahrenskombination aus Fräsen und Laserauftragsschweißen zum Fertigen von Spritzgußwerkzeugen. In: Maschinenmarkt 103 (1997), Nr.18, S.32

*Klocke 1998*

Klocke, F.: Funkenerosion oder Hochgeschwindigkeitsfräsen – sich wandelnde Technologiegrenzen in einem dynamischen Umfeld. In: Tagungsband zum 3D Erfahrungsforum Werkzeug- und Formenbau, 26./27. Februar, Darmstadt 1998, Vortragsnr.: 14.

*Knosala 1991*

Knosala, R.: Objektivierung des Bewertungsprozesses beim Konstruieren. Konstruktion 43 (1991), S. 344-352.

*Kochan 1999*

Kochan, D.: Rapid Tooling – Stand und Perspektiven. In: Weinert, K.: 3D Erfahrungsforum Werkzeug- und Formenbau, 25./26. Februar, Dortmund 1999, S. 201-208.

*Kochan & Müller 1997*

Kochan, D.; Müller, B.: Vom Rapid Prototyping zum Rapid Manufacturing - ein Überblick der Erfahrungen mit LOM in den USA. In: Giesserei 84 ( 1997) 10, S. 26-32.

*König 1984*

König, W.: Fertigungsverfahren Band 1, Drehen, Fräsen, Bohren. 2.Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1984. (Studium und Praxis).

*König 1990*

König, W.: Fertigungsverfahren, Band 3: Abtragen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1990. (Studium und Praxis).

*König & Klocke 1997*

König, W.; Klocke, F.: Fertigungsverfahren 3, Abtragen und generieren. Berlin: Springer 1997.

*Kruth u.a. 1997*

Kruth, J.; Van der Schueren, B.: Soft and Hard Rapid Tools for Polymer and Metal Casting/Moulding. In: Tagungsband zum EMO Kolloquium Werkzeugbau – eine Branche mit Zukunft, 15./16. September 1997, Hannover 1997, S.175-194.

### *Kühnle & Meyer 2001*

Kühnle, H. ; Meyer, R.: Virtuelle und physische Prototypen. In: HK Holz- und Kunststoffverarbeitung 36 (2001) 5, S. 96-98.

### *Kunieda & Mutoh 2000*

Kunieda, M.; Mutoh, H.: Development of multi-spark EDM. In: CIRP Annals Vol. 49/1. Heidelberg: Springer 2000.

### *Kurenbach 1999*

Kurenbach, T.: Rapid Tooling: schnelle Wege zu Prototypen aus Originalmaterialien. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau, Augsburg. München: Utz 1998, S. 5/1-5/16. (Seminarberichte /iwb 39).

### *Leonard-Barton u.a. 1994*

Leonard-Barton D. u.a.: How to integrate Work and Deepen Expertise. Harvard Business Review, September-October 1994, S. 121-130.

### *Levi 2000*

Levi, G.: SLS - Layer Manufacturing a Powerful Complementary Technology in the RPD (Rapid Product Development) Cycle. In: The International Journal for Manufacturing Science & Production, Vol 3, 2-4, 2000, S. 159-166.

### *Levi u.a. 2001*

Levy, G.; Schumacher, B.; Schindel, R.; Nursanto, W.: Rapid Tooling Technologies Enabling the Integration of Product Design and Production. In: proceedings of the 13<sup>th</sup> international symposium for electro-machining, (ISEM XIII), May 9th - 11<sup>th</sup> 2001. Bilbao 2001.

### *Lindemann & Reichwald 1998*

Lindemann, U.; Reichwald, R.: Integriertes Änderungsmanagement. Berlin: Springer, 1998.

### *Lindner & Unger 1998*

Lindner, E.; Unger, P.: Der Spritzgießwerkzeugbau in 130 Beispielen/Gastrow. München: Hanser, 1998.

*Lohner 1996*

Lohner, A.: DMLS - der schnelle Weg zum Kleinserien-Spritzgussteil. In: BLZ GmbH (Hrsg.), Präzisionslaserstrahlfertigungstechnik für den Maschinenbau: Meisenbach Bamberg 1996, S 97 -109.

*Lorenzen u.a. 1996*

Lorenzen, J.; Breitingner, F.: Rapid Tooling – Verfahren zur schnellen Herstellung von Prototypenwerkzeugen. In: Tagungsband zur Euroforum Konferenz Rapid Prototyping, 24./25.Oktober 1996, Köln 1996.

*Lorenzen u.a. 1998*

Lorenzen, J., v. Pieverling, J.: Rapid Tooling – Ein Konzept zur schnellen Werkzeugherstellung. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau, Augsburg. München: Utz 1998, S. 1/1-1/22. (Seminarberichte /iwb 39).

*Lück u.a. 1995*

Lück, T, u.a.: Rapid Tooling - nachgestaltete Techniken und ihre Leistungsfähigkeit. In: ISATA, 28th International Symposium on Automotive Technology and Automation, Rapid Prototyping in the Automotive Industries, Stuttgart: 1995, S. 389-396.

*Macht 1997*

Macht, M.: Möglichkeiten und Grenzen des Rapid Prototyping. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Rapid Prototyping – Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt, Augsburg. München: Utz 1997, S. 5-23. (Seminarberichte /iwb 27).

*Macht 1999*

Macht, M.: Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping. Berlin: Springer 1999 (iwb Forschungsberichte 131).

*Mack 1997*

Mack, M.: Kooperative Produktentwicklung – Neue Formen der Zusammenarbeit in verteilten Unternehmen. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Münchner Kolloquium '97, München. Landsberg am Lech: Verlag moderne Industrie 1997, S.139-148.

*Maidagan 1989*

Maidagan, X.: Funkenerosion in der Serienfertigung und für Einzelstücke. Werkstatt und Betrieb 122 (1989) 7, S. 563-566.

### *Menges & Mohren 1991*

Menges, G.; Mohren, P.: Anleitung zum Bau von Spritzgießwerkzeugen. München: Hanser 1991.

### *Michaeli u.a. 1996*

Michaeli, W. u.a.: Sind Formteile aus RT-Werkzeugen seriennah? In: Kunststoffe 86 (1996) 11, S. 1674-1676.

### *Milberg 1992*

Milberg, J.: Werkzeugmaschinen - Grundlagen. Berlin: Springer 1992.

### *Milberg 1998*

Milberg, J.: Perspektiven für die Produktion aus der Sicht des Fahrzeugbaus – Agilität als Wettbewerbsfaktor. In: Uhlmann, E.; Spur, G.: Internationales Produktionstechnisches Kolloquium, Berlin: Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb 1998, S.29-39.

### *Mizugaki u.a. 2001*

Mizugaki, Y.; Hao, M.; Kikkawa, K.; Nakagawa, T.: Geometric generating mechanism of machined surface by ball-nosed end milling. In: CIRP Annals Vol. 50/1. Heidelberg: Springer 2001.

### *Mückenheim 1996*

Mückenheim, W.: Schwingungen, Wellen, Quanten. Anleitung zum Physik-Praktikum. Augsburg: Skriptum der Fachhochschule 1996.

### *Müller 1996*

Müller, H; u.a.: Computerbased Rapid Prototyping System Selector and Support. In: Proceedings of Time-Compression Technologies '96 Conference, Warwickshire, England 1996.

### *Müller 2000*

Müller, F.: Konstrukteur und Gießer brauchen eine Kultur der Kooperation. In: Guss-Produkte 2000, Darmstadt: Hoppenstedt 2000, S 194-196.

### *Murr u.a. 1999*

Murr, O.; v. Pieverling, J.: Reaktionsfähige Produktion durch Rapid Manufacturing. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Rapid Manufacturing –



Methoden für die reaktionsfähige Produktion, Augsburg. München: Utz 1999, S. 1/1-1/26. (Seminarberichte /iwb 50).

*Neumann 1997*

Neumann, F.: 3D Keltool. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Rapid Tooling – Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt, Augsburg. München: Utz 1997, S. 86-96. (Seminarberichte /iwb 28).

*Nöken 1997*

Nöken, S.: Technologie des Selektiven Lasersinterns von Thermoplasten. Aachen: Shaker 1997 (Berichte aus der Produktionstechnik 681).

*Notar 1998*

Notar, W.: Metallische Prototypen mit dem Vakuum-Differenzdruck-Verfahren. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Rapid Prototyping – Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung, Augsburg. München: Utz 1998, S. 6-1 – 6-12. (Seminarberichte /iwb 38).

*N.N. 1999*

N. N.: Diodenlaser zum Auftragsschweißen. In: Eurolaser (1999) 0299, S. 38.

*Optomec 2000*

<http://www.optomec.com/>; Albuquerque (NM): 2000.

*Ostermann & Weiss 1997*

Ostermann, S.; Weiss, K.: Vorgehen und Ermittlung der Anforderungen an Mg-Prototypen. In: 5. Magnesium Abnehmerseminar & Automotive Seminar. Europäische Forschungsgemeinschaft Magnesiumguss e. V., Oktober 1997.

*Patron 2001*

Patron, C.: Low cost Virtual Reality. In: iwb newsletter (2001) 1/2, S. 9.

*Pieverling 1997*

v. Pieverling, J.: Hochgeschwindigkeitszerspanung für das Rapid Tooling. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Rapid Tooling – Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt, Augsburg. München: Utz 1997, S. 20-39. (Seminarberichte /iwb 28).

### *Pieverling 1998*

v. Pieverling, J.: Einsatzpotentiale der Hochgeschwindigkeitszerspannung. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Rapid Tooling – Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau, Augsburg. München: Utz 1998, S. 4-1 – 4-21. (Seminarberichte /iwb 39).

### *Pieverling u.a. 1998*

v. Pieverling, J.; Lorenzen, J; u.a.: Schnell zum Werkzeug. Maschinenmarkt 104 (1998) 48, S 90-93.

### *Rapid Prototyping Report 1994*

Rapid Prototyping Report: Ford uses fused deposition modeling to create injection mold. In: Rapid Prototyping Report. 4 (1994) 2, S. 1-2.

### *Rapid Prototyping Report 1997*

Rapid Prototyping Report: Development news. In: Rapid Prototyping Report. 7 (1997) 5, S. 4.

### *Rapid Prototyping Report 1998*

Rapid Prototyping Report: New metal rapid prototyping. In: Rapid Prototyping Report. 8 (1998) 12, S. 7-8.

### *Reichwald & Koller 1996*

Reichwald, R.; Koller, H.: Integration und Dezentralisierung von Unternehmensstrukturen. In: Lutz, B., u.a. (Hrsg.): Produzieren im 21. Jahrhundert. Herausforderungen für die deutsche Industrie. Frankfurt a. M.: Campus 1996, S. 225-294.

### *Reinhart u.a. 1998A*

Reinhart, G.; Lorenzen, J.; u.a.: Rapid Tooling – Technologien zur schnellen Herstellung von Prototypen und Vorserienwerkzeugen. In: Tagungsband zum 3D Erfahrungsforum Werkzeug- und Formenbau, 26./27. Februar, Darmstadt 1998, Vortrag Nr.: 16.

### *Reinhart u.a. 1998B*

Reinhart, G.; Fährer, J.; u.a.: Rapid Tooling Process Chains Based on SLS. In: 7th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, 30.6-2.7.98, Aachen, 1998.

*Reinhart u.a. 1999*

Reinhart, G.; u.a.: Turbulentes Umfeld zwingt Unternehmen zum Wandel. In: iwv newsletter (1999) 4, S. 1-2.

*Reinhart 2000*

Reinhart, G.: Im Denken und Handeln wandeln. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Münchner Kolloquium 2000, München. Landsberg am Lech: Verlag moderne Industrie 2000, S.17-40.

*Roche & Jordan 1995*

Roche, A.; Jordan, R.: Schnelle Werkzeugherstellung durch Sprühformen. In: ISATA, 28th International Symposium on Automotive Technologies and Automation, Rapid Prototyping in the Automotive Industries, Stuttgart. 1995, S. 485-491.

*RP-ML 1997*

rapid prototyping mailinglist: archiv of 1997 sorted by date, Helsinki: 1997; <http://ltk.hut.fi/archives/rp-ml-1997/date.html>.

*RP-ML 1999*

rapid prototyping mailinglist: archiv of 1999 sorted by date, Helsinki: 1999; <http://ltk.hut.fi/archives/rp-ml-1999/date.html>.

*Sachs u.a. 1992*

Sachs, E. u.a.: Dreidimensionales Formfertigen: schnelle Herstellung von Werkzeugen und Prototypen von einem CAD Modell. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry 114 (1992) 4, S. 481-488.

*Sandvik 1996*

AB Sandvik Coromant (Hrsg.): Handbuch der Zerspaltung. Sandvik: 1996.

*Sayki 1995*

Sayki, P. J.: Prototyping Die Casting Design with Rapid Prototype Investment Casting. In: Rapid Prototyping and Manufacturing '95, Hyatt Regency, Dearborn, 2.-4.5.1995.

### *Schilling 1996*

Schilling, M.: Verfahren des Rapid Tooling und ihre Anwendung. In: Produkt- und Prozeßentwicklung mit neuen Technologien, Intelligente Produktionssysteme - Solid Freeform Manufacturing, 4. Anwendertagung. Dresden: 1996, S.261-265.

### *Schilling 1998*

Schilling, M.: Keltool™- ein Verfahren des Rapid Tooling. In: Tagungsband zum 3D Erfahrungsforum Werkzeug- und Formenbau, 26./27. Februar, Darmstadt: 1998, Vortrag Nr.: 18.

### *Schock 1996*

Schock, J.: Hart, schnell und glatt fräsen. In: Produktentwicklung, Basis des Erfolges. Tagungsband zum NCG Jahreskongress 13./14.6.1996, Düsseldorf, Vortrag Nr.: 3.

### *Scholl & Dittmar 1996*

Scholl, K.; Dittmar, J.: Rapid Product Developement – Mehr Wissen über neue Produkte. In: Wissenschaftsmanagement 2 (1996) März/April, S. 96-98.

### *Schröder 1998*

Schröder, H.: Variables Stammformsystem für das Rapid Tooling. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau, Augsburg. München: Utz 1998, S. 2/1-2/10. (Seminarberichte /iwb 39).

### *Schuh u.a. 1992*

Schuh, G.; u.a.: Planung technologischer Innovationen mit einem Technologiekalender. In: io management 61 (1992) 3, S. 31-35.

### *Schulz 1996*

Schulz, H.: Hochgeschwindigkeitsfräsen. München: Carl Hanser 1996.

### *Seitz 1996*

Seitz, S.: Das 'Rapid Tooling'-Verfahren. In: Der Stahlformenbauer 13 (1996) 4, S. 42-44.

*Shellabear 1999*

Shellabear, M.: Direktes Metall-Lasersintern – Industrielle Anwendung für Rapid Tooling und Manufacturing. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Rapid Manufacturing – Methoden für die reaktionsfähige Produktion, Augsburg. München: Utz 1999, S. 6/1-6/21. (Seminarberichte /iwb 50).

*Siemens 1974*

Siemens AG (Hrsg.): Organisationsplanung – Planung durch Kooperation. Berlin 1974.

*Smith 1997*

Smith, P. L.: Rapid Tooling - Neuerungen und einige Anwendungsfälle. In: American Machinist 141 (1997) 7, S.52-53.

*Solingen 2000*

<http://www.partsnow.com/soligen/home.shtml>; Northridge (CA): 2000.

*Song 1996*

Song Y.-A.: Selektives Lasersintern metallischer Prototypen. Aachen: Shaker 1996 (Berichte aus der Produktionstechnik 2/96).

*Spur 1987*

Spur, G.; Stoeferle, T.: Handbuch der Fertigungsverfahren: Abtragen. München: Carl Hanser 1987.

*Steger & Conrad 1995*

Steger, W.; Conrad, T.: Rapid Prototyping: Operative und strategische Bewertung von generativen und konventionellen Fertigungsverfahren. In: VDI-Z Special Werkzeug- und Formenbau, November 1995, S. 12-13.

*Storf 1987*

Storf, R.: Drehen - Grundlagen und Anwendungstechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1987.

*Stucker u.a. 1995*

Stucker, B.; Bradley, W.; u.a.: The Production of Electrical Discharge Machining Electrodes Using SLS: Primary Results. In: Solid Free-

form Fabrication Proceedings, The University of Texas at Austin, 1995, S. 278 - 286.

### *Tait 1995*

Tait, D.: Big Parts, Big Savings: An Economic View. In: Rapid Prototyping and Manufacturing '95, Hyatt Regency, Dearborn, 2.-4.5.1995.

### *Tönshoff 1995*

Tönshoff, H.K.: Spanen - Grundlagen. Berlin: Springer, 1995.

### *Tönshoff 1997*

Tönshoff, H.: Technologieentwicklung im Werkzeugbau. In: Tagungsband zum EMO Kolloquium Werkzeugbau – eine Branche mit Zukunft, 15./16. September 1997, Hannover 1997, S.105-129.

### *Tschätsch & Charchut 1991*

Tschätsch, H.; Charchut, W.: Werkzeugmaschinen. München: Carl Hanser, 1991.

### *tu-muenchen 1998*

[http://www.tu-muenchen.de/infocenter/presse/press\\_mit/OLD/presse/1998/businessplan18.6.98.html](http://www.tu-muenchen.de/infocenter/presse/press_mit/OLD/presse/1998/businessplan18.6.98.html). München: 1998.

### *Uziel 1995*

Uziel, Y.: Parts Now: A New Dimension in Metal Parts Manufacturing that Revolutionizes the Metal Casting Industry. Rapid Prototyping and Manufacturing '95, Hyatt Regency, Dearborn, 2.-4.5.1995.

### *Wagner 1998*

Wagner, J.: Vertrieb und Marketing im Werkzeug- und Formenbau. Döttlinger & Partner Beratungsges. mbH (Hrsg.). Uhingen 1998.

### *Weck 1991*

Weck, M.: Werkzeugmaschinen und Fertigungssysteme Band 1, Maschinenarten, Bauformen und Anwendungsbereiche. 4. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1991. (Studium und Praxis).

### *Weckerle 1989*

Weckerle, D.: Funkenerosion. Landsberg: Verlag moderne Industrie 1989.

*Weihbrecht 1998*

Weihbrecht, G.: Prototypen aus Kunststoff mit dem Silikonabformverfahren. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Rapid Prototyping – Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung, Augsburg. München: Utz 1998, S. 5-1 – 5-3. (Seminarberichte /iwb 38).

*Werner 1993*

Werner, A.: Prozessauslegung und Prozesssicherheit beim Einsatz von schlanken Schaftfräsern. Aachen: Shaker 1993 (Berichte aus der Produktionstechnik 10/93).

*Westkämper u.a. 1996*

Westkämper, E; u.a.: Qualitätsmanagement im Rapid Prototyping. ZwF 91 (1996) 12, S. 616-619.

*Wheelwrith u.a. 1992*

Wheelwrith, S.; u.a.: Revolutionizing product development: quantum leaps in speed, efficiency and quality. New York: The Free Press 1992.

*Wieters u.a. 1996*

Wieters, K.-P. u.a.: Lasersintern von metallischen Verbundpulvern für das Rapid Prototyping. In: Werkstoffe für die Fertigungstechnik, Werkstoffe Woche 96. Stuttgart: DGM Informationsgesellschaft. 1996, S. 83-88.

*Wildemann 1993a*

Wildemann, H.: Just-In-Time in Forschung & Entwicklung und Konstruktion. In: ZFB 63 (1993) 12, S.1251-1270.

*Wildemann 1993b*

Wildemann, H.: Optimierung von Entwicklungszeiten Just-In-Time in Forschung & Entwicklung und Konstruktion. München: Transfer Centrum 1993.

*Wilmsen 1997*

Wilmsen, M.: In 14 Tagen zum Spritzgießwerkzeug, Verfahren, Kosten. In: Werkstatt und Betrieb (1997) 9, S.26-29.

## 9 Anhang

### 9.1 Darstellung der untersuchten Bauteilgeometrien

1	Breite	190 mm
2	Länge	220 mm
3	Höhe	115 mm
4	Umschreibbares Volumen des Rohteiles	$4,8 \times 10^6 \text{ mm}^3$
5	Gesamtvolumen	$2,9 \times 10^6 \text{ mm}^3$
6	Zerspanvolumen aus <4> und <5>	$1,9 \times 10^6 \text{ mm}^3$
7	Volumenverhältnis aus <4> und <5>	60,33%
8	Gesamte Oberfläche	$0,2 \times 10^6 \text{ mm}^2$
9	Erodieranteil am Zerspanvolumen <6>	0,49%
10	Anzahl der STL- Dreiecke	5.206

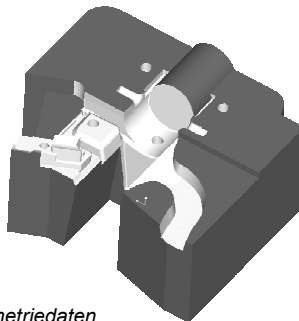


Abbildung 9-1: Bauteil 1 mit Geometriedaten

1	Breite	225 mm
2	Länge	220 mm
3	Höhe	79 mm
4	Umschreibbares Volumen des Rohteiles	$3,9 \times 10^6 \text{ mm}^3$
5	Gesamtvolumen	$2,7 \times 10^6 \text{ mm}^3$
6	Zerspanvolumen aus <4> und <5>	$1,1 \times 10^6 \text{ mm}^3$
7	Volumenverhältnis aus <4> und <5>	60,33%
8	Gesamte Oberfläche	$0,2 \times 10^6 \text{ mm}^2$
9	Erodieranteil am Zerspanvolumen <6>	2,86%
10	Anzahl der STL- Dreiecke	6.690

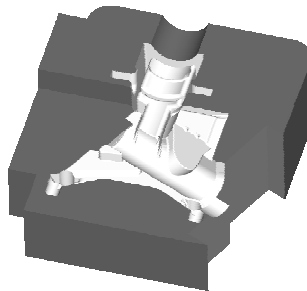


Abbildung 9-2: Bauteil 2 mit Geometriedaten

1	Breite	121 mm
2	Länge	175 mm
3	Höhe	110 mm
4	Umschreibbares Volumen des Rohteiles	$2,3 \times 10^6 \text{ mm}^3$
5	Gesamtvolumen	$0,6 \times 10^6 \text{ mm}^3$
6	Zerspanvolumen aus <4> und <5>	$1,7 \times 10^6 \text{ mm}^3$
7	Volumenverhältnis aus <4> und <5>	27,30%
8	Gesamte Oberfläche	$74 \times 10^3 \text{ mm}^2$
9	Erodieranteil am Zerspanvolumen <6>	0,00%
10	Anzahl der STL- Dreiecke	1.170

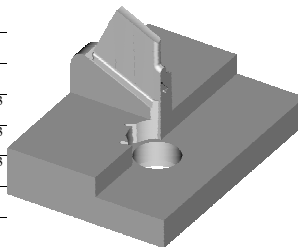


Abbildung 9-3: Bauteil 3 mit Geometriedaten



1	Breite	95 mm
2	Länge	97 mm
3	Höhe	30 mm
4	Umschreibbares Volumen des Rohteiles	$276 \times 10^3 \text{ mm}^3$
5	Gesamtvolumen	$207 \times 10^3 \text{ mm}^3$
6	Zerspanvolumen aus <4> und <5>	$69 \times 10^3 \text{ mm}^3$
7	Volumenverhältnis aus <4> und <5>	74,88%
8	Gesamte Oberfläche	$26 \times 10^3 \text{ mm}^2$
9	Erodieranteil am Zerspanvolumen <6>	0,00%
10	Anzahl der STL- Dreiecke	580

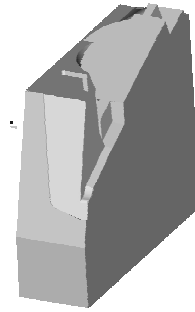


Abbildung 9-4: Bauteil 4 mit Geometriedaten

1	Breite	160 mm
2	Länge	122 mm
3	Höhe	120 mm
4	Umschreibbares Volumen des Rohteiles	$2,3 \times 10^6 \text{ mm}^3$
5	Gesamtvolumen	$1,0 \times 10^6 \text{ mm}^3$
6	Zerspanvolumen aus <4> und <5>	$1,4 \times 10^6 \text{ mm}^3$
7	Volumenverhältnis aus <4> und <5>	42,22%
8	Gesamte Oberfläche	$97 \times 10^3 \text{ mm}^2$
9	Erodieranteil am Zerspanvolumen <6>	0,00%
10	Anzahl der STL-Dreiecke	2500

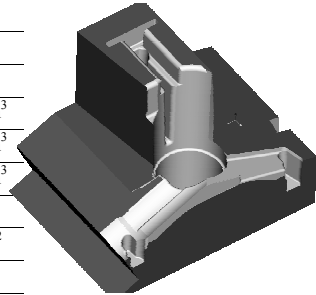


Abbildung 9-5: Bauteil 5 mit Geometriedaten

1	Breite	222 mm
2	Länge	284 mm
3	Höhe	165 mm
4	Umschreibbares Volumen des Rohteiles	$10,4 \times 10^6 \text{ mm}^3$
5	Gesamtvolumen	$7,1 \times 10^6 \text{ mm}^3$
6	Zerspanvolumen aus <4> und <5>	$3,3 \times 10^6 \text{ mm}^3$
7	Volumenverhältnis aus <4> und <5>	68,39%
8	Gesamte Oberfläche	$0,3 \times 10^6 \text{ mm}^2$
9	Erodieranteil am Zerspanvolumen <6>	0,08%
10	Anzahl der STL-Dreiecke	6.070

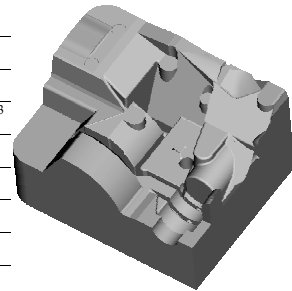


Abbildung 9-6: Bauteil 6 mit Geometriedaten

1	Breite	222 mm
2	Länge	224 mm
3	Höhe	88 mm
4	Umschreibbares Volumen des Rohteiles	$4,4 \times 10^6 \text{ mm}^3$
5	Gesamtvolumen	$3,1 \times 10^6 \text{ mm}^3$
6	Zerspanvolumen aus <4> und <5>	$1,3 \times 10^6 \text{ mm}^3$
7	Volumenverhältnis aus <4> und <5>	70,47%
8	Gesamte Oberfläche	$0,2 \times 10^6 \text{ mm}^2$
9	Erodieranteil am Zerspanvolumen <6>	0,11%
10	Anzahl der STL-Dreiecke	6.722

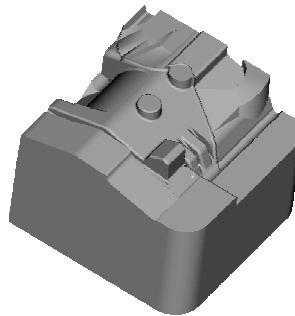


Abbildung 9-7: Bauteil 7 mit Geometriedaten

1	Breite	222 mm
2	Länge	285 mm
3	Höhe	175 mm
4	Umschreibbares Volumen des Rohteiles	$11 \times 10^6 \text{ mm}^3$
5	Gesamtvolumen	$4,4 \times 10^6 \text{ mm}^3$
6	Zerspanvolumen aus <4> und <5>	$6,7 \times 10^6 \text{ mm}^3$
7	Volumenverhältnis aus <4> und <5>	39,29%
8	Gesamte Oberfläche	$0,3 \times 10^6 \text{ mm}^2$
9	Erodieranteil am Zerspanvolumen <6>	3,21%
10	Anzahl der STL-Dreiecke	18.692

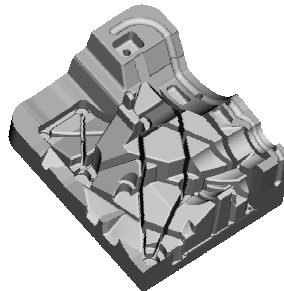


Abbildung 9-8: Bauteil 8 mit Geometriedaten

1	Breite	222 mm
2	Länge	224 mm
3	Höhe	102 mm
4	Umschreibbares Volumen des Rohteiles	$5,1 \times 10^6 \text{ mm}^3$
5	Gesamtvolumen	$2,6 \times 10^6 \text{ mm}^3$
6	Zerspanvolumen aus <4> und <5>	$2,5 \times 10^6 \text{ mm}^3$
7	Volumenverhältnis aus <4> und <5>	51,46%
8	Gesamte Oberfläche	$0,2 \times 10^6 \text{ mm}^2$
9	Erodieranteil am Zerspanvolumen <6>	2,29%
10	Anzahl der STL-Dreiecke	26.076

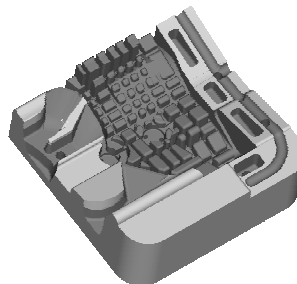


Abbildung 9-9: Bauteil 9 mit Geometriedaten

1	Breite	66 mm
2	Länge	180 mm
3	Höhe	48 mm
4	Umschreibbares Volumen des Rohteiles	$0,5 \times 10^6 \text{ mm}^3$
5	Gesamtvolumen	$0,4 \times 10^6 \text{ mm}^3$
6	Zerspanvolumen aus <4> und <5>	$57 \times 10^3 \text{ mm}^3$
7	Volumenverhältnis aus <4> und <5>	83,81%
8	Gesamte Oberfläche	$52 \times 10^3 \text{ mm}^2$
9	Erodieranteil am Zerspanvolumen <6>	8,73%
10	Anzahl der STL-Dreiecke	3.908

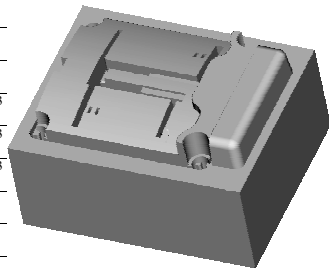


Abbildung 9-10: Bauteil 10 mit Geometriedaten

1	Breite	66 mm
2	Länge	180 mm
3	Höhe	48 mm
4	Umschreibbares Volumen des Rohteiles	$0,5 \times 10^6 \text{ mm}^3$
5	Gesamtvolumen	$0,1 \times 10^6 \text{ mm}^3$
6	Zerspanvolumen aus <4> und <5>	$77 \times 10^3 \text{ mm}^3$
7	Volumenverhältnis aus <4> und <5>	52,89%
8	Gesamte Oberfläche	$35 \times 10^3 \text{ mm}^2$
9	Erodieranteil am Zerspanvolumen <6>	0%
10	Anzahl der STL-Dreiecke	1000

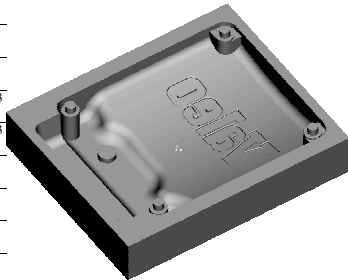


Abbildung 9-11: Bauteil 11 mit Geometriedaten

1	Breite	218 mm
2	Länge	246 mm
3	Höhe	48 mm
4	Umschreibbares Volumen des Rohteiles	$2,6 \times 10^6 \text{ mm}^3$
5	Gesamtvolumen	$1,5 \times 10^6 \text{ mm}^3$
6	Zerspanvolumen aus <4> und <5>	$1,1 \times 10^6 \text{ mm}^3$
7	Volumenverhältnis aus <4> und <5>	58,27%
8	Gesamte Oberfläche	$0,4 \times 10^6 \text{ mm}^2$
9	Erodieranteil am Zerspanvolumen <6>	0,17%
10	Anzahl der STL-Dreiecke	3.874

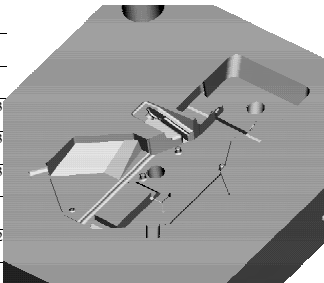


Abbildung 9-12: Bauteil 12 mit Geometriedaten

1	Breite	218 mm
2	Länge	246 mm
3	Höhe	48 mm
4	Umschreibbares Volumen des Rohteiles	$2,6 \times 10^6 \text{ mm}^3$
5	Gesamtvolumen	$1,8 \times 10^6 \text{ mm}^3$
6	Zerspanvolumen aus <4> und <5>	$0,8 \times 10^6 \text{ mm}^3$
7	Volumenverhältnis aus <4> und <5>	70,30%
8	Gesamte Oberfläche	$0,2 \times 10^6 \text{ mm}^2$
9	Erodieranteil am Zerspanvolumen <6>	0,35%
10	Anzahl der STL-Dreiecke	5.302

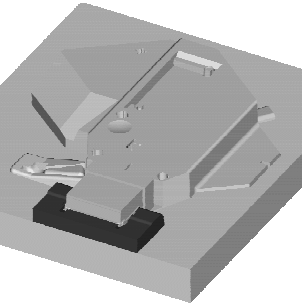


Abbildung 9-13: Bauteil 13 mit Geometriedaten

1	Breite	235 mm
2	Länge	235 mm
3	Höhe	78 mm
4	Umschreibbares Volumen des Rohteiles	$4,3 \times 10^6 \text{ mm}^3$
5	Gesamtvolumen	$3,3 \times 10^6 \text{ mm}^3$
6	Zerspanvolumen aus <4> und <5>	$1,0 \times 10^6 \text{ mm}^3$
7	Volumenverhältnis aus <4> und <5>	75,68%
8	Gesamte Oberfläche	$0,2 \times 10^6 \text{ mm}^2$
9	Erodieranteil am Zerspanvolumen <6>	0,00%
10	Anzahl der STL-Dreiecke	1.126

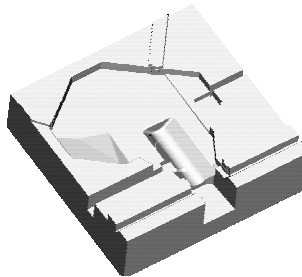


Abbildung 9-14: Bauteil 14 mit Geometriedaten

1	Breite	235 mm
2	Länge	235 mm
3	Höhe	68 mm
4	Umschreibbares Volumen des Rohteiles	$3,8 \times 10^6 \text{ mm}^3$
5	Gesamtvolumen	$2,4 \times 10^6 \text{ mm}^3$
6	Zerspanvolumen aus <4> und <5>	$1,3 \times 10^6 \text{ mm}^3$
7	Volumenverhältnis aus <4> und <5>	64,62%
8	Gesamte Oberfläche	$0,2 \times 10^6 \text{ mm}^2$
9	Erodieranteil am Zerspanvolumen <6>	0,10%
10	Anzahl der STL-Dreiecke	2.436

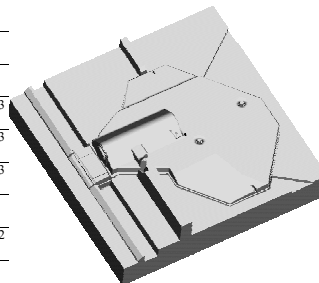


Abbildung 9-15: Bauteil 15 mit Geometriedaten

1	Breite	35 mm
2	Länge	70 mm
3	Höhe	30 mm
4	Umschreibbares Volumen des Rohteiles	$74 \times 10^3 \text{ mm}^3$
5	Gesamtvolumen	$58 \times 10^3 \text{ mm}^3$
6	Zerspanvolumen aus <4> und <5>	$15 \times 10^3 \text{ mm}^3$
7	Volumenverhältnis aus <4> und <5>	79,41%
8	Gesamte Oberfläche	$8 \times 10^3 \text{ mm}^2$
9	Erodieranteil am Zerspanvolumen <6>	16,52%
10	Anzahl der STL-Dreiecke	306

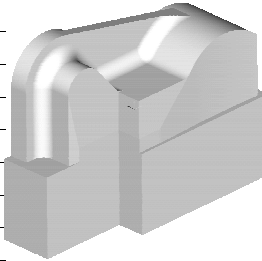


Abbildung 9-16: Bauteil 16 mit Geometriedaten

1	Breite	130 mm
2	Länge	260 mm
3	Höhe	50 mm
4	Umschreibbares Volumen des Rohteiles	$1,7 \times 10^6 \text{ mm}^3$
5	Gesamtvolumen	$1,1 \times 10^6 \text{ mm}^3$
6	Zerspanvolumen aus <4> und <5>	$0,6 \times 10^6 \text{ mm}^3$
7	Volumenverhältnis aus <4> und <5>	64,24%
8	Gesamte Oberfläche	$0,1 \times 10^6 \text{ mm}^2$
9	Erodieranteil am Zerspanvolumen <6>	1,26%
10	Anzahl der STL-Dreiecke	8.700

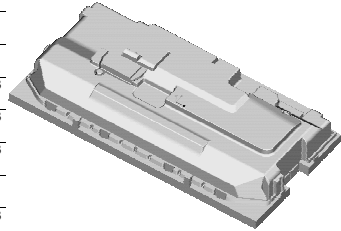


Abbildung 9-17: Bauteil 17 mit Geometriedaten

1	Breite	130 mm
2	Länge	265 mm
3	Höhe	65 mm
4	Umschreibbares Volumen des Rohteiles	$2,2 \times 10^6 \text{ mm}^3$
5	Gesamtvolumen	$0,9 \times 10^6 \text{ mm}^3$
6	Zerspanvolumen aus <4> und <5>	$1,3 \times 10^6 \text{ mm}^3$
7	Volumenverhältnis aus <4> und <5>	43,23%
8	Gesamte Oberfläche	$0,1 \times 10^6 \text{ mm}^2$
9	Erodieranteil am Zerspanvolumen <6>	0,47%
10	Anzahl der STL-Dreiecke	7.642

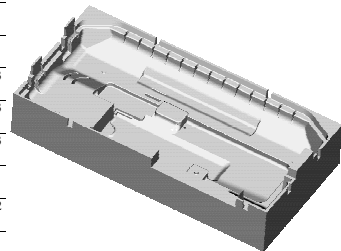


Abbildung 9-18: Bauteil 18 mit Geometriedaten

## 9.2 Ermittlung der Kennzahlen

Folgende anhand des CAD-Modells leicht ermittelbare Kennzahlen wurden hinsichtlich ihres Bestimmtheitsgrades bezüglich einer linearen Approximation an die ermittelten Zeiten- und Kostenwerte überprüft:

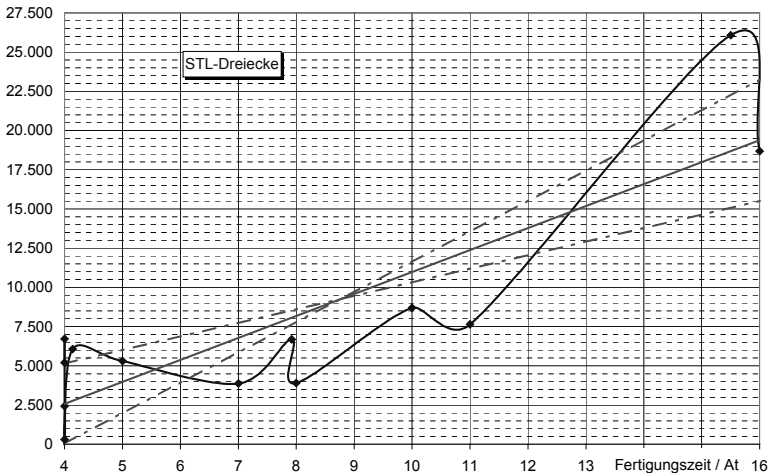
- *Breite, Länge und Höhe* des Bauteils
- *Gesamtvolumen*
- *Zerspanvolumen*; theoretisches Volumen aus Breite x Länge x Höhe abzüglich Bauteilvolumen
- *Volumenverhältnis*; Gesamtvolumen bezogen auf theoretisches Volumen aus Breite x Länge x Höhe
- *Oberfläche*
- *STL-Dreiecke*; Anzahl der beim Approximieren des CAD-Modells durch das STL-Datenformat erzeugten Triangulationsdreiecke (Einstellung: Sehnenhöhe = Winkelkontrolle = 0,5)
- *Polierfläche*; Zu entformende Oberfläche, D.h. Oberfläche die bei Positivbauteil und Negativformeinsatz übereinstimmt.
- *Gewichtete Polierfläche*; Polierfläche multipliziert mit Schwierigkeitsfaktor (0,3 bzw. 1 je nach Zugänglichkeit der Oberfläche für manuelles Finish)
- *Elektroden*; Die Anzahl der Elektroden, die benötigt wird, um das Bauteil durch Senkerosoin herzustellen.
- *Erodiervorgänge*; Die Anzahl an Erodiervorgängen, die zur Herstellung durchgeführt werden muß.
- *Erodiervolumenverhältnis*; Der geschätzte Anteil am Zerspanvolumen, der bei Herstellung durch Funkenerosion erodiert wird.
- *Erodiervolumen*; Das aus dem geschätzten Erodiervolumenverhältnis ermittelte Erodiervolumen.
- *Elektroden x Erodiervolumenverhältnis*; Ein einheitenloser Faktor, der ein Maß für die Anzahl der Elektroden über den Erodieraufwand relativiert.
- *STL-Dreiecke/Oberfläche*; Komplexitätsfaktor, da die Anzahl der Triangulationsflächen bezogen auf die gesamte Oberfläche die geometrische Komplexität objektiviert.

**Bestimmtheitsgrade in Zeitabhängigkeit:**

Kennzahlen	Bestimmtheits- maß $R^2$
<b>STL-Dreiecke</b>	<b>73,91%</b>
Breite	0,46%
Länge	11,39%
Höhe	9,13%
Gesamtvolumen	0,01%
Zerspanvolumen	28,86%
Volumenverhältnis	47,40%
Oberfläche	4,09%
Polierfläche	53,27%
Elektroden x Erodiervolumenverhältnis	36,39%
<b>Elektroden</b>	<b>76,35%</b>
Erodiervorgänge	50,74%
Geschätztes Erodiervolumenverhältnis	0,79%
<b>STL-Dreiecke / Oberfläche</b>	<b>74,87%</b>
Geschätztes Erodiervolumen	48,04%
<b>Gewichtete Polierfläche</b>	<b>78,38%</b>

Tabelle 9-1: Bestimmtheitsgrade der Kennzahlen bzgl. Fertigungszeit

Exemplarisch ergibt sich für die Kennzahl STL-Dreiecke nach Durchführung der linearen Regression unter Berücksichtigung des Bestimmtheitsgrades bzgl. der Fertigungszeit folgender Zusammenhang:



$$\text{Ausgleichsgerade: } y = (999,12 \pm -3,018\text{E}+03)x + (100,56 \pm 3,606\text{E}+03)$$

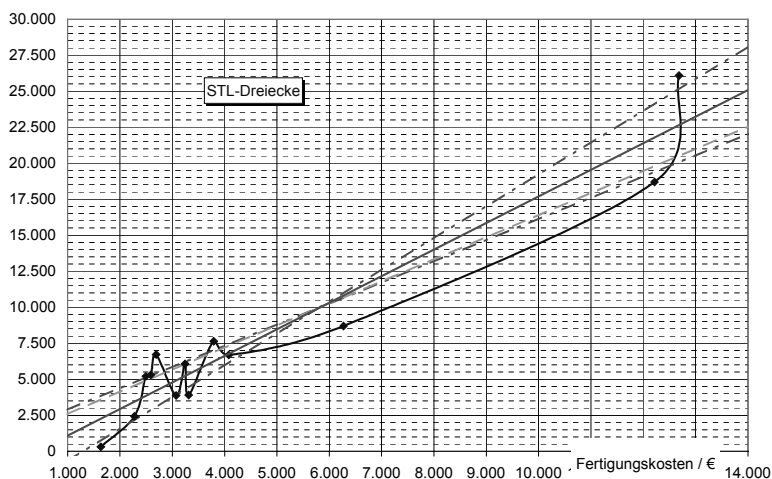
Abbildung 9-19: STL-Dreiecke über Fertigungszeit

**Bestimmtheitsgrade in Kostenabhängigkeit:**

Kennzahlen	Bestimmtheitsmaß $R^2$
<b>STL-Dreiecke</b>	<b>92,11%</b>
Breite	6,52%
Länge	11,68%
Höhe	24,80%
Gesamtvolumen	5,21%
Zerspanvolumen	46,07%
Volumenverhältnis	40,81%
Oberfläche	8,53%
Polierfläche	66,69%
Elektroden x Erodiervolumenverhältnis	29,13%
Elektroden	50,54%
Erodiervorgänge	55,49%
Geschätztes Erodiervolumenverhältnis	1,16%
STL-Dreiecke / Oberfläche	49,81%
<b>Geschätztes Erodiervolumen</b>	<b>77,26%</b>
<b>Gewichtete Polierfläche</b>	<b>81,81%</b>

Tabelle 9-2: Bestimmtheitsgrade der Kennzahlen bzgl. Fertigungszeit

Die Ausgleichsgerade zeigt für die Kennzahl STL-Dreiecke bzgl. der Fertigungskosten folgendes Diagramm:



$$\text{Ausgleichsgerade: } y = (1,844\text{E}+00 \pm 3,703\text{E}-01)x + (-7,415\text{E}+02 \pm 2,153\text{E}+03)$$

Abbildung 9-20: STL-Dreiecke über Fertigungskosten



Die jeweils in Fettdruck gekennzeichneten Kennzahlen weisen die Bestimmtheitsmaße über 70% auf und werden als Kriterium für die prognostizierende Abschätzung der Fertigungszeiten und -kosten verwendet.



# iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- 1 *Streifinger, E.*  
Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel  
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*  
Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen  
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*  
Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern  
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*  
Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen  
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*  
Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen  
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Buchs, S.*  
Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung  
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, J.*  
Schneiderodierte Oberflächen  
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*  
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen  
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*  
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung  
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*  
Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen  
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*  
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse  
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*  
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze  
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bürstner, H.*  
Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion  
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Groha, A.*  
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme  
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*  
Klippsmontage mit Industrierobotern  
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 *Lutz, P.*  
Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung  
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 *Klippel, C.*  
Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems  
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 *Rascher, R.*  
Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung  
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 *Heusler, H.-J.*  
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme  
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*  
Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen  
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Sauerer, Ch.*  
Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen  
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*  
Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung  
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Peiker, St.*  
Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems  
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schugmann, R.*  
Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage  
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Wrb, P.*  
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik  
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelschäuser, P.*  
Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung  
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 *Prasch, J.*  
Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie  
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 *Teich, K.*  
**Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion**  
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 *Pfrang, W.*  
**Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze**  
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 *Tauber, A.*  
**Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung**  
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 *Jäger, A.*  
**Systematische Planung komplexer Produktionssysteme**  
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 *Hartberger, H.*  
**Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme**  
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuczek, H.*  
**Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung**  
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*  
**Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten**  
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*  
**3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen**  
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 *Naber, H.*  
**Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente**  
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 *Kupec, Th.*  
**Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen**  
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 *Maulhardt, U.*  
**Dynamisches Verhalten von Kreissägen**  
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 *Götz, R.*  
**Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile**  
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 *Koepfer, Th.*  
**3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung**  
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 *Schmidt, M.*  
**Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme**  
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 *Burger, C.*  
**Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen**  
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 *Hoßmann, J.*  
**Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen**  
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*  
**Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmbaukastens für robotergeführte Klebprozesse**  
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*  
**Integrierte Diagnose in Produktionszellen**  
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*  
**Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades**  
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*  
**Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen**  
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schrüfer, N.*  
**Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung**  
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wisbacher, J.*  
**Methoden zur rationalen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen**  
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*  
**Laserbearbeitung mit Robotern**  
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*  
**Digitale Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe**  
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaas, W.*  
**Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung**  
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Helml, H.J.*  
**Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose**  
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*  
**Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung**  
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*  
**Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage**  
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 *Bomm, H.*  
**Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme**  
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*  
**Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen**  
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*  
**Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung**  
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*  
**Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen**  
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strohmayr, R.*  
**Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von  
Zubringeinrichtungen**  
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*  
**Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer  
Zellenrechnersoftware**  
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stetter, R.*  
**Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur  
Effizienzsteigerung des Industrieroboteinsatzes**  
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*  
**Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage**  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*  
**Simulation des Schwingungsverhaltens spanender  
Werkzeugmaschinen**  
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*  
**Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-  
Layoutoptimierung**  
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummetsteiner, G.*  
**3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur  
Planung manueller Montagesysteme**  
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelman, F.*  
**Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen  
Automatisierung von Produktionssystemen**  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*  
**Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-  
Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik**  
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*  
**Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen**  
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*  
**Automatische Inbetriebnahme  
geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**  
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*  
**Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von  
Produktionssystemen**  
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*  
**Rechnergestütztes Projektinformations- und  
Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld**  
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*  
**Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur  
Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge**  
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zetlmayer, H.*  
**Verfahren zur simulationsgestützten  
Produktionsregelung in der Einzel- und  
Kleinserienproduktion**  
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*  
**Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung**  
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*  
**Das integrierte Betriebsmittelwesen · Baustein einer  
flexiblen Fertigung**  
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Raith, P.*  
**Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in  
der Arbeitsvorbereitung**  
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*  
**Strömungstechnische Optimierung von  
Produktionssystemen durch Simulation**  
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zäh, M. F.*  
**Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen**  
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanner, N.*  
**Technologisches Prozeßmodell für die  
Kugelschleifbearbeitung**  
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*  
**Konstruktionsbegleitende Kalkulation von  
Werkzeugmaschinen**  
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*  
**Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen  
Fertigungszellen**  
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*  
**Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der  
Hartbearbeitung**  
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*  
**Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in  
flexiblen Produktionszellen**  
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*  
**Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung  
und logistisches Störungsmanagement**  
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*  
**Systematische Planung anwendungsspezifischer  
Materialflußsteuerungen**  
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*  
**Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in  
Montageanlagen**  
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Linner, St.*  
**Konzept einer integrierten Produktentwicklung**  
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*  
**Integrierte Planung von Informationssystemen für  
rechnergestützte Produktionssysteme**  
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deuschle, U.*  
**Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in  
mittelständischen Unternehmen**  
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*  
**Recyclingintegrierte Produktentwicklung**  
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*  
**Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte**  
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*  
**Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen · Gestellstrukturen**  
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*  
**Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren**  
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*  
**Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme**  
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*  
**Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen**  
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*  
**Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme**  
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*  
**Autonome Fertigungszellen · Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung**  
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*  
**Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie**  
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*  
**Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung**  
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*  
**Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten**  
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischelsrieder, K.*  
**Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion**  
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Köhler, R.*  
**Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten**  
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*  
**Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung**  
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*  
**Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem**  
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*  
**Steuerungintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe**  
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*  
**Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen**  
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Krönert, U.*  
**Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitssuche und Standardisierung**  
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*  
**Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service**  
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*  
**Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion**  
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*  
**Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen**  
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*  
**Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung**  
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*  
**Produktionsregelung · ein modularer, modellbasierter Ansatz**  
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*  
**Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse**  
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindnermaier, R.*  
**Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen**  
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64666-8
- 116 *Koehler, J.*  
**Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung**  
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*  
**Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen**  
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*  
**Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung**  
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*  
**Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen**  
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Plab, E.*  
**Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen**  
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*  
**Erfahrungsgeleitete Planung von Laseranlagen**  
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

# Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen  
und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, [utz@utzverlag.com](mailto:utz@utzverlag.com)

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**  
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**  
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**  
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**  
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**  
86 Seiten · ISBN 3-931327-76-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel**  
130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**  
120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**  
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**  
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**  
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**  
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 14 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 15 **Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**  
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**  
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**  
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**  
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**  
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag**  
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**  
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**  
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar**  
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 30 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 31 **Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**  
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 32 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 33 **3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**  
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**  
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**  
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**  
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**  
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**  
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen**  
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**  
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**  
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**  
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobauteilen**  
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**  
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**  
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1
- 47 **Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation**  
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 **Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen**  
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8

- 49 **Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 **Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion**  
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 **Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle**  
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien**  
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 **Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung**  
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54 **Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation**  
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55 **e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56 **Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57 **Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien**  
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 **Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik**  
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 **Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln**  
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 62 **Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien**  
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 **Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge**  
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1



# Forschungsberichte iw b

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen  
und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Forschungsberichte iw b ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, utz@utzverlag.de

- 122 Schneider, Burghard  
**Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile**  
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd  
**Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung**  
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Mößmer, Helmut E.  
**Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme**  
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Gunter  
**Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern**  
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen  
**Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik**  
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelmann, Doris  
**Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern**  
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Diesch, Rolf  
**Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen**  
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Lulay, Werner E.  
**Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen**  
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Murr, Otto  
**Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen**  
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Macht, Michael  
**Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping**  
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Mehler, Bruno H.  
**Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbünden**  
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut  
**Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle**  
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan  
**Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen**  
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can  
**Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik**  
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

- 136 Brandner, Stefan  
**Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken**  
 2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.  
**Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung**  
 2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra  
**Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen**  
 2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander  
**Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen**  
 2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.  
**Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken**  
 2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprengel, Andreas  
**Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung**  
 2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas  
**Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion**  
 2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf  
**Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen**  
 2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0 · lieferbar ab ca. 02/01
- 144 Schneider, Christian  
**Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion**  
 2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian  
**Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen**  
 2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich  
**Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen**  
 2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof  
**Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss**  
 2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank  
**Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen**  
 2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Höhn, Michael  
**Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme**  
 2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Böhl, Jörn  
**Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung**  
 2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert  
**Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben**  
 2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X  
 lieferbar ab ca. 09/01
- 152 Stephan Dürrschmidt  
**Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion**  
 2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6

- 153 Bernhard Eich  
**Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung**  
 2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7
- 154 Wolfgang Rudorfer  
**Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke**  
 2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier  
**Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe**  
 2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak  
**Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen**  
 2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner  
**Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen**  
 2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz  
**Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung**  
 2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald  
**Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung**  
 2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner  
**Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen**  
 2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller  
**Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen**  
 2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer  
**Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen**  
 2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fährer  
**Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses**  
 2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner  
**Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler**  
 2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte  
**Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik**  
 2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weißenberger  
**Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess**  
 2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob  
**Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik**  
 2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer  
**System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen**  
 2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel  
**Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen**  
 2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7

- 170 Paul Jens Peter Ross  
**Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung**  
2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun  
**Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess**  
2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6
- 172 Florian von der Hagen  
**Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen**  
2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer  
**Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe**  
2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen  
**Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme**  
2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton  
**Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsender Montagesysteme**  
2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser  
**Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke**  
2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breitingner  
**Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen**  
2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling  
**Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling**  
2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch  
**Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine**  
2003 · 190 Seiten · 67 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein  
**Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems**  
2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4



